



ANAIS DO VII SEMINÁRIO INTERNACIONAL SOBRE RESÍDUOS DE EQUIPAMENTOS ELETROELETRÔNICOS - SIREE 2025

**ESTRATÉGIAS DE ECONOMIA CIRCULAR PARA A RECUPERAÇÃO
DE MINERAIS CRÍTICOS E ESTRATÉGICOS**



**RIO DE JANEIRO, BRASIL
14 A 16 DE OUTUBRO DE 2025**



CETEM
CENTRO DE TECNOLOGIA MINERAL



MINISTÉRIO DA
CIÊNCIA, TECNOLOGIA
E INOVAÇÃO



CIP – Catalogação na Publicação

A532

Seminário Internacional sobre Resíduos de Equipamentos
Eletroeletrônicos (7. : 2025 : Rio de Janeiro, RJ)
Anais do VII Seminário Internacional sobre Resíduos de
Equipamentos Eletroeletrônicos [recurso eletrônico] / Lucia
Helena da Silva Maciel Xavier ; Emmanuelle Soares de
Carvalho Freitas (org.). - Rio de Janeiro : CETEM/MCTI, 2025.
101 p.

ISBN 978-65-5919-091-1.

1. Economia Circular. 2. Ciência e Tecnologia 3. Pesquisa.
4. Evento. 5. E-book I. Centro de Tecnologia Mineral. II. Xavier, Lucia
Helena da Silva Maciel (org.). III. Freitas, Emmanuelle Soares de
Carvalho (org.). IV. Título.

CDD 338.9276

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca do CETEM/MCTI
Bibliotecário (a) Rosana Silva de Oliveira CRB7 – 5849



SEMINÁRIO INTERNACIONAL DE RESÍDUOS DE EQUIPAMENTOS ELETROELETRÔNICOS
14 a 16 de outubro de 2025

ANAIS DO VII SIREE
Seminário Internacional de Resíduos de Equipamentos Eletroeletrônicos
14 a 16 de outubro de 2025
Rio de Janeiro, Brasil

Tema Principal: “Estratégias de economia circular para a recuperação de minerais críticos e estratégicos”

COMISSÃO ORGANIZADORA

- **Lúcia Helena Xavier, D.Sc** - Pesquisadora CETEM/MCTI
- **Emmanuelle Freitas, D.Sc.** - Pesquisadora PCI CETEM/MCTI

COMISSÃO CIENTÍFICA

- **Carlos Moraes, D.Sc.** – UNISINOS
- **Feliciane Brehm, D.Sc.** – UNISINOS
- **Aline Deitos, M.Sc.** – UNISINOS
- **Doutoranda Emannuele Santos** – UNISINOS
- **Mestranda Katia Ocanha** – UNISINOS
- **Débora Machado de Souza, D.Sc** – UNISINOS
- **Isabela Ferreira, D.Sc.** – UNISINOS

APOIO

- **Luciana Contador, D.Sc.** - CETEM
- **Luciana Mofati, D.Sc.** - REMINAR3
- **Jacqueline Grund** – CETEM
- **Luciana Yamane, D.Sc.** – RECUPER3
- **Franciele Cunico, D.Sc.** – RECUPER3
- **Doutorando. Kenzo Abiko** – RECUPER3
- **Akio Goya, M.Sc.** – Lassu-USP e Instituto GEA
- **Doutoranda. Suzana Neves** – RECUPER3
- **Genyr Kappler, D.Sc.** – RECUPER3



SEMINÁRIO INTERNACIONAL DE RESÍDUOS DE EQUIPAMENTOS ELETROELETRÔNICOS
14 a 16 de outubro de 2025

- **Mestranda. Paula Teixeira – RECUPER3**
- **Mestrando. Carlos Gomes – RECUPER3**
- **Grad. Marianna Tamyé – RECUPER3**
- **Grad. Roberto Júnior – RECUPER3**
- **Grad. Anna Valente – RECUPER3**
- **Grad. Luiza Elena – RECUPER3**



SUMÁRIO

Título	Autores	Página
AVALIAÇÃO ORÇAMENTÁRIA DA LOGÍSTICA REVERSA DE REEE COMO FONTE DE MATÉRIA-PRIMA ESTRATÉGICA DE SEGUNDA GERAÇÃO	Thiago Dai Prá da Silva; Lisiane Kleinkauf da Rocha	4
CIGARROS ELETRÔNICOS: IMPACTOS NO AMBIENTE E DESAFIOS PARA SUA DESTINAÇÃO FINAL	Moreira, J.C.; Sisinno, C.L.S.; Silva, A.L.O.	16
RESÍDUOS DE EQUIPAMENTOS ELETROELETRÔNICOS COMO NANORESÍDUOS: DESAFIOS PARA SUA GESTÃO	Sisinno, C.L.S.; Rizzo, A.C.L.; Cunha, C.D.	28
ROTAS DE RECICLAGEM DE PLÁSTICOS E RESÍDUOS ELETROELETRÔNICOS: UM ESTUDO DE CASO EM UM MUNICÍPIO DE PEQUENO PORTE DO PARANÁ	Monfredinho B; Sousa M; Lovón-Canchumani G	40
AVALIAÇÃO DE ESTRATÉGIAS METODOLÓGICAS NO GERENCIAMENTO DE RESÍDUOS ELETRÔNICOS: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA	Carlos Eduardo Bueno; Abner Fernandes Souza da Silva; Pedro Henrique Muguinda Kuniyoshi; Virgínia Aparecida Silva Moris	54
ESTRATÉGIAS DE FIM DE VIDA PARA PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA	Abner Fernandes Souza da Silva; João Eduardo Azevedo Ramos da Silva; Carlos Eduardo Bueno; Pedro Henrique Muguinda Kuniyoshi; Virgínia Aparecida da Silva Moris	66



ARTIGOS

AVALIAÇÃO ORÇAMENTÁRIA DA LOGÍSTICA REVERSA DE REEE COMO FONTE DE MATÉRIA-PRIMA ESTRATÉGICA DE SEGUNDA GERAÇÃO

Autores: M.Sc. Thiago Dai Prá da Silva^{1*}; M.Sc. Lisiane Kleinkauf da Rocha^{2**};

¹ Universidade do Vale do Rio dos Sinos-UNISINOS;² Universidade do Vale do Rio dos Sinos-UNISINOS;

*thiagosilva7@edu.unisinos.br **rocha.lisiane@hotmail.com

Resumo: O crescimento exponencial da produção e descarte de Equipamentos Eletroeletrônicos (EEE) tem intensificado a geração de Resíduos de Equipamentos Eletroeletrônicos (REEE), os quais contêm metais estratégicos passíveis de recuperação. Neste contexto, a logística reversa surge como uma alternativa para reintegrar esses materiais à cadeia produtiva, promovendo a economia circular. Este estudo teve como objetivo aplicar ferramentas de Orçamento Empresarial para avaliar os desprendimentos financeiros necessários à operacionalização do sistema de logística reversa de REEE no Brasil. A pesquisa foi realizada por meio de estudo de caso em três empresas atuantes em diferentes etapas da cadeia: pontos de coleta, gerenciamento de resíduos e formação de feedstocks. Foram elaborados orçamentos de produção e de despesas departamentais com base em dados reais das operações. A análise evidenciou a importância do planejamento orçamentário para a sustentabilidade financeira dos agentes envolvidos, especialmente cooperativas e pequenos gerenciadores, permitindo maior clareza na alocação de recursos e tomada de decisão. Conclui-se que a gestão orçamentária contribui para estruturar e fortalecer a cadeia de logística reversa, viabilizando a recuperação de metais e reduzindo a dependência de matérias-primas virgens. O estudo destaca ainda a necessidade de políticas públicas e incentivos que ampliem a capacidade operacional do setor e favoreçam a consolidação de uma economia circular mais eficiente e integrada.

Palavras-chave: Orçamento empresarial; Resíduos de Equipamentos Eletroeletrônicos; Logística Reversa; Economia Circular



1. Introdução

Pan *et al.* (2022) apresentam que os Resíduos de Equipamentos Eletroeletrônicos (REEE) são a matriz de resíduos que mais cresce no mundo, formando assim um grande estoque de metais críticos para as indústrias fabricantes de Equipamentos Eletroeletrônicos (EEE) que, com gestão adequada, podem retornar aos processos produtivos. A transição de modelo produtivo linear para o modelo circular quando considerado os REEE possuem desafios específicos para viabilidade de diferentes metais presentes nos resíduos necessitando aplicação da Mineração Urbana que visa segregar e concentrar os materiais presentes nos resíduos para facilitar e/ou viabilizar o processo de recuperação dos mesmos. Um desses desafios se dá na gestão empresarial e saúde financeira de todas as empresas que compõe essa cadeia produtiva.

Este artigo traz a ferramenta de gestão Orçamento Empresarial aplicado com o intuito de auxiliar a estruturar os esforços da operação do sistema de Logística Reversa de REEE, da coleta à industrialização de metais estratégicos, com base em operações executadas em anos anteriores por gerenciadores que atuaram em diferentes níveis na cadeia de operação do sistema. Ele possibilita uma análise macroeconômica dos desprendimentos necessários para viabilizar o sistema de logística reversa de REEE no Brasil, embora não considere o orçamento de vendas, que não foi abordado devido à grande volatilidade da entrada de resíduos relatada pelas empresas consultadas. Assim a ferramenta foi aplicada com o objetivo de realizar uma avaliação dos desprendimentos financeiros necessários, mapeando as saídas existentes, para a operacionalização do sistema. Esse estudo tem por objetivo demonstrar a importância do uso do Orçamento Empresarial para que organizações de menor porte como cooperativas de resíduos e gerenciadores de REEE consigam também se utilizar de ferramentas da administração empresarial adaptadas à realidade de cada empresa e auxiliando na busca pela sustentabilidade financeira de seus negócios, com o intuito de valorizar a cadeia já existente, que executa um trabalho árduo de recolhimento e realização de mineração urbana.

Os dados apresentados nesse trabalho são oriundos de um estudo de caso, realizado em três empresas distintas: uma responsável exclusivamente pela coleta e segregação dos REEE em pontos preestabelecidos, denominada Empresa 1; outra que tem como atividade principal o gerenciamento desses resíduos, no que tange a descaracterização e desmontagem, denominada Empresa 2; e por fim, uma empresa responsável por criar *feedstocks* de matérias-primas de segunda geração, oriunda das etapas das empresas anteriores, denominada Empresa 3. Cabe ressaltar que, nesse estudo, se trata de empresas e negócios distintos uns dos outros. Foram realizadas entrevistas semi-estruturadas e observações *in loco* nas respectivas empresas, que terão seus nomes e outras características preservados.

2. Resíduos de Equipamentos Eletroeletrônicos - REEE

Os EEE são dispositivos que utilizam corrente elétrica ou campo eletromagnético para realizar funções devidamente programadas, podendo ser complexas como armazenamento de informações em um *hard disc* ou simples como o aquecimento de uma resistência em um secador de cabelo. (SHITTU *et al.*, 2021).

O rápido crescimento da indústria de EEE e a busca por maior competitividade com novas tecnologias e melhores taxas de lucro, incentiva a geração de REEE ao diminuir a vida útil



dos equipamentos causando obsolescência planejada e perceptiva. (PESSANHA; MORALES, 2020). Ao serem descartados os EEE tornam-se REEE. Existem muitas variedades de REEE como computadores e celulares classificados como linha verde, geladeiras e refrigeradores classificados como linha branca, além de linhas azul e marrom. Segundo dados da Associação Brasileira de Reciclagem de Eletroeletrônicos e Eletrodomésticos (ABREE), disponibilizados no Relatório Anual de Desempenho do Sistema de Logística Reversa (SLR) de Eletroeletrônicos e seus componentes de uso doméstico, em 2021 foram contabilizados à destinação final ambientalmente correta e reciclagem de 1.245 toneladas de REEE, o que representa mais de 101 toneladas por mês e mais de 3 toneladas diárias. Morales-Urrutia (2023) coloca que as quantidades de REEE descartadas formalmente vêm aumentando a cada dia, e as estimativas para o futuro são de crescimento ainda maior, consequentemente a disponibilidade de metais estratégicos para governos e fabricantes de EEE presentes nos resíduos e passíveis de recuperação também tende a crescer. (KASTANAKI; GIANNIS, 2022).

A projeção da geração de REEE no mundo para 2030 é de 75 milhões de toneladas e o desenvolvimento da economia circular vem se mostrando uma alternativa sustentável para gerenciamento deste grupo de resíduos. A prática da circularidade dentro da cadeia produtiva de metais não só reduz os impactos ambientais da destinação incorreta, mas também evita danos ambientais provenientes de extrações de novos recursos na natureza, além de gerar ganhos financeiros (PAN *et al.*, 2022).

Os REEE podem ser um risco à saúde humana quando sujeitos a descarte ou a processos de reciclagem inapropriados, o que gera uma preocupação global devido ao aumento significativo da geração dos resíduos nos últimos anos, e por estes serem considerados perigosos. Processos industriais mecânicos, de pirometalurgia, de bio separação e de hidrometalurgia vêm sendo utilizados para a recuperação de metais presentes nos circuitos impressos, parte estratégica dos resíduos eletrônicos pela sua composição que inclui os metais estratégicos como o Estanho e o Ouro, metais preciosos como Prata e Paládio e determinadas substâncias tóxicas como Chumbo, Cádmio e Bromo. (GANDE *et al.*, 2021)

Com os REEE, por meio da manufatura reversa e separação das partes, os resíduos se tornam minérios urbanos passíveis de recuperação dos elementos estratégicos que posteriormente serão necessários como matéria-prima na fabricação de EEE novamente. (ISLAM; HUDA, 2018; KASTANAKI; GIANNIS, 2023; SHARMA *et al.*, 2023).

3. Economia circular

A Economia circular sugere que as indústrias fabricantes de REEE repensem suas fontes de fornecimento de maneira a dar preferência à utilização de matérias-primas que sejam passíveis de reciclagem e que fabriquem produtos passíveis à mineração urbana, assim gerando valor econômico e estratégico na cadeia de suprimentos de novos produtos, viabilizando o fechamento do sistema do ciclo de fornecimento de materiais. (FREUND *et al.*, 2019).

Dentre os REEE, o conceito de Economia Circular tem um importante papel, já que a composição dos resíduos contém materiais tóxicos, metais preciosos e elementos críticos, todos relacionados entre si formando um resíduo com uma matriz complexa que, quando submetido ao conceito de Economia Circular, passa de um grande passivo ambiental para uma oportunidade



de mitigação de dependência de fornecimento de minerais estratégicos (VAKILCHAP; MOUSAVI, 2022). O conceito também apresenta vantagens em relação às questões econômicas com um potencial mercado de recuperação de matéria-prima avaliado em 57 bilhões de dólares. (PAN *et al.*, 2022).

A coleta e a logística dos REEE são os maiores desafios para promover a Economia Circular e o fechamento do ciclo produtivo dos materiais de que esses resíduos são compostos. Para tal desafio dentro da Economia Circular, a Logística Reversa (LR) precisa acontecer, através de modelos de negócios que podem ser empresas de coleta, cooperativas, gerenciadores de resíduos e *feedstocks* que concentram e classificam os produtos em fim de vida útil, para acumularem volumes de resíduos visando futura recuperação de matéria-prima através da mineração urbana. (COGULA *et al.*, 2022).

Reduzir o impacto financeiro na operação e o impacto ambiental gerado pela arrecadação dos REEE, assim como minimizar a extração de recursos naturais, são premissas do conceito de LR, que traz algumas estratégias que otimizam a operação. Assim como na Logística Empresarial, a LR necessita de uma gestão eficaz e estratégica para que os elos (organizações) da cadeia logística funcione. Um exemplo disso é a escolha de pontos de coleta estratégicos em locais de grandes movimentações de pessoas, como supermercados e shopping centers, que oportuniza às pessoas que armazenam em suas residências os dispositivos sem uso, terem a oportunidade de aproveitar a logística de deslocamento realizada à ida até esses locais para realizarem a destinação correta dos REEE, zerando a necessidade de emissão de CO₂ na primeira etapa do Sistema de Logística Reversa (SLR) de REEE. Outro exemplo existe na rota utilizada para a coleta desses resíduos nos gerenciadores de REEE, devem ser de maneira otimizada para menor deslocamento entre os pontos e com volume suficiente para justificar o desprendimento financeiro do deslocamento. (ARAUJO *et al.*, 2020).

Com a Economia Circular e a Logística Reversa os fabricantes de EEE têm a oportunidade de adotar estratégias de substituição parcial de materiais utilizados na fabricação por reciclados. No entanto, a falta de informações precisas sobre previsões de fluxos de fornecimento de materiais secundários leva os fabricantes a continuarem dependendo de fornecedores de fontes primárias, recorrendo à matéria-prima reciclada apenas para mitigar o risco de interrupção no fornecimento de materiais estratégicos. Este cenário destaca a importância da implementação de sistemas mais robustos de monitoramento e previsão de suprimentos, bem como o desenvolvimento de parcerias sólidas com fornecedores de materiais reciclados, a fim de promover uma transição gradual e mais eficaz para uma cadeia de suprimentos mais sustentável (WÄGER, 2011).

5. Orçamento Empresarial - OE

Orçamento Empresarial é a expressão quantitativa de um plano de ação, caracterizada como modelo de programação de atividade. É composto por uma série de orçamentos que, ao final, além da demonstração dos objetivos em números, traz para a empresa uma série de análises para tomada de decisão (PADOVEZE, 2009). A prática de gerenciamento estratégico por meio de orçamentos teve seu início em 1920, com o intuito apenas de controlar os custos e fluxo de caixa de grandes negócios, porém, ao longo dos anos, tornou-se o principal mecanismo de controle e metas de organizações. Agrupando custos para a melhor interpretação e buscando



prever os desprendimentos financeiros do ano seguinte, o OE possibilita a mensuração do esforço para atingir o plano de ação definido pela empresa (MOREIRA, 2018; PONTES, 2013).

Para viabilizar de forma eficaz essas operações, é indispensável a alocação de investimentos financeiros significativos. A fim de mensurar o esforço financeiro necessário para a recuperação de metais estratégicos por meio do sistema de Logística Reversa de REEE, foram aplicadas ferramentas de orçamento empresarial em diferentes camadas do sistema, em diferentes empresas. Essa abordagem permite uma análise macroeconômica abrangente da operação, possibilitando a comparação entre os custos envolvidos na aquisição de metais em sua forma virgem e aqueles relacionados à obtenção de metais reciclados a partir de REEE (SILVA *et al.*, 2023). Nesse estudo, apenas as despesas serão abordadas. Para que essa comparação ocorra, outras ferramentas de gestão empresarial necessitam ser aplicadas como o Preço de Venda e a Previsão de Vendas.

5.1 Orçamento de Produção

No Orçamento de Produção são registrados os desprendimentos envolvendo as atividades necessárias para atendimento das metas e projeções de fatia de mercado que a empresa planeja atender no período projetado (FERNANDES, 2022). Em uma empresa de prestação de serviços, que é o caso das empresas desse estudo, orçamento de produção é medido pelas despesas envolvendo mão de obra e ferramentas necessárias, dividido pelo tempo gasto no processo inteiro. Existem dois tipos de despesas, classificadas como indiretas e diretas, segundo Zdanowicz (1998):

- Indiretas: custos de deslocamentos, custo de alimentação; maquinários e ferramentas utilizadas;
- Direta: valores da mão de obra, benefícios, aluguel ou imobilizado.

5.2 Orçamento de Despesas Departamentais

No Orçamento de Despesas Departamentais são enumeradas aquelas para gerir a empresa. Valores de mão de obra (não diretamente ligada à operação principal, por exemplo, auxiliar administrativo e contador), softwares de gestão, despesas de fornecimento de água e energia e outras que não estão diretamente ligadas à operação, mas que são necessárias para a existência da empresa (HOJI, 2009; WELSCH, 1983).

A elaboração do Orçamento e Despesas Departamentais exige um olhar sistemático da operação e desenvolvimento de uma peça orçamentária para cada setor da empresa, abrangendo as necessidades indiretas da empresa para executar sua atividade principal. Cada setor, de acordo com a operação executada, consome uma parte diferente de diversas despesas indiretas necessárias para realizar suas responsabilidades no objetivo geral da empresa. (FLORES; LEAL, 2018).

6. Avaliação orçamentária do sistema de logística reversa de REEE

Para a análise foram utilizados dados oriundos de operação de ponto de coleta, nesse caso a primeira etapa (Empresa 1), que conta com um sistema de remuneração ao consumidor, a fim de recompensar a atitude que promove a Economia Circular. No espaço de recebimento, um



SEMINÁRIO INTERNACIONAL DE RESÍDUOS DE EQUIPAMENTOS ELETROELETRÔNICOS
14 a 16 de outubro de 2025

atendente treinado recebe os EEE de fim de vida útil, classifica-os e registra a entrada conforme classificação e massa dos equipamentos, assim caracterizando a primeira etapa do SLR de REEE.

Na segunda etapa (Empresa 2), foi realizada a análise de um modelo de operacionalização da descaracterização não destrutiva REEE, que permite a separação de carcaças, fios, motores, Resíduos de Placas de Circuito Impresso (RPCI) e demais componentes dos REEE, sem comprometer a integridade de suas partes. Esse procedimento visa agrupar esses componentes de forma a maximizar sua valorização e potencial de monetização. A empresa também realiza o transporte próprio dos resíduos coletados em diversos pontos de coleta, incluindo empresas e indústrias.

Por fim, foram levantados os dados oriundos da terceira etapa (Empresa 3) que realiza a compra dos RPCI em diversos gerenciadores de REEE. Essa empresa consolida *feedstock* dos materiais formando lotes passíveis à industrialização e à reinserção na cadeia produtiva como matéria-prima reciclada.

6.1 Pontos de coleta (Empresa 1)

Para a operação de ponto de coleta, o orçamento desenvolvido demonstrado na Figura 1 abrange os desprendimentos financeiros de acordo com a estratégia de captação de resíduos a fim de aumentar as taxas de coletas formais atingidas pelo SLR. Considera-se nesses custos um sistema digital para coleta de informação, remuneração do usuário de acordo com a massa descartada de REEE e estrutura montada em ponto com grande fluxo de circulação de pessoas. Visto que a atividade principal da fase de ponto de coleta é a arrecadação de EEE em fim de vida útil, esses negócios têm como principal desafio a informação e motivação dos proprietários de EEE ou acumuladores desses materiais para com o descarte ambientalmente correto. Dessa forma, considera-se que as despesas com agência e produtos de marketing foram incluídas no orçamento de produção, pois estando diretamente ligadas aos resultados de arrecadação pelos pontos de coleta. Também foram incluídas no orçamento de produção as despesas com um colaborador, aquisição de equipamentos para a atividade como *notebook* e balança, e despesas com licenciamento ambiental. O orçamento de operação no caso das empresas estudadas foi desenvolvido por unidade de recebimento. Algumas despesas que são diluídas entre as unidades aparecem no orçamento de produção com valor respectivo ao valor total dividido pelo número de unidades ativas.

	Orçamento produção											
	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Maio	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro
Aquisição Balança	R\$ 1.000,00	R\$ 1.000,00	R\$ 1.000,00	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -
Aquisição Notebook	R\$ 1.166,67	R\$ 1.166,67	R\$ 1.166,67	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -
Despesa mão de obra	R\$ 2.666,67	R\$ 2.666,67	R\$ 2.666,67	R\$ 2.666,67	R\$ 2.666,67	R\$ 2.666,67	R\$ 2.666,67	R\$ 2.666,67	R\$ 2.666,67	R\$ 2.666,67	R\$ 2.666,67	R\$ 2.666,67
Despesa tributos mão de obra	R\$ 2.760,00	R\$ 2.760,00	R\$ 2.760,00	R\$ 2.760,00	R\$ 2.760,00	R\$ 2.760,00	R\$ 2.760,00	R\$ 2.760,00	R\$ 2.760,00	R\$ 2.760,00	R\$ 2.760,00	R\$ 2.760,00
Aquisição Sistema/App	R\$ 2.000,00	R\$ 2.000,00	R\$ 2.000,00	R\$ 2.000,00								
Despesa Sistema/App manutenção	R\$ 700,00	R\$ 700,00	R\$ 700,00	R\$ 700,00	R\$ 700,00	R\$ 700,00	R\$ 700,00	R\$ 700,00	R\$ 700,00	R\$ 700,00	R\$ 700,00	R\$ 700,00
Custo Marketing	R\$ 365,00	R\$ 365,00	R\$ 365,00	R\$ 365,00	R\$ 365,00	R\$ 365,00	R\$ 365,00	R\$ 365,00	R\$ 365,00	R\$ 365,00	R\$ 365,00	R\$ 365,00
Despesa aluguel	R\$ 2.500,00	R\$ 2.500,00	R\$ 2.500,00	R\$ 2.500,00	R\$ 2.500,00	R\$ 2.500,00	R\$ 2.500,00	R\$ 2.500,00	R\$ 2.500,00	R\$ 2.500,00	R\$ 2.500,00	R\$ 2.500,00
Aquisição container	R\$ 16.000,00	R\$ 16.000,00	R\$ 16.000,00	R\$ 16.000,00	R\$ 16.000,00							
Custo Licenciamento	R\$ 1.200,00	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -
Aquisição equipamentos eletrônicos depreciados	R\$ 600,00	R\$ 600,00	R\$ 600,00	R\$ 600,00	R\$ 600,00	R\$ 600,00	R\$ 600,00	R\$ 600,00	R\$ 600,00	R\$ 600,00	R\$ 600,00	R\$ 600,00
Total	R\$ 30.958,34	R\$ 29.758,34	R\$ 29.758,34	R\$ 27.591,67	R\$ 25.591,67	R\$ 9.591,67	R\$ 9.591,67	R\$ 9.591,67	R\$ 9.591,67	R\$ 9.591,67	R\$ 9.591,67	R\$ 9.591,67



Figura 1 – Orçamento de produção ponto de coleta

Fonte: Autores

Considerando despesas indiretas à operação, mas de obrigação das empresas entrevistadas pelo estudo, foi desenvolvido o Orçamento de Despesas Departamentais ilustrado na Figura 2. O memo conta com um pequeno valor de aluguel, em que apenas é considerado o escritório administrativo da operação, pois as despesas desprendidas com aluguel do espaço onde fica os pontos de recebimento foram considerados no orçamento de produção, local é considerado estratégico para a operação da empresa. Outras despesas, como consumo de água e energia elétrica, foram consideradas. Os lançamentos referentes à contabilidade e auxílio jurídico também foram registrados. Desses custos, foi considerado um percentual correspondente para Administrativo e para Operação.

	Despesas departamentais				
	Total mensal		Administrativo		Operação
Despesa com aluguel	R\$ 800,00	100%	R\$ 800,00	0%	R\$ -
Contador	R\$ 1.000,00	80%	R\$ 800,00	20%	R\$ 200,00
Advogado	R\$ 300,00	80%	R\$ 240,00	20%	R\$ 60,00
Luz	R\$ 500,00	100%	R\$ 500,00	0%	R\$ -
Água	R\$ 60,00	100%	R\$ 60,00	0%	R\$ -
Internet/telefonia	R\$ 250,00	50%	R\$ 125,00	50%	R\$ 125,00
Mobiliária	R\$ 100,00	20%	R\$ 20,00	80%	R\$ 80,00
Estrutura administrativa	R\$ 450,00	50%	R\$ 225,00	50%	R\$ 225,00
TI	R\$ 100,00	50%	R\$ 50,00	50%	R\$ 50,00
			R\$ 2.820,00		R\$ 740,00

Figura 2 – Orçamento de despesas departamentais ponto de coleta

Fonte: Autores

6.2 Gerenciadores de REEE

O orçamento de produção da empresa responsável pela segunda etapa do sistema de logística reversa de REEE (Empresa 2), que operacionalizam a coleta e aquisição de REEE em pontos de coleta, empresas e indústrias está descrito na Figura 3. Ao acumularem o REEE, realizam a segregação e descaracterização a fim de viabilizar a comercialização de recicláveis oriundos desta operação. As empresas utilizam parafusadeiras elétricas e ferramentas manuais na metodologia de descaracterização não destrutiva, com o objetivo de maximizar a valorização dos resíduos destinados ao gerenciamento, seja por meio da comercialização de peças e equipamentos remanufaturados, seja pela venda de RPCI e outros elementos. As coletas são realizadas com veículo próprio, devidamente licenciado para o transporte de Resíduos de Classe I, e conduzidas por um motorista acompanhado de um ajudante de carga.

Devido à manipulação dos resíduos, que são transformados em materiais recicláveis, as exigências das licenças ambientais e de segurança do trabalho tornam-se mais rigorosas, demandando infraestruturas específicas, como sinalização de saídas de emergência, extintores de incêndio, entre outros requisitos, o que acarreta mais despesas associadas. Além do motorista e do ajudante, a empresa conta com um colaborador responsável pela descaracterização dos resíduos e outro colaborador, remunerado por comissão com base na produtividade, encarregado da organização, acondicionamento e descaracterização. Todos os funcionários são contratados



SEMINÁRIO INTERNACIONAL DE RESÍDUOS DE EQUIPAMENTOS ELETROELETRÔNICOS
14 a 16 de outubro de 2025

sob o regime da Consolidação das Leis do Trabalho (CLT). Para o cálculo do imposto, as empresas estudadas estão sob regime tributário Simples Nacional variando a alíquota de acordo com a receita bruta registrada pela empresa.

	Orçamento produção											
	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Maio	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro
Ferramentas manuais:	R\$ 2.300,00	R\$ 300,00	R\$ 100,00	R\$ 100,00	R\$ 100,00	R\$ 100,00	R\$ 100,00	R\$ 100,00	R\$ 100,00	R\$ 100,00	R\$ 100,00	R\$ 100,00
Ferramentas elétricas:	R\$ 7.300,00	R\$ 450,00	R\$ 450,00	R\$ 450,00	R\$ 450,00	R\$ 3.000,00	R\$ 450,00	R\$ 450,00	R\$ 450,00	R\$ 450,00	R\$ 450,00	R\$ 450,00
Despesa mão de obra:	R\$ 11.200,00	R\$ 11.200,00	R\$ 11.200,00	R\$ 11.200,00	R\$ 11.200,00	R\$ 11.200,00	R\$ 11.200,00	R\$ 11.200,00	R\$ 11.200,00	R\$ 11.200,00	R\$ 11.200,00	R\$ 11.200,00
Despesa com tributos mão de obra:	R\$ 12.300,00	R\$ 12.300,00	R\$ 12.300,00	R\$ 12.300,00	R\$ 12.300,00	R\$ 12.300,00	R\$ 12.300,00	R\$ 12.300,00	R\$ 12.300,00	R\$ 12.300,00	R\$ 12.300,00	R\$ 12.300,00
Custo com licenciamento:	R\$ 4.950,00											
Aquisição de veic.	R\$ 120.000,00	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -
Aquisição empilhadeira	R\$ 80.000,00	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -
Manutenção corretiva	R\$ -	R\$ -	R\$ 2.000,00	R\$ -	R\$ -	R\$ 2.000,00	R\$ -	R\$ -	R\$ 2.000,00	R\$ -	R\$ -	R\$ 2.000,00
Manutenções preventivas	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ 10.000,00	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ 10.000,00
Despesa combustível	R\$ 500,00	R\$ 500,00	R\$ 500,00	R\$ 500,00	R\$ 500,00	R\$ 500,00	R\$ 500,00	R\$ 500,00	R\$ 500,00	R\$ 500,00	R\$ 500,00	R\$ 500,00
Aquisição de resíduos	R\$ 2.000,00	R\$ 2.000,00	R\$ 2.000,00	R\$ 2.000,00	R\$ 2.000,00	R\$ 2.000,00	R\$ 2.000,00	R\$ 2.000,00	R\$ 2.000,00	R\$ 2.000,00	R\$ 2.000,00	R\$ 2.000,00
Total	R\$ 240.550,00	R\$ 26.750,00	R\$ 28.550,00	R\$ 26.550,00	R\$ 26.550,00	R\$ 41.100,00	R\$ 26.550,00	R\$ 26.550,00	R\$ 28.550,00	R\$ 26.550,00	R\$ 26.550,00	R\$ 38.550,00

Figura 3 – Orçamento de produção gerenciadores formais

Fonte: Autores

As despesas departamentais da segunda etapa do sistema de logística reversa são descritas na Figura 4, com os departamentos administrativo e de operação com maior volume de desprendimentos, destacando os lançamentos com contabilidade e advocacia no setor administrativo e o lançamento de despesas com aluguel no setor de operação.

	Despesas departamentais									
	Total mensal	Comercial	Logística	Administrativo	Operação					
Aluguel	R\$ 3.500,00	0%	R\$ -	20%	R\$ 700,00	10%	R\$ 350,00	70%	R\$ 2.450,00	
Contador	R\$ 1.500,00	0%	R\$ -	0%	R\$ -	100%	R\$ 1.500,00	0%	R\$ -	
Advogado	R\$ 300,00	0%	R\$ -	0%	R\$ -	100%	R\$ 300,00	0%	R\$ -	
Luz	R\$ 500,00	10%	R\$ 50,00	10%	R\$ 50,00	50%	R\$ 250,00	30%	R\$ 150,00	
Água	R\$ 200,00	25%	R\$ 50,00	25%	R\$ 50,00	25%	R\$ 50,00	25%	R\$ 50,00	
Internet/telefonia	R\$ 150,00	30%	R\$ 45,00	30%	R\$ 45,00	40%	R\$ 60,00	0%	R\$ -	
Mobiliária	R\$ 300,00	10%	R\$ 30,00	10%	R\$ 30,00	20%	R\$ 60,00	60%	R\$ 180,00	
Estrutura administrativa	R\$ 450,00	10%	R\$ 45,00	10%	R\$ 45,00	80%	R\$ 360,00	0%	R\$ -	
TI	R\$ 150,00	20%	R\$ 30,00	10%	R\$ 15,00	70%	R\$ 105,00	0%	R\$ -	
			R\$ 250,00		R\$ 935,00		R\$ 3.035,00		R\$ 2.830,00	

Figura 4 - Orçamento de despesas departamentais gerenciadores formais

Fonte: Autores

6.3 Formadores de *feedstock*

A terceira etapa (Empresa 3) abrange a aquisição dos RPCI para formação de lote economicamente viável para recuperação de metais nobres através do comércio de *feedstock* com indústrias de transformação. Buscando esse objetivo, a empresa estudada nessa etapa do sistema de logística reversa conta com equipe de separação de RPCI, equipe comercial e logística licenciada para aquisição de RPCI em gerenciadores de REEE, e também com um coordenador da operação.

Listada no orçamento de produção descrito na Figura 5, há a aquisição de dois veículos, um para utilização da equipe comercial e outro, com licenciamento, para a realização de coletas de material. Além dos veículos está a aquisição de empilhadeira elétrica para movimentação de cargas dentro do estoque e despesas com manutenções e gastos com combustíveis. O espaço físico destinado às instalações da operação da terceira etapa do SLR é licenciado e conta com



SEMINÁRIO INTERNACIONAL DE RESÍDUOS DE EQUIPAMENTOS ELETROELETRÔNICOS
14 a 16 de outubro de 2025

uma área significativamente maior que a área do gerenciadores de REEE, culminando em custos ainda maiores de licenciamento. Os valores desprendidos na aquisição de recicláveis tem um peso grande no orçamento de produção devido ao alto valor agregado aos RPCI por conterem metais nobres e se devem também à escassez dos RPCI disponíveis para compra.

Ao final do orçamento de produção do agente da terceira etapa, estão listados os custos de processamento dos resíduos que variam de acordo com a quantidade acumulada que vai de 5 a 10 toneladas e, por último, um incentivo por parte do governo brasileiro que restitui o Imposto de Industrialização (IPI) para evitar a bitributação, já que o IPI incidiu sobre os produtos quando foram fabricados.

	Orçamento produção											
	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Maio	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro
Despesa mão de obra:	R\$ 1.850,00	R\$ 1.850,00	R\$ 1.850,00	R\$ 1.850,00	R\$ 1.850,00	R\$ 1.850,00	R\$ 1.850,00	R\$ 1.850,00	R\$ 1.850,00	R\$ 1.850,00	R\$ 1.850,00	R\$ 1.850,00
Despesa mão de obra:	R\$ 2.005,00	R\$ 2.005,00	R\$ 2.005,00	R\$ 2.005,00	R\$ 2.005,00	R\$ 2.005,00	R\$ 2.005,00	R\$ 2.005,00	R\$ 2.005,00	R\$ 2.005,00	R\$ 2.005,00	R\$ 2.005,00
Despesa mão de obra:	R\$ 2.235,00	R\$ 2.235,00	R\$ 2.235,00	R\$ 2.235,00	R\$ 2.235,00	R\$ 2.235,00	R\$ 2.235,00	R\$ 2.235,00	R\$ 2.235,00	R\$ 2.235,00	R\$ 2.235,00	R\$ 2.235,00
Despesa mão de obra:	R\$ 3.500,00	R\$ 3.500,00	R\$ 3.500,00	R\$ 3.500,00	R\$ 3.500,00	R\$ 3.500,00	R\$ 3.500,00	R\$ 3.500,00	R\$ 3.500,00	R\$ 3.500,00	R\$ 3.500,00	R\$ 3.500,00
Despesa mão de obra:	R\$ 2.000,00	R\$ 2.000,00	R\$ 2.000,00	R\$ 2.000,00	R\$ 2.000,00	R\$ 2.000,00	R\$ 2.000,00	R\$ 2.000,00	R\$ 2.000,00	R\$ 2.000,00	R\$ 2.000,00	R\$ 2.000,00
Despesa mão de obra:	R\$ 3.500,00	R\$ 3.500,00	R\$ 3.500,00	R\$ 3.500,00	R\$ 3.500,00	R\$ 3.500,00	R\$ 3.500,00	R\$ 3.500,00	R\$ 3.500,00	R\$ 3.500,00	R\$ 3.500,00	R\$ 3.500,00
Despesa mão de obra:	R\$ 2.500,00	R\$ 2.500,00	R\$ 2.500,00	R\$ 2.500,00	R\$ 2.500,00	R\$ 2.500,00	R\$ 2.500,00	R\$ 2.500,00	R\$ 2.500,00	R\$ 2.500,00	R\$ 2.500,00	R\$ 2.500,00
Despesa com tributos mão de obra:	R\$ 20.917,00	R\$ 20.917,00	R\$ 20.917,00	R\$ 20.917,00	R\$ 20.917,00	R\$ 20.917,00	R\$ 20.917,00	R\$ 20.917,00	R\$ 20.917,00	R\$ 20.917,00	R\$ 20.917,00	R\$ 20.917,00
Estrutura de acondicionamento	R\$ 1.500,00	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ 1.500,00	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ 1.500,00	R\$ -	R\$ -	R\$ -
Aquisição de veic.	R\$ 240.000,00	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -
Aquisição empilhadeira	R\$ 80.000,00	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -
Manutenção corretiva	R\$ -	R\$ -	R\$ 3.000,00	R\$ -	R\$ -	R\$ 3.000,00	R\$ -	R\$ -	R\$ 3.000,00	R\$ -	R\$ -	R\$ 3.000,00
Manutenções preventivas	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ 20.000,00	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ 20.000,00
Despesa combustível	R\$ 1.000,00	R\$ 1.000,00	R\$ 1.000,00	R\$ 1.000,00	R\$ 1.000,00	R\$ 1.000,00	R\$ 1.000,00	R\$ 1.000,00	R\$ 1.300,00	R\$ 1.300,00	R\$ 1.300,00	R\$ 1.300,00
Aquisição recicláveis	R\$ 16.666,67	R\$ 16.666,67	R\$ 16.666,67	R\$ 16.666,67	R\$ 16.666,67	R\$ 16.666,67	R\$ 16.666,67	R\$ 16.666,67	R\$ 25.000,00	R\$ 25.000,00	R\$ 25.000,00	R\$ 22.222,22
Despesas com licenciamento:	R\$ 4.950,00											
Custos de processamento												
IPI	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -						R\$ 70.549,00
Total	R\$ 382.623,67	R\$ 56.173,67	R\$ 59.173,67	R\$ 56.173,67	R\$ 57.673,67	R\$ 79.173,67	R\$ 56.173,67	R\$ 56.173,67	R\$ 69.307,00	R\$ 64.807,00	R\$ 64.807,00	R\$ 113.744,22

Figura 5 – Orçamento de Produção formador de *feedstock*

Fonte: Autores

Assim como na segunda etapa do sistema de logística reversa, o orçamento de despesas departamentais da empresa estudada referente à terceira etapa do sistema possui alto desprendimento financeiro nos setores de operação e administrativo com destaque também para as contas de aluguel e contador. Com a operação relativamente maior em número de colaboradores e em espaço físico, essas duas contas também possuem acréscimo, conforme descrito na Figura 6.

	Despesas departamentais								
	Total mensal		Comercial		Logística		Administrativo		Operação
Aluguel	R\$ 6.000,00	0%	R\$ -	20%	R\$ 1.200,00	10%	R\$ 600,00	70%	R\$ 4.200,00
Contador	R\$ 2.500,00	0%	R\$ -		R\$ -	100%	R\$ 2.500,00		R\$ -
Advogado	R\$ 450,00	0%	R\$ -		R\$ -	100%	R\$ 450,00		R\$ -
Luz	R\$ 90,00	10%	R\$ 9,00	10%	R\$ 9,00	50%	R\$ 45,00	30%	R\$ 27,00
Água	R\$ 60,00	25%	R\$ 15,00	25%	R\$ 15,00	25%	R\$ 15,00	25%	R\$ 15,00
Internet/telefonia	R\$ 200,00	30%	R\$ 60,00	30%	R\$ 60,00	40%	R\$ 80,00	0%	R\$ -
Mobília	R\$ 600,00	10%	R\$ 60,00	10%	R\$ 60,00	30%	R\$ 180,00	50%	R\$ 300,00
Estrutura administrativa	R\$ 450,00	30%	R\$ 135,00	30%	R\$ 135,00	40%	R\$ 180,00	0%	R\$ -
TI	R\$ 200,00	20%	R\$ 40,00	20%	R\$ 40,00	60%	R\$ 120,00	0%	R\$ -
			R\$ 319,00		R\$ 1.519,00		R\$ 4.170,00		R\$ 4.542,00

Figura 6 – Orçamento de despesas departamentais formadores de *feedstock*



Fonte: Autores

7. Conclusão

Este estudo demonstrou que a aplicação do Orçamento Empresarial é uma ferramenta importante para viabilizar economicamente a cadeia de logística reversa de Resíduos de Equipamentos Eletroeletrônicos (REEE), contribuindo para a operacionalizar a economia circular no setor. A partir da análise orçamentária de três etapas distintas — pontos de coleta, gerenciadores de resíduos e formadores de *feedstock* — foi possível mapear os principais desprendimentos financeiros associados às atividades necessárias para transformar resíduos em matéria-prima estratégica de segunda geração.

Os resultados apontam que, embora existam desafios financeiros e operacionais significativos, a estruturação orçamentária permite uma visão mais clara e estratégica dos custos envolvidos, possibilitando tomadas de decisão mais assertivas, especialmente por parte de cooperativas e pequenas empresas. O reconhecimento e valorização dessas iniciativas são cruciais para o fortalecimento da cadeia já existente, que atua de forma prática na mitigação dos impactos ambientais e na recuperação de materiais críticos para a indústria. Portanto, iniciativas como esta, que articulam gestão financeira, logística reversa de REEE e sustentabilidade, representam um passo relevante rumo à construção de uma cadeia produtiva mais estratégica, considerando os desafios empresariais que as organizações precisam gerir para terem saúde financeira e geração de lucro.

Nesse sentido, o estudo sugere a necessidade de políticas públicas e incentivos que ampliem a capacidade operacional do setor e favoreçam a consolidação de uma economia circular mais eficiente e integrada, que favoreça e operacionalize a mineração urbana. Estudos futuros podem considerar a inclusão de projeções de receita e análises de viabilidade econômica com base em cenários de mercado, a fim de complementar a visão proposta nesta avaliação orçamentária.

Referências

- ABREE - Associação Brasileira de Reciclagem de Eletroeletrônicos e Eletrodomésticos. Relatório Anual de Desempenho do Sistema de Logística Reversa (SLR) de Eletroeletrônicos e seus Componentes de Uso Doméstico.** Ano-referência 2022. Disponível em: https://portal-api.sinir.gov.br/wp-content/uploads/2024/04/RELATORIO_ANUAL_DE_DESEMPENHO_2022_-_ABREE.pdf. Acesso em: 23 abril. 2024.
- ARAUJO, R.A.; OTONNI, M.; XAVIER, L.H. **Spatial distribution analysis of e-waste Voluntary Delivery Points (VDP) by Green Eletron manager in São Paulo city (SP, Brazil).** [S. l.: s. n.], 2020. Trabalho apresentado no Symposium on Urban Mining and Circular Economy, 5th, 2020, Venice, Italy.
- COGULA, J.; SANTOS, L.A.; ARAUJO, R. A.; OTONNI, M. **E-waste hotspots and best routes analysis for reverse logistics in the city of São Paulo, Brazil.** In Symposium on Urban Mining and Circular Economy, 5th, 2020, Venice, Italy.
- DOU, S.; XU, D.; ZHU, Y. KEENAN, R. Critical mineral sustainable supply: challenges and governance. **Futures**, v. 146, art. 103101, 2023. DOI:



- <https://doi.org/10.1016/j.futures.2023.103101>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0016328723000058>. Acesso em: 16 set. 2023.
- FLÔRES, C.; LEAL, R. Orçamento e controle orçamentário das despesas diretas e indiretas com pessoal em uma empresa varejista de calçados. **ConTexto**, Porto Alegre, v. 18, n. 39, p. 85-101, 2018. Disponível em: <https://seer.ufrgs.br/index.php/ConTexto/article/view/93854/pdf>. Acesso em: 11 nov. 2022.
- GANDE, V. V.; VATS, S.; BHATT, N.; PUSHPAVNAM, S. *et al.* Sequential recovery of metals from waste printed circuit boards using a zero-discharge hydrometallurgical process. **Cleaner Engineering and Technology**, Oxford, v. 4, art. 100143, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.clet.2021.100143>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666790821001038>. Acesso em: 05 out. 2023.
- HOJI, M. **Administração financeira e orçamentária**. São Paulo: Atlas, 2009.
- ISLAM, T.; HUDA, N. Reverse logistics and closed-loop supply chain of Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE)/E-waste: a comprehensive literature review. **Resources, Conservation and Recycling**, Amsterdam, v. 137, p. 48-75, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.05.026>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921344918302015>. Acesso em: 05 out. 2023.
- KASTANAKI, E.; GIANNIS, A. Forecasting quantities of critical raw materials in obsolete feature and smart phones in Greece: A path to circular economy. **Journal of Environmental Management**, [Oxford], v. 307, art. 114566, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.114566>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301479722001396>. Acesso em: 04 set. 2023.
- LÜDEKE-FREUND, F.; GOLD, S.; BOCKEN, N. M. P. A review and typology of circular economy business model patterns. **Journal of Industrial Ecology**, Cambridge, Mass., v. 23, n. 1, p. 36-61, 2019.
- MORALES-URRUTIA, D. **E-waste and circular economy: an approach to the Latin American case**. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON APPLIED INFORMATICS, 6th, 2023, Guayaquil, Ecuador. Proceedings [...]. Aachen, Germany: CEUR-WS, 2023. p. 75-87. Disponível em: https://ceur-ws.org/Vol-3520/icaiw_aiesd_4.pdf. Acesso em: 10 dez. 2023.
- PADOVEZE, C. L.; TARANTO, F.C. **Orçamento empresarial: novos conceitos e técnicas**. São Paulo: Pearson Universidades, 2009.
- PAN, X; WONG, C; LI, C. Circular economy practices in the waste electrical and electronic equipment (WEEE) industry: A systematic review and future research agendas. **Journal of Cleaner Production**, Oxford, v. 365, art. 132671, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132671>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652622022703>. Acesso em: 20 out. 2023.
- PESSANHA, L. P. M.; MORALES, G. Consumer behavior in the disposal of information technology equipment: characterization of the household flow. **Gestão e Produção**, São Carlos, SP, v. 27, n. 3, art. e4313, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1590/0104-530X4313-20>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/gp/a/zMkP7ZjM3npXB3R8F3P3hJP/?format=pdf&lang=en>. Acesso em: 05 maio 2022.



SANTOS, S.; OGUNSEITAN, O. E-waste management in Brazil: challenges and opportunities of a reverse logistics model. **Environmental Technology and Innovation**, [S. l.], v. 28, art. 102671, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eti.2022.102671>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352186422002085>? via%3Dihub. Acesso em: 18 abr. 2023.

SHARMA, H.; KUMAR, H.; MANGLA, S. K. Enablers to computer vision technology for sustainable E-waste management. **Journal of Cleaner Production**, Oxford, v. 412, art. 137396, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137396>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652623015548>. Acesso em:

SHITTU, O.; WILLIAMS, I.; SHAW, P. Global E-waste management: Can WEEE make a difference? A review of e-waste trends, legislation, contemporary issues and future challenges. **Journal of Waste Management**, New York, v. 120, n. 235, p. 549-563, 2021. DOI: 10.1016/j.wasman.2020.10.016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0956053X20305870?via%3Dihub>. Acesso em: 18 abr. 2023.

SILVA, T. D. P.; ROCHA, L.K.; OCANHA, K. D.; MORAES, C.A.M. **Gestão financeira e simbiose industrial na cadeia de logística reversa de resíduos de equipamentos eletroeletrônicos (REEE)**. In: ENCONTRO INTERNACIONAL SOBRE GESTÃO EMPRESARIAL E MEIO AMBIENTE (ENGEMA), 25., 2023, São Paulo. **Anais [...]**. São Paulo: USP, 2023. Disponível em: https://engemausp.submissao.com.br/25/anais/download.php?cod_trabalho=686. Acesso em: 01 dez. 2023.

VAKILCHAP, F.; MOUSAVI, S. M. Structural study and metal speciation assessments of waste PCBs and environmental implications: outlooks for choosing efficient recycling routes. **Waste Management**, New York, v. 151, p. 181-194, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2022.07.036>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0956053X22003890>. Acesso em: 03 ago. 2023.

WÄGER, P. Scarce metals: applications, supply risks and need for action. **Notizie di Politeia**, [S. l.], v. 27, n. 104, p. 57-66, 2011. Disponível em: https://publicationslist.org/data/patrick.waeger/ref-55/2011%20W%C3%A4ger_2012_Politeia.pdf. Acesso em: 05 maio 2022.

WELSCH, G. A. **Orçamento empresarial**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 1983.

ZDANOWICZ, J. E. **Planejamento financeiro e orçamento**. 2. ed. Porto Alegre: Sagra Luzzatto, 1998.



CIGARROS ELETRÔNICOS: IMPACTOS NO AMBIENTE E DESAFIOS PARA SUA DESTINAÇÃO FINAL

Autores: MOREIRA, J.C.¹; SISINNO, C.L.S.²; SILVA, A.L.O.^{3*}

¹ Instituto de Estudos de Saúde Coletiva (IESC) – UFRJ

² Centro de Tecnologia Mineral (CETEM) – Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI)

³ Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA)

*andre.sp.ensp@gmail.com

Resumo: Nos últimos anos o mercado de cigarros eletrônicos tem crescido exponencialmente, atraindo milhares de consumidores por sua promessa de reduzir os danos do tabagismo convencional. Entretanto, estudos indicam que seu uso pode manter a dependência à nicotina e causar problemas de saúde, tais como efeitos respiratórios e vasculares. Além desses, outras importantes questões relacionadas ao uso dos cigarros eletrônicos dizem respeito aos seus impactos no ambiente e a sua destinação final. Estes dispositivos possuem composição complexa, incluindo baterias de íon lítio, componentes eletrônicos, cartuchos de líquido, plásticos, metais e outras substâncias potencialmente tóxicas. Várias substâncias químicas toxicologicamente significativas já foram identificadas nestes dispositivos, tanto em sua composição (principalmente na fase líquida), como no aerossol produzido. Sendo assim, realizou-se uma revisão bibliográfica sobre as principais substâncias encontradas nos cigarros eletrônicos, que após seu descarte serão considerados Resíduos de Equipamentos Eletroeletrônicos, além dos principais desafios que envolvem sua destinação final. Os resultados mostraram que diversos metais, nanopartículas e contaminantes emergentes, como os per- e polifluoroalquil (PFASs), já foram identificados nestes dispositivos e nos aerossóis produzidos por seu uso. Uma vez que as substâncias presentes e geradas por estes dispositivos contribuem para a contaminação ambiental, e principalmente porque estes dispositivos estão sendo descartados junto com os resíduos domésticos e em locais públicos muitas vezes de forma inadequada, o combate a seu comércio ilegal serve não apenas para a proteção da saúde humana, mas também do ambiente.

Palavras-chave: Cigarros eletrônicos, Resíduos de Equipamentos Eletroeletrônicos, Substâncias Tóxicas, Impactos no Ambiente, Destinação Final.



1. Introdução

Os dispositivos eletrônicos para fumar (DEFs) são equipamentos que visam mimetizar o ato de fumar. Os DEFs podem ser classificados conforme sua matriz: sólida, líquida ou híbrida (SILVA, 2024). Os cigarros eletrônicos, de matriz líquida, também conhecidos como vaporizadores, e-cigarettes ou vapes, têm alcançado grande popularidade entre os jovens, especialmente devido ao seu design atraente e ao mesmo tempo discreto, ao apelo tecnológico, às altas concentrações de sais de nicotina, aos sabores atrativos e ao marketing agressivo (SILVA; MOREIRA, 2019). Além disso, sua crescente popularidade pode ser parcialmente atribuída a informação ao público consumidor como sendo uma "alternativa mais saudável" e "eco-friendly", se comparada ao cigarro convencional (NGAMBO et al., 2023), e um instrumento para reduzir ou eliminar a nicotina (CONSTANTIN; MIHÁLTAN, 2025).

O uso de cigarros eletrônicos está em contínua ascensão. Estima-se que este mercado, avaliado em mais de US\$ 22 bilhões, resultante da venda de 844 milhões de vapes em 2022, deve crescer 31% ao ano até 2030 (BALDÉ et al., 2024).

No Brasil, apesar de sua comercialização estar proibida desde 2009, sendo reiterada em 2024 por meio da Resolução da Diretoria Colegiada (RDC) nº 855/2024 (BRASIL, 2024) da Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA), não é incomum a venda destes produtos on line e mesmo em grandes lojas de departamento, mesmo com as ações e multas impostas (SILVA; MOREIRA, 2019).

Apesar de muitas pessoas os utilizarem como alternativa ao cigarro convencional, acreditando serem menos prejudiciais, os cigarros eletrônicos ainda apresentam riscos significativos para a saúde humana. Embora estes dispositivos emitam um menor número de certas substâncias tóxicas quando comparados com o cigarro comum, a presença de compostos orgânicos voláteis (VOCs) e de metais potencialmente tóxicos no aerossol podem produzir doenças que vão desde problemas respiratórios, vasculares e cardiovasculares, a câncer (BONNER et al., 2021; GLANTZ; NGUYEN; SILVA, 2024; KRÜSEMANN et al., 2021; MARQUES et al., 2021).

Além disso, poucos estudos têm sido realizados com relação ao seu impacto no ambiente (NGAMBO et al., 2023), durante as etapas de produção, uso e posteriormente na sua destinação final como Resíduos de Equipamentos Eletroeletrônicos (REEE).

O funcionamento dos cigarros eletrônicos mostra um padrão comum entre as marcas, entretanto, sua composição indica algumas variações, incluindo diferentes substâncias químicas (TURNER et al., 2024). A caracterização e a quantificação dos materiais e substâncias usados nestes dispositivos é importante para a avaliação dos seus impactos na saúde e no ambiente (TURNER et al., 2024).

O impacto dos cigarros eletrônicos inclui uma série de consequências para o meio ambiente, durante todas as etapas do seu ciclo de vida. Alguns cigarros eletrônicos são reutilizáveis, o que significa que baterias, cápsulas e atomizadores podem ser repostos; enquanto outros são descartáveis, sendo utilizados apenas uma vez (NGAMBO et al., 2023). Os cigarros eletrônicos descartáveis estão se tornando cada vez mais populares devido ao seu baixo custo e isenção de restrições de sabor (BEUTEL et al., 2021). Isto indica uma preocupação crescente



com o gerenciamento deste tipo de REEE, uma vez que eles são consumidos e descartados muito mais rápido do que outros equipamentos eletrônicos típicos (NGAMBO et al., 2023).

Uma vez que poucos estudos abordam as questões sobre o impacto no ambiente e os desafios para a destinação final dos cigarros eletrônicos, o objetivo deste trabalho foi descrever as principais substâncias químicas que podem ser originadas destes dispositivos e os possíveis impactos ambientais de sua destinação final, principalmente porque estes dispositivos estão sendo descartados junto com os resíduos domésticos e de locais públicos, muitas vezes de forma inadequada.

2. Metodologia

Para a elaboração deste artigo foi realizada uma revisão da literatura com o levantamento bibliográfico de artigos publicados em periódicos nacionais e internacionais disponíveis no Google Scholar e no Portal de Periódicos da CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior).

As palavras-chave empregadas incluíram os termos em inglês, sendo utilizados os seguintes termos de busca: “electronic cigarettes” OR “vapes” OR “e-cigarettes” AND “toxic substances” OR “environmental health” OR “environmental impact” AND “recycling” AND “disposal”.

A busca foi limitada aos artigos publicados no período de 2015 a 2025. Além disso, as referências dos artigos selecionados foram revisadas para identificar outros estudos relevantes. Foram excluídos os anais em congressos, livros e capítulos de livros. Os critérios de inclusão para a revisão da literatura foram baseados na relevância do estudo para o tema, com base nas informações disponibilizadas nos títulos, palavras-chave e resumos.

Os artigos publicados no período escolhido foram selecionados e analisados com relação ao conteúdo que abordasse informações referentes as substâncias encontradas nos cigarros eletrônicos, seus impactos no ambiente, principalmente devido a sua destinação inadequada como REEE, e os desafios para sua destinação final ou reciclagem.

3. Composição e funcionamento dos cigarros eletrônicos

3.1 Composição

Basicamente, os cigarros eletrônicos, são constituídos por um recipiente que contém nicotina dissolvida em um meio próprio (e-líquido), um filamento metálico que aquece o e-líquido até a formação de um aerossol contendo nicotina, um bocal através do qual este aerossol é aspirado e um elemento capaz de suprir a energia necessária ao filamento metálico para a formação do aerossol, normalmente uma bateria recarregável de lítio (MARQUES et al., 2021).

Em um estudo realizado com várias marcas de cigarros eletrônicos Turner et al. (2024) descrevem que os componentes básicos de todos eram muito semelhantes. Resumidamente, um invólucro cilíndrico ou retangular em forma de prisma de metal ou plástico com bocal integrado ou separado continha: uma bateria de íons de lítio selada; uma placa de circuito impresso (PCI) e fios elétricos; um ativador ou interruptor de fluxo (amplificador circular); um container ou pod para armazenar o e-líquido; um elemento de aquecimento metálico (bobina); um atomizador/tubo de ventilação, metálico ou plástico.



Os componentes adicionais que estavam presentes na maioria dos casos incluíam uma porta USB, vedações ou juntas de borracha, círculos de espuma autoadesiva, uma luva e/ou invólucro de pávio de plástico e fita plástica usada para manter os componentes internos juntos. Em alguns casos, embalagens internas de filme plástico ou pequenos parafusos ou pinos também estavam presentes (TURNER et al., 2024).

3.2 Funcionamento

A formação do aerossol ocorre de acordo com o seguinte mecanismo: quando o filamento metálico é aquecido, durante uma tragada, ele transfere calor para o e-líquido presente em sua imediata vizinhança, vaporizando-o. O vapor aquecido se afasta das imediações do filamento pelo movimento do ar aspirado e à medida que estes vapores aquecidos entram em contato com o ar frio eles se condensam, formando um aerossol semelhante à fumaça. O e-líquido fresco é transportado para as imediações do filamento e o ciclo continua. Devido às diferenças nas volatilidades das substâncias presentes no e-líquido, nas vizinhanças do filamento aquecido ele será enriquecido das espécies menos voláteis, fazendo com que a temperatura local aumente gradualmente até a temperatura de ebulição destas espécies. Assim, a composição do aerossol será alterada de enriquecida nas espécies mais voláteis para enriquecida nas espécies menos voláteis (TALIH et al., 2017).

A formação do aerossol – resultante do aquecimento do e-líquido a temperaturas mais baixas que o ponto de combustão dos constituintes do e-líquido –, ocorre em temperatura em torno de 200 °C - 250 °C. Equipamentos mais modernos permitem que esta temperatura seja escolhida pelo usuário (TALIH et al., 2017).

4. Substâncias Encontradas na Composição e no Aerossol dos Cigarros Eletrônicos

Os cigarros eletrônicos contêm uma variedade de substâncias químicas, presentes tanto no líquido eletrônico como nos componentes estruturais e funcionais do dispositivo. Deve-se destacar que estas substâncias variam entre fabricantes; que não é incomum que se desconheça a composição desses produtos, mesmo onde eles estão sob controle da fiscalização sanitária de seus países; e que muitas vezes a toxicidade potencial destas substâncias e de outros aditivos não regulamentados não é completamente compreendida (LERNER et al., 2015).

E mesmo se tratando de composição conhecida nos e-líquidos, como no caso de alguns dispositivos com formulações que prometem o aumento de disposição física, rejuvenescimento, relaxamento etc., a composição anunciada pelo fabricante muitas vezes não inclui a concentração das substâncias utilizadas (SILVA, 2024). Este fato também ressalta a questão dos possíveis impactos após sua liberação no ambiente. Em relação aos elementos químicos presentes, As, Cd, Cr, Ni, Cu e Pb foram identificados tanto nos e-líquidos quanto nos aerossóis (CONSTANTIN; MIHĂLTAN, 2025).

Os metais mais comumente detectados (Cd, Ni, Pb e Cr), que são encontrados em vários modelos e marcas de cigarros eletrônicos, estão ligados ao risco de carcinogenicidade em vários tecidos e órgãos (CONSTANTIN; MIHĂLTAN, 2025; GRANATA et al., 2024).

Dentre os elementos químicos potencialmente tóxicos encontrados nestes dispositivos, provenientes de aditivos, resíduos ou contaminação, estão As, Ba, Bi, Cr, Hg, Pb e Sb. A presença destes elementos nos vapores representa um risco de exposição para o usuário e para o



ambiente por lixiviação, após se tornarem resíduos e serem depositados em aterros (TURNER et al., 2024).

Além disso, deve-se destacar também a presença de outras substâncias (subprodutos), formadas a partir das substâncias originais, como ocorre nos aerossóis (KULHÁNEK; BAPTISTOVÁ, 2020).

4.1 Substâncias encontradas na composição dos cigarros eletrônicos

4.1.1 E-líquido

O e-líquido tem composição variável e além da nicotina, pode conter um número relativamente elevado de outras substâncias químicas (BONNER et al., 2021; KRÜSEMAN et al., 2021). Várias substâncias são adicionadas ao e-líquido para facilitar a formação do aerossol (fumaça) e torná-lo mais agradável ao paladar do consumidor. Atualmente acredita-se que mais de 15.000 substâncias orgânicas sejam utilizadas com esta finalidade (KULHÁNEK; BAPTISTOVÁ, 2020).

Dentre os constituintes básicos do e-líquido tem-se uma mistura de propilenoglicol (PG) e glicerol (ou glicerina vegetal, VG) que funcionam como carreadores e para manter a nicotina e os flavorizantes em suspensão. Estas duas substâncias estão presentes em proporções variáveis e representam entre 80 % - 94 % do volume do e-líquido (BONNER et al., 2021).

A nicotina ($PE = 247\text{ }^{\circ}\text{C}$), componente fundamental para a maior parte dos vapes, é um alcaloide com características básicas (pK_{as} 3,1 e 8,0) sendo que no e-líquido sua forma mais comum é a forma deprotonada, que embora seja mais agressiva para o organismo é mais biodisponível. No entanto, como a forma monoprotonada é menos agressiva, alguns fabricantes adicionam ácido benzoico, cítrico ou láctico ao e-líquido, o que leva a formação de sais desse alcaloide. Devido à menor biodisponibilidade dos sais de nicotina, os produtos que os contêm apresentam a concentração desse alcaloide no produto final mais elevada, chegando a valores superiores a 5 % (BONNER et al., 2021).

Dentre os flavorizantes, os mais comumente utilizados estão a vanilina, etil vanilina, cinamaldeído, álcool benzílico e mentol, embora a misturas de vários deles seja de uso comum. Durante a formação do aerossol, estas substâncias podem sofrer degradação térmica com formação de substâncias tóxicas como aldeídos (formaldeído e acetaldeído) e de benzeno (KULHÁNEK; BAPTISTOVÁ, 2020).

Uma pesquisa que analisou 50 marcas diferentes de e-líquidos detectou 113 substâncias químicas distintas. Outro estudo encontrou 22 compostos comuns ao e-líquido e aos aerossóis gerados, incluindo: acenaftileno, acetaldeído, antimônio, benzaldeído, benzeno, cromo, cobre, diacetil, formaldeído, glicerol, chumbo, limoneno, naftaleno, níquel, nicotina, nicotina-N'-óxidos, 4-(metilnitrosamino)-1-(3-piridil)-1butanona (NNK), N-Nitrosornicotina (NNN), PG, tolueno e VG (CONSTANTIN; MIHÁLTAN, 2025).

Dentre as substâncias químicas encontradas em e-líquidos, 35 foram consideradas como perigosas pela Agência de Proteção Ambiental dos EUA (EPA) e 42 consideradas prejudiciais ou potencialmente prejudiciais pela Food and Drug Administration (FDA) dos EUA, das quais 20 eram comuns para ambas instituições. No entanto, estudos realizados por Venugopal et al. (2024) sugerem 81 substâncias químicas que devem ser consideradas para futuras avaliações de

impacto ambiental e risco, incluindo compostos específicos do tabaco (p. ex. nicotina, N'-nitrosonornicotina), hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (PAHs) (p. ex. criseno), metais (p. ex. chumbo), ftalatos (p. ex. di[2-etilhexil]ftalato) e retardadores de chama (p. ex. tris[4-metilfenilfosfato]).

Substâncias de interesse emergente, como os per- e polifluoroalquil (PFASs) – denominados como “poluentes eternos” –, já foram identificadas no e-líquido (KUBICA et al., 2025). Estes contaminantes são amplamente reconhecidos por sua capacidade de persistência, bioacumulação e riscos potenciais, incluindo carcinogenicidade, desregulação endócrina e comprometimento do sistema imunológico (CONSTANTIN; MIHÁLTAN, 2025).

4.1.2 Sistema de aquecimento

O sistema de aquecimento é constituído por uma bobina e um filamento de uma liga metálica que geralmente contém Ag, As, Cu, Zn, Sn, Pb, Cd, Ni, Cr etc. e deve atingir uma temperatura capaz de volatilizar a nicotina (BONNER et al., 2021; GRANATA et al., 2024; OLMEDO et al., 2018).

Também foi observada a presença de Ni nos fios de resistência nas bobinas e de Pb nas ligas de tubos/atomizadores analisados no estudo de Turner et al. (2024).

Os ativadores são componentes mais complexos e, embora muitos possam ser construídos com a liga níquel-prata (Cu, Zn, Ni), uma variedade de outras ligas ou peças metálicas (p. ex. com base em Al, Bi, Sn e Ti) associadas a uma ampla gama de oligoelementos também são empregadas (TURNER et al., 2024).

Os pavios contêm uma ampla variedade de elementos químicos, que podem incluir metais e metalóides potencialmente tóxicos, como Cd, Hg, Pb e Sb (TURNER et al., 2024).

4.1.3 Sistema eletroeletrônico

No estudo de Turner et al. (2024) os metais comuns nas baterias de íons de lítio (que estavam envoltas por uma fina camada de laminado de alumínio, intercalado com camadas de polímeros) são Co, Fe e Ni, mas Au, Ba, Hg e Pb também foram detectados, enquanto metais adicionais nas placas de circuito impresso à base de cobre (elemento mais abundante devido a presença de camadas condutoras nas PCIs) incluíam Ag, Al, Ni, Sn, Ti e V, com traços de Ag, Bi, Mn, Nb e Pb presentes.

4.1.4 Estruturas e recipientes

Os componentes metálicos podem ser construídos em Al (geralmente com Ti), aço inoxidável ou ligas à base de Ni (principalmente nas bobinas), mas outros metais são frequentemente incorporados em ligas (p. ex. Bi, Pb, W) ou estão presentes em pequenas quantidades (incluindo Co e Nb). Os invólucros metálicos podem ser constituídos por Al (ou Al ligado a Ti) ou aço inoxidável, contendo traços de Cu, Mo, Nb, V, Zn e Zr. Invólucros de plástico muitas vezes são construídos em policarbonato e/ou polímeros de silicone, polidimetilsiloxane, com Ba, Cl, Ni, Ti e Zn detectados como contaminantes, resíduos ou componentes de aditivos orgânicos e inorgânicos (TURNER et al., 2024).

4.2 Substâncias encontradas no aerossol



É importante notar que o processo de vaporização pode gerar até 25 novas substâncias não encontradas originalmente no e-líquido (CONSTANTIN; MIHĂLTAN, 2025).

Durante a formação do aerossol, o aquecimento do e-líquido promove a decomposição térmica de algumas substâncias orgânicas, com a formação de substâncias tóxicas indesejáveis, tais como nitrosaminas específicas do tabaco, formaldeído – formado pela oxidação do glicerol e do propilenoglicol –, acetaldeído, acroleína – formada pela oxidação do glicerol –, glioxal, acetona, benzeno, propanal, metilglioxal, 2-metilbenzaldeído, dentre outros, bem como a lixiviação de metais presentes no filamento. Assim, o aerossol além de conter os produtos da decomposição térmica é contaminado por elementos químicos tais como As, Cr, Cd, Pb, Cu e Ni, provenientes do filamento ou presentes como impurezas no e-líquido. A aspiração do aerossol contaminado por estas substâncias e elementos químicos constitui uma fonte importante da contaminação humana (BONNER et al., 2021; GRANATA et al., 2024; OLMEDO et al., 2018).

Estudos identificaram partículas em escala nanométrica (6-26 nm) em aerossol de cigarros eletrônicos, que são de tamanho suficiente para infiltrar nos pulmões – particularmente nos alvéolos – e potencialmente facilitar a introdução de substâncias químicas perigosas na corrente sanguínea (PALMISANI et al., 2019).

5. Problemas de Saúde Ocasionados pelas Substâncias Presentes nos Cigarros Eletrônicos

Os cigarros eletrônicos têm sido amplamente estudados devido aos seus potenciais impactos na saúde, tanto em curto como em longo prazo. Embora muitas pessoas os utilizem como alternativa ao cigarro convencional, acreditando serem menos prejudiciais, estes dispositivos ainda apresentam riscos significativos para a saúde humana.

Um estudo dos riscos associados à exposição pelas vias respiratória, dérmica e oral de algumas substâncias orgânicas (formaldeído, acetaldeído, acroleína e acetona) e sete elementos químicos (As, Cd, Mn, Pb, Cu, Ni e Cr) encontrados no aerossol produzido pelos e-cigarros, sem considerar a possibilidade da existência de efeitos sinérgicos ou antagônicos resultantes da exposição múltipla, mostrou que altas doses de exposição produzem riscos acima do aceitável ($>1 \times 10^{-6}$). Dentre as substâncias estudadas o risco médio de câncer, superior ao limite aceitável foi $\text{Cr} > \text{formaldeído} > \text{Ni} > \text{acetaldeído} > \text{As}$. Para os riscos de doenças que não os cânceres, o maior coeficiente de perigo foi identificado para a acroleína (carcinógeno do grupo 2A do IARC, Agência Internacional de Pesquisa em Câncer) (ZHAO et al., 2023).

As partículas ultrafinas (nanopartículas) originadas do vapor podem irritar os pulmões, prejudicar a função pulmonar e piorar condições como a asma e a DPOC (Doença Pulmonar Obstrutiva Crônica). Elas também representam um risco cardiovascular maior, aumentando a pressão arterial, causando estresse oxidativo e elevando a probabilidade de doenças cardíacas (CONSTANTIN; MIHĂLTAN, 2025).

Além disso, agentes cancerígenos como PAHs podem contribuir para riscos à saúde em longo prazo (CONSTANTIN; MIHĂLTAN, 2025). Estudos em animais têm apontado que substâncias presentes nestes dispositivos também causam danos aos fetos, promovem metástase e poderiam estar associados a neoplasias pulmonares e renais (LEE et al., 2018; MILLS et al., 2024; PHAM et al., 2020; TANG et al., 2019).

6. Desafios para a Destinação Final dos Cigarros Eletrônicos e Impactos no Ambiente



Os equipamentos eletroeletrônicos são equipamentos, partes e peças cujo funcionamento adequado depende de correntes elétricas ou campos eletromagnéticos, bem como os equipamentos para geração, transmissão, transformação e medição dessas correntes e campos, podendo ser de uso doméstico, industrial, comercial e de serviços, e os REEE, por sua vez, são os equipamentos eletroeletrônicos, partes e peças que chegaram ao final da sua vida útil ou seu uso foi descontinuado (ABNT, 2013).

Segundo Baldé et al. (2024) estima-se que 14 bilhões de kg de REEE foram descartados indevidamente em todo o mundo em 2022 em lixeiras comuns, juntamente com outros resíduos domésticos, principalmente em países de renda alta e média-alta. Normalmente, itens menores de REEE, como pequenos dispositivos de TI e pequenos equipamentos são descartados junto com os outros resíduos, sendo tratados como resíduos domésticos comuns. Os principais destinos dos REEE são a reciclagem, frequentemente realizada de maneira informal, ou a destinação final no solo (BALDÉ et al., 2024), muitas vezes em áreas inadequadas (aterros controlados ou simples vazadouros de resíduos).

Os vapes são considerados REEE pois contêm baterias, um elemento de aquecimento e uma PCI. Com um peso médio de 50 g, isso equivale a mais de 42 milhões de kg de cigarros eletrônicos (incluindo o peso das baterias), muitos dos quais são descartáveis e se tornam rapidamente resíduos (dados de 2023 indicam que a maioria dos vapes descartáveis foram produzidos na China). Os cigarros eletrônicos produzidos em 2022 continham vários metais, incluindo cerca de 130 mil kg de lítio nas baterias (BALDÉ et al., 2024).

Um destaque adicional deve ser dado à possibilidade de explosão das baterias e início de fogo (NGAMBO et al., 2023). As baterias de íons de lítio são propensas a incêndios ou explosões se descartadas de maneira inadequada ou expostas a condições adversas, como altas temperaturas (TURNER et al., 2024), podendo provocar fogo em lixeiras, caminhões de lixo e unidades de processamento de resíduos (TRUTH INITIATIVE, 2023). Esses incidentes podem causar danos ao meio ambiente e aos trabalhadores.

A situação global sobre a destinação final dos cigarros eletrônicos varia dependendo do país e das políticas locais. Alguns países têm sistemas de coleta específicos para REEE, o que inclui cigarros eletrônicos, no entanto, as taxas de coleta são consideradas baixas e a infraestrutura de reciclagem limitada (BALDÉ et al., 2024). O destino dos cigarros eletrônicos, tanto no Brasil como no mundo, tem sido um grande desafio devido à complexidade destes dispositivos e à falta de regulamentações específicas. Muitos dos materiais empregados não são biodegradáveis e requerem tratamento especial para evitar impactos negativos no ambiente, começando pela desmontagem e separação dos componentes. Além disso, a combinação de elementos eletrônicos e químicos, e sua estrutura integrada e com pequena escala dificulta a separação adequada dos materiais para o tratamento ou reciclagem apropriados (TRUTH INITIATIVE, 2023).

No Brasil, apesar da implantação dos sistemas de logística reversa para eletroeletrônicos, existe a dificuldade adicional da ilegalidade dos cigarros eletrônicos, impedindo o envolvimento dos fabricantes no processo de gerenciamento adequado destes REEE.

Seguindo os mesmos padrões da recuperação de componentes dos REEE, sucateiros ou cooperativas de reciclagem tentam reaproveitar componentes metálicos, como baterias, mas o processo costuma ser informal, de forma manual e com baixa eficiência. Nas unidades de reciclagem informal os REEE acabam sendo triturados, causando contaminação do ar, ou são



liberados com o auxílio de líquidos extratores, podendo contaminar o solo e as fontes de água (FORTI et al., 2020).

A destinação em vazadouros e aterros controlados de forma inadequada dos vapores contamina o solo, as possíveis fontes de água superficial e subterrânea encontradas na área de disposição, além do ar, pela liberação de partículas produzidas pelas atividades operacionais.

Os contaminantes presentes na composição das peças destes dispositivos (e em grande parte no e-líquido, em dispositivos não totalmente utilizados ou em forma residual) podem ser liberados por processos mecânicos relacionados às atividades de desmontagem, trituração e moagem. Conforme mencionado, várias substâncias potencialmente perigosas relacionadas ao vaping, como PAHs, VOCs, metais pesados e PFASs podem ser encontradas nestes dispositivos (CONSTANTIN; MIHĂLTAN, 2025), sendo que muitas apresentam a capacidade de persistência e bioacumulação, e constituem-se em um risco para os organismos dos ecossistemas. Além destas substâncias, é importante salientar que as peças plásticas destes dispositivos, lançadas no ambiente de forma inadequada, serão uma fonte adicional de microplásticos, gerados por ação do intemperismo (TRUTH INITIATIVE, 2023).

Deve-se destacar também o impacto da nicotina (um biocida) no ambiente, presente no e-líquido residual (TURNER et al., 2024). Ensaios com organismos aquáticos demonstraram efeitos adversos na reprodução de microcrustáceos (*Daphnia magna*) (OROPESA et al., 2017) e redução no crescimento da raiz e de biomassa de plantas aquáticas (*Lemna minor*) (GREEN et al., 2023). Deste modo, os vapores já são considerados uma nova ameaça ao ambiente aquático, caso destinados de forma inadequada (GREEN et al., 2023; OROPESA et al., 2017).

7. Considerações Finais

Apesar de proibidos no Brasil, os cigarros eletrônicos podem ser adquiridos no comércio ilegal e pela internet. Além de todos os problemas relacionados à saúde humana provocados pelo seu uso, um grande desafio das autoridades competentes recai sobre a destinação final deste tipo de REEE, pois torna-se impossível sua devolução por meio de logística reversa para seus fabricantes, por causa de sua ilegalidade.

Cada vez mais estes dispositivos estão sendo fabricados para serem utilizados apenas uma vez, gerando uma crescente quantidade de REEE descartáveis.

Sua destinação, em grande parte, acaba sendo as lixeiras públicas ou o lixo doméstico convencional e, desta forma, grande parte deste material é encaminhado para a disposição no solo, muitas vezes ainda de forma inadequada, em aterros controlados ou vazadouros de resíduos sólidos urbanos. As substâncias contidas tanto nas peças de sua composição, como no e-líquido podem ser considerados elementos potencialmente tóxicos, e afetar o solo, a água superficial e subterrânea das áreas de disposição de resíduos. Deve-se destacar, inclusive, a falta de conhecimento de muitas substâncias contidas nestes dispositivos, mesmo onde eles estão sob controle da fiscalização.

Enquanto nos países que liberaram o uso destes dispositivos a informação sobre a necessidade de logística reversa, produção de dispositivos com materiais mais sustentáveis e recicláveis, e com design que permita a desmontagem são essenciais, no Brasil outras estratégias precisam ser adotadas. A proibição de seu uso inibe de alguma forma a geração de resíduos,



sendo assim um importante instrumento também para a proteção do meio ambiente. Entretanto, o problema do descarte de um resíduo considerado ilegal existe e não pode ser desprezado.

Deste modo, é preciso que este problema seja abordado pelos órgãos competentes e seja indicado algum meio de descarte adequado deste material, enquanto mais campanhas educativas que esclareçam os danos à saúde e ao ambiente possam ser desenvolvidas para o público consumidor.

Assim, uma abordagem integrada, incluindo ações de fiscalização, conscientização da população, elaboração de instrumentos reguladores e incentivo à pesquisa deve ser dada ao problema do consumo de cigarros eletrônicos para a proteção da saúde humana e do meio ambiente.

Agradecimentos

Josino Moreira agradece à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ), processo E-26/202.792/2023. Cristina Sisino agradece ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pelo fomento da bolsa PCI-DA do MCTI no CETEM. Andre Luiz Oliveira da Silva agradece a ANVISA, e informa que as declarações e opiniões expressas no trabalho são de responsabilidade dos autores e são baseadas em evidências científicas atuais e não representam nenhuma orientação institucional e/ou opinião da ANVISA.

Referências

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 16156. Resíduos de equipamentos eletroeletrônicos: Requisitos para atividade de manufatura reversa. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

BALDÉ, C.P.; KUEHR, R.; BEL, G. et al. The global e-waste monitor 2024. Geneva/Bonn: ITU/UNITAR. 148 p., 2024.

BEUTEL, M.W.; HARMON, T.C.; NOVOTNY, T.E. et al. A Review of environmental pollution from the use and disposal of cigarettes and electronic cigarettes: contaminants, sources, and impacts. *Sustainability*, 13(23),12994, 2021.

BONNER, E.; CHANG, Y.; CHRISTIE, E. et al. The chemistry and toxicology of vaping. *Pharmacology & Therapeutics*, 225, 107837, 2021.

BRASIL. Ministério da Saúde. Resolução de Diretoria Colegiada nº 855, de 24 de Abril de 2024. Proíbe a fabricação, a importação, a comercialização, a distribuição, o armazenamento, o transporte e a propaganda de dispositivos eletrônicos para fumar (Ementa alterada conforme Retificação publicada no DOU em 03/05/2024). 2024.

CONSTANTIN, A.-A.; MIHĂLTAN, F.-D. E-cigarette and environment. *Environments*, 12, 72, 2025.

FORTI, V.; BALDÉ, C.P.; KUEHR, R., BEL, G. The global e-waste monitor 2020: quantities, flows and the circular economy potential. Bonn: United Nations University, 2020. Disponível em: https://ewastemonitor.info/wpcontent/uploads/2020/11/GEM_2020_def_july1_low.pdf. Acesso em: 23 maio 2025.



- GLANTZ, S.A.; NGUYEN, N.; SILVA, A.L.O. Population-based disease odds for ecigarettes and dual use versus cigarettes. *NEJM Evidence*, 3(3):EVIDoa230029, 2024.
- GRANATA, S.; VIVARELLI, F.; MOROSINI, C. et al. Toxicological aspects associated with consumption from electronic nicotine delivery system (ENDS): focus on heavy metals exposure and cancer risk. *Int. J. Mol. Sci.*, 25(5), 2737, 2024.
- GREEN, D.S.; BOOTS, B.; OLAH-KOVACS, B.; PALMA-DIOGO, D. Disposable ecigarettes and cigarette butts alter the physiology of an aquatic plant *Lemna minor* (Lemnaceae). *Science of the Total Environment*, 892, 164457, 2023.
- KRÜSEMANN, E.J.Z.; HAVERMANS, A.; PENNING, J.L.A. et al. Comprehensive overview of common e-liquid ingredients and how they can be used to predict an eliquid's flavour category. *Tob. Control*, 30, 185-191, 2021.
- KULHÁNEK, A.; BAPTISTOVÁ, A. Chemical composition of electronic cigarette eliquids: overview of current evidence of toxicity. *Adiktologie*, 20(3-4), 137-144, 2020.
- LALO, H.; LECLER, L.; SORIN, J.; POURCHEZ, J. Aerosol droplet-size distribution and airborne nicotine portioning in particle and gas phases emitted by electronic cigarettes. *Scientific Reports*, 10, 21707, 2020.
- LEE, H.W.; PARK, S.H.; WENG, M.W. et al. E-cigarette smoke damages DNA and reduces repair activity in mouse lung, heart, and bladder as well as in human lung and bladder cells. *Proc. Natl. Acad. Sci USA*, 115(7):E1560-569, 2018.
- LERNER, C.A.; SUNDAR, I.K.; WATSON, R.M. et al. Environmental health hazards of e-cigarettes and their components: oxidants and copper in e-cigarette aerosols. *Environmental Pollution*, 198, p.100-107, 2015.
- MARQUES, P.; PIQUERA, L.; SANZ, M.-J. An updated overview of the e-cigarette impact on human health. *Respir. Res.*, 22 (1), 51, 2021.
- MILLS, A.; NASSABEH, S.; HURLEY, A. et al. Influence of gestational window of offspring vascular health in rodents with in utero exposure to electronic cigarettes. *J. Physiol.*, 602(17): 4271-4289, 2024.
- NGAMBO, G.; HANNA, E.G.; GANNON, J. et al. A scoping review on e-cigarette environmental impacts. *Tobacco Prevention & Cessation*, 9(October):30, 2023.
- OLMEDO, P.; GOESSLER, W.; TANDA, S. et al. Metal concentrations in e-cigarette liquid and aerosol samples: the contribution of metallic coils. *Env. Health Perspect.*, 126(2), 027010, 2018.
- OROPESA, A.L.; FLORO, A.M.; PALMA, P. Toxic potential of the emerging contaminant nicotine to the aquatic ecosystem. *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 24:16605– 16616, 2017.
- PALMISANI, J.; DI GILIO, A.; PALMIERI, L. et al. Evaluation of second-hand exposure to electronic cigarette vaping under a real scenario: measurements of ultrafine particle number concentration and size distribution and comparison with traditional tobacco smoke. *Toxics*, 7, 59, 2019.



SEMINÁRIO INTERNACIONAL DE RESÍDUOS DE EQUIPAMENTOS ELETROELETRÔNICOS
14 a 16 de outubro de 2025

- PHAM, K.; HUYNH, D.; LE L. et al. E-cigarette promotes breast carcinoma progression and lung metastasis: macrophage-tumor cells crosstalk and the role of CCL5 and VCAM-1. *Cancer Lett.*, 491:132-145, 2020.
- SILVA, A.L.O. Cigarros eletrônicos com vitaminas e nutrientes: onde o charlatanismo e tecnologia se encontram. *Cadernos de Saúde Pública*, 40(1), e00024223, 2024.
- SILVA, A.L.O.; MOREIRA, J.C. Por que os cigarros eletrônicos são uma ameaça à saúde pública? *Cadernos de Saúde Pública*, 35(6), e00246818, 2019.
- TALIH, S., BALHAS, Z.; SALMAN, R. et al. Transport phenomena governing nicotine emissions from electronic cigarettes: model formulation and experimental investigation. *Aerosol Sci. Technol.*, 51(1), 1-11, 2017.
- TANG, M.S.; WU, X.R.; LEE, H.W. et al. Electronic-cigarette smoke induces lung adenocarcinoma and bladder urothelial hyperplasia in mice. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 116(43), 21727-21731, 2019.
- TRUTH INITIATIVE. Tobacco and the environment. April 2023. Disponível em: <https://truthinitiative.org/research-resources/harmful-effects-tobacco/tobacco-and-environment>. Acesso em: 18 maio 2025.
- TURNER, A.; SCOTT, J.W.; BACKSHALL-KENNEDY, T.; DABROWSKI, M. Deconstructing contemporary disposable vapes: a material and elemental analysis. *Science of the Total Environment*, 954, 176292, 2024.
- VENUGOPAL, P.D.; ADDO NTIM, S.; GOEL, R.; REILLY, S.M.; BRENNER, W.; HANNA, S.K. Environmental persistence, bioaccumulation, and hazards of chemicals in e-cigarette e-liquids: short-listing chemicals for risk assessments. *Tob. Control*, 33, 781–789, 2024.
- ZHAO, S.; ZHANG, X.; WANG, J. et al. Carcinogenic and non- carcinogenic health risk assessment of organic compounds and heavy metals in electronic cigarettes. *Scientific Reports*, 13(1), 16046, 2023.



RESÍDUOS DE EQUIPAMENTOS ELETROELETRÔNICOS COMO NANORESÍDUOS: DESAFIOS PARA SUA GESTÃO

Autores: Sisinno, C.L.S.¹; Rizzo, A.C.L.²; Cunha, C.D.³

¹ Centro de Tecnologia Mineral (CETEM) – Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI)

² Fundação Oswaldo Cruz (FIOCRUZ)

³ Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ)

Resumo: O uso de nanomateriais (NMs) engenheirados em diversas aplicações aumentou nos últimos anos e continuará de forma crescente no futuro. Estes materiais podem estar incorporados à vários produtos de consumo, como eletroeletrônicos, e à medida que o número de aplicações aumenta, mais e mais resíduos com NMs estão sendo gerados e, posteriormente, descartados. Os termos "nanoresíduos" ou "resíduos contendo nanomateriais" abrangem qualquer tipo de resíduo em que os NMs engenheirados possam estar presentes. Alguns exemplos referem-se a vários Resíduos de Equipamentos Eletroeletrônicos (REEE), que muitas vezes são misturados com os resíduos sólidos urbanos, considerados uma das principais fontes de NMs para o ambiente. No entanto, o comportamento dos NMs durante as operações de gerenciamento de resíduos é pouco compreendido e seus efeitos na saúde ambiental ainda precisam de mais estudos. O objetivo deste trabalho é apresentar uma revisão bibliográfica sobre os REEE considerados nanoresíduos, discutir os desafios envolvendo a sua gestão, sua possível recuperação e os impactos da sua destinação inadequada na saúde ambiental. Observa-se uma escassa abordagem dos REEE como nanoresíduos, que normalmente encontra-se inserida em alguns artigos que tratam da temática geral dos nanoresíduos. Destaca-se o pouco conhecimento sobre o comportamento dos NMs, principalmente durante as etapas de reciclagem e disposição no solo – principais métodos de destinação dos REEE –, e a falta de instrumentos regulatórios referentes aos nanoresíduos. Estes dados mostram a importância da divulgação do tema sobre os REEE considerados nanoresíduos para promover a sustentabilidade de produtos tecnológicos, aliada à proteção da saúde ambiental.

Palavras-chave: Nanomateriais; Resíduos de Equipamentos Eletroeletrônicos; Nanoresíduos; Gerenciamento de Resíduos; Saúde Ambiental.



1. Introdução

O uso de nanomateriais (NMs) engenheirados – materiais que possuem qualquer dimensão externa na nanoescala (1 nm a 100 nm) ou tem estrutura interna ou estrutura de superfície na nanoescala (ABNT, 2022) – vem aumentando em diversas aplicações nos últimos anos e continuará de forma crescente no futuro. Atualmente, diversos setores econômicos utilizam produtos com base nanotecnológica e em diferentes aplicações, que incluem as áreas de construção civil, energia, eletrônica, informação e comunicação, medicina, produção de diversos bens etc. (HANSEN et al., 2020; LABUDA et al., 2023; PART et al., 2018; UNEP, 2018; ZAHRA et al., 2022).

Os NMs exibem novas propriedades e características diferentes dos materiais em escala bulk (fora da nanoescala), como tamanho, forma, área de superfície específica etc. e apresentam escala nano em uma dimensão (p. ex. nanoplacas), duas dimensões (p. ex. nanofibras), ou três dimensões (p. ex. nanopartículas) (ABNT, 2022).

Os NMs exibem propriedades únicas, em comparação com suas dimensões maiores porque possuem uma área superficial relativamente maior quando comparados com a mesma massa de material produzido na escala macro, aumentando sua reatividade ou estabilidade em um processo químico. Além do tamanho, outras características também poderão influenciar nas suas propriedades magnéticas, eletrônicas, óticas, mecânicas e térmicas especiais (SHAHEEN et al., 2023).

Os Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) e os produtos no final de vida (EoL – End of Life) são considerados duas das principais fontes potenciais de resíduos contendo NMs (ECHA, 2021; OECD, 2016). Com a crescente aplicação de NMs em produtos de consumo a presença de NMs em fluxos de resíduos também cresce e, entre os NMs mais utilizados estão os que contêm prata, titânio, zinco e os NMs à base de carbono (PART et al., 2018).

Os Resíduos de Equipamentos Eletroeletrônicos (REEE) podem conter compostos orgânicos e inorgânicos perigosos em sua composição e, além destas substâncias, NMs engenheirados também estão sendo utilizados cada vez mais em muitos produtos eletroeletrônicos (computadores, telefones celulares, eletrodomésticos etc.) (PART et al., 2015b; 2018; ZAHRA et al., 2022) e em equipamentos usados de forma crescente na transição energética para fontes mais limpas, como baterias de veículos elétricos e painéis solares fotovoltaicos (SISINNO et al., 2023).



A partir do final de sua vida útil, um nanoproduto pode entrar no sistema de gerenciamento de resíduos, sendo reciclado, incinerado ou depositado em aterros. Entretanto, poucos estudos estão disponíveis sobre o comportamento e o destino dos NMs durante o gerenciamento dos nanoresíduos (GRESSLER et al., 2014; PART et al., 2015b; SCHWAB et al., 2023); atualmente ainda existem lacunas de informações padronizadas sobre procedimentos para identificar, monitorar e gerenciar nanoresíduos; e não há dados sobre a quantidade de nanoresíduos gerados (ZAHRA et al., 2022).

Uma vez que ainda existem dúvidas sobre os riscos potenciais dos NMs para a saúde e para o ambiente – principalmente em longo prazo –, e que as questões relacionadas a gestão dos nanoresíduos continuam sendo pouco discutidas, este trabalho tem como objetivos: 1) destacar os REEE como nanoresíduos; 2) examinar como os NMs contidos nos REEE podem ser liberados durante seu gerenciamento, principalmente nas etapas de reciclagem e disposição no solo; 3) discutir os desafios para a recuperação dos REEE como nanoresíduos no contexto da Economia Circular e 4) descrever os impactos na saúde ambiental dos NMs liberados pelos nanoresíduos.

2. Metodologia

Para a elaboração deste artigo foi realizada uma revisão bibliográfica com o levantamento de artigos publicados em periódicos nacionais e internacionais disponíveis no Google Scholar e no Portal de Periódicos da CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior).

Para o levantamento dos artigos foram utilizados os seguintes termos de busca em inglês: “nanowaste” OR “waste containing nanomaterials” AND “WEEE” OR “waste electrical and electronic equipment” OR “e-waste” AND “waste management” AND “environmental health” e suas respectivas versões em português.

A busca foi limitada aos artigos publicados no período de 2015 a 2025 para garantir a inclusão de informações mais recentes. Entretanto, as referências dos artigos selecionados foram consultadas para identificar outros estudos e publicações relevantes. Foram excluídos os anais em congressos, livros e capítulos de livros. Os critérios de inclusão para a revisão da literatura foram baseados na relevância do estudo para o tema, com base nas informações disponibilizadas nos títulos, palavras-chave e resumos.

Os artigos publicados no período escolhido foram selecionados e analisados com relação ao conteúdo que abordasse informações referentes aos REEE como nanoresíduos e os desafios para a sua gestão, recuperação e os possíveis impactos de sua destinação inadequada na saúde ambiental.

3. REEE Contendo Nanomateriais: Nanoresíduos

Apesar de não existir ainda uma definição padronizada, os termos “nanoresíduos” ou “resíduos contendo nanomateriais” abrangem quaisquer tipos de resíduos em que os NMs engenheirados possam estar presentes, incluindo resíduos de materiais manufaturados, produtos contendo NMs no final de sua vida útil e resíduos (não intencionalmente) contaminados com NMs engenheirados (SCHWAB et al., 2023).



O termo nanoresíduo é aplicado, segundo alguns autores, quando os NMs estão em contato com os resíduos sólidos e podem ser coletados separadamente, ou são originados de materiais descartados (BOLDRIN et al., 2014; GRESSLER et al., 2014; PART et al., 2018).

Vários produtos de consumo, incluindo equipamentos eletroeletrônicos há muitos anos já possuem em seus componentes diversos NMs engenheirados. Os equipamentos eletroeletrônicos são equipamentos, partes e peças cujo funcionamento adequado depende de correntes elétricas ou campos eletromagnéticos, bem como os equipamentos para geração, transmissão, transformação e medição dessas correntes e campos, podendo ser de uso doméstico, industrial, comercial e de serviços e os REEE, por sua vez, são os equipamentos eletroeletrônicos, partes e peças que chegaram ao final da sua vida útil ou seu uso foi descontinuado (ABNT, 2013).

Os REEE são compostos por uma variedade de materiais, como: metais, plásticos, vidros, componentes eletrônicos (memórias, capacitores, resistores etc.), e outros como tintas, adesivos e revestimentos. Nestes materiais podem ser encontrados NMs de base metálica, orgânica ou inorgânica (SISINNO et al., 2023). Fadaei (2022) também descreve como componentes perigosos presentes nos REEE os compostos radioativos e as micro e nanopartículas.

Segundo Andersen et al. (2014), os principais NMs encontrados nos REEE são: nanotubos de carbono (CNTs, do inglês Carbon Nanotubes), prata, dióxido de silício, dióxido de titânio e óxido de zinco. Caballero-Guzman et al. (2015) descrevem dióxido de titânio em teclados e mouse; prata em telefones celulares e CNTs em baterias de íonLítio, memória RAM e chips de computadores.

Part et al. (2018) citam os seguintes NMs encontrados em aplicações na indústria eletrônica: dióxido de titânio, óxido de zinco, óxido de alumínio, óxido de ferro (II e III), dióxido de zircônio, ouro, prata, nanocristais núcleo-casca (core-shell), pontos quânticos (quantum dots), fulerenos, CNTs, negro de fumo (carbon black), flocos de grafeno e outros metais e ligas (lítio, ferro, cobre, ródio, platina, lantânio, neodímio etc.). A prata é encontrada em células fotovoltaicas e displays; negro de fumo em tintas e toners de impressão; flocos de grafeno em células solares; fulerenos e CNTs em baterias e células solares (PART et al., 2018).

Sisinno et al. (2023) em um estudo desenvolvido com base em um levantamento realizado em bancos de dados internacionais descrevem a presença de NMs em produtos eletroeletrônicos, com a predominância de nano-prata, que é um NM amplamente utilizado em muitos bens de consumo e diversos segmentos, e de outros NMs como CNTs, grafeno, dióxido de titânio e silício, igualmente utilizados em muitas aplicações.

A Diretiva Europeia 2011/65/UE RoHS – Restrictions of the Use of Certain Hazardous Substances – descreve, inclusive, que na revisão da restrição de outras substâncias perigosas sejam incluídas substâncias de tamanho muito reduzido ou de estrutura interna ou de superfície muito reduzidas que possam gerar impactos negativos para o ambiente ou para os trabalhadores que as manipulem REEE (UE, 2011).

4. Gerenciamento dos REEE como Nanoresíduos

Segundo Baldé et al. (2024), cerca de 5 bilhões de kg de REEE são compostos por pequenos equipamentos de TI e telecomunicações, que incluem laptops, telefones celulares, dispositivos GPS e roteadores; onde apenas 22% são documentados como formalmente



coletados e reciclados. Muitos destes REEE estão citados em bancos de dados internacionais contendo NMs, conforme mencionado por Sisino et al. (2023).

Estima-se que 14 bilhões de kg de REEE foram descartados indevidamente em todo o mundo em 2022 em lixeiras comuns, juntamente com outros resíduos domésticos, principalmente em países de renda alta e média-alta. Normalmente, itens menores de REEE, como pequenos dispositivos de TI e pequenos equipamentos, são descartados junto com os outros resíduos, sendo tratados como resíduos domésticos (BALDÉ et al., 2024).

Os principais destinos dos REEE são a reciclagem, frequentemente realizada de maneira informal, ou a destinação final no solo, muitas vezes em áreas inadequadas (aterros controlados ou simples vazadouros de resíduos) (BALDÉ et al., 2024; FADAEI, 2022; OECD, 2016; ZAHRA et al., 2022).

Em geral, os NMs podem ser liberados em qualquer fase do ciclo de vida de um produto: durante a produção, fase de uso ou no estágio de fim de vida. No entanto, poucos estudos têm sido desenvolvidos sobre o destino e o comportamento dos NMs durante o gerenciamento dos nanoresíduos e no final de sua vida útil, incluindo as etapas de reciclagem e destinação final no solo (PART et al., 2015b); que são os meios mais utilizados para a destinação dos REEE, conforme citado anteriormente. Destaca-se a necessidade de uma melhor compreensão sobre os riscos, considerando as diferentes formas de destinação e os potenciais processos de transformação que os NMs sofrem durante o gerenciamento dos nanoresíduos devido às suas propriedades especiais, bem como o seu potencial de recuperação e reuso (GRESSLER et al., 2014).

Os NMs engenheirados contidos nos REEE podem ser potencialmente liberados durante seu tratamento por meio de processos mecânicos, térmicos e químicos, como abrasão, combustão, corrosão e lixiviação (BOLDRIN et al., 2014; PART et al., 2015b) e acumular-se em materiais residuais, de sucata, matérias-primas secundárias ou compostos orgânicos de resíduos sólidos urbanos (PART et al., 2015b). Deve-se destacar a preocupação atual com o uso de lodos de ETE (Estação de Tratamento de Efluentes), cinzas de incineradores e compostos orgânicos de RSU devido à possível presença de contaminantes emergentes – incluindo os NMs –, que podem se tornar fontes secundárias de contaminação, caso sejam utilizados na agricultura como fertilizantes e corretivos (PART et al., 2018; UNEP, 2018).

Os NMs fortemente integrados na matriz de um produto podem ser liberados apenas por meio dos processos citados anteriormente, enquanto os encontrados em suspensões estão mais facilmente disponíveis, sendo lançados de forma direta no ambiente (PART et al., 2015b).

4.1 Reciclagem

A reciclagem de resíduos inclui um conjunto de processos e tecnologias para reutilizar ou reprocessar materiais ou produtos que, de outra forma, seriam descartados. A reciclagem abrange qualquer operação de valorização que reprocessa resíduos em produtos, materiais ou substâncias, independentemente de serem utilizados para fins originais ou outros (OECD, 2016).

Os modelos de análise do fluxo de materiais mostram que diferentes fluxos de resíduos que contêm NMs são direcionados para a reciclagem. No entanto, a literatura sobre a reciclagem de resíduos contendo NMs é escassa (PART et al., 2018) e o conhecimento limitado sobre o destino e o comportamento dos NMs durante a reciclagem limita a capacidade de avaliar os riscos que eles podem representar (GRESSLER et al., 2014; PART et al., 2018).



Poucos estudos empíricos examinaram a liberação de NMs durante os processos de reciclagem. Avaliações realizadas apontaram para vários caminhos possíveis de exposição ocupacional aos NMs por meio de partículas finas ou ultrafinas contendo NMs liberados durante o transporte, a triagem, a trituração, a moagem e durante processos térmicos (aquecimento, soldagem, pirólise), quando os controles ocupacionais são insuficientes (UNEP, 2018).

4.2 Disposição no Solo

Geralmente os NMs podem ser descartados diretamente como resíduos de produção ou como componentes de "nanoprodutos", como é o caso de células solares, eletroeletrônicos, dispositivos médicos etc. (ZAHRA et al., 2022). Outra forma é a liberação de NMs a partir de materiais secundários que também podem ser depositados em áreas de aterros, como lodos de ETE e cinzas de incineradores (PART et al., 2015b; UNEP, 2018).

Os modelos de fluxos de materiais mostraram que, no futuro, as maiores quantidades de NMs se acumularão em aterros. Um fator-chave a esse respeito é a ampla aplicação de NMs em muitos produtos e em diversos setores, juntamente com a forma predominante de destinação final dos resíduos em aterros (sanitários ou controlados) adotada em muitos países (PART et al., 2015b).

O comportamento e o destino dos NMs, por exemplo, em um aterro sanitário, dependem muito das condições ambientais, como valor de pH, força iônica, conteúdo total de matéria orgânica, conteúdo de ácidos húmicos dissolvidos, bem como da estabilidade coloidal dos NMs e da presença de outras substâncias (PART et al., 2015b; UNEP, 2018).

As condições prevalentes, por sua vez, variam conforme o tipo e a idade de um aterro sanitário, juntamente com seu modo de operação (PART et al., 2015b).

A transferência de NMs de matrizes de resíduos sólidos (fase sólida) para a fase líquida, como em lixiviados (chorume) de aterros de resíduos precisa ser mais estudada (PART et al., 2015a) e ainda não se pode concluir que o aterro é uma opção segura para a disposição de nanoresíduos (UNEP, 2018).

5. Desafios para a Recuperação dos REEE como Nanoresíduos no Contexto da Economia Circular

A Economia Circular é um sistema de ciclo fechado que visa minimizar a entrada e saída de recursos, aplicando várias estratégias e soluções em diferentes estágios de fabricação, uso, distribuição e descarte de materiais. Essas estratégias incluem a extensão da vida útil do produto – fabricando materiais e produtos para maximizar sua vida útil e aumentar o potencial de sua reutilização, refabricação, redistribuição e reciclagem –, usando resíduos para criar novos produtos e materiais valiosos e minimizando os fluxos de resíduos (ECHA, 2021).

A fim de abordar a segurança e a sustentabilidade dos NMs, o conceito de Safe and Sustainable by Design (SSbD) tem sido usado para atendimento à Economia Circular e para identificar, estimar e eliminar/minimizar riscos e incertezas para os seres humanos e para o ambiente ao longo do ciclo de vida de um produto e ao longo de toda a sua cadeia de valor (ECHA, 2021).

O conceito de SSbD desempenha um papel vital no aumento da eficiência e sustentabilidade dos processos de recuperação de NMs. A abordagem inovadora do princípio (SSbD) visa desenvolver nanoprodutos sustentáveis, considerando e avaliando possíveis



impactos em aspectos ecológicos, sociais e econômicos (três pilares da sustentabilidade) ao longo de todo o ciclo de vida do produto (SISINNO et al., 2024). Ao projetar produtos eletrônicos com considerações de segurança e sustentabilidade, pode-se garantir que eles sejam mais fáceis de desmontar e reciclar. Isso não apenas melhora a eficiência dos processos de recuperação, mas também reduz o impacto ambiental e promove a conservação dos recursos naturais.

Outro instrumento importante é a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) para a recuperação de nanoresíduos, incluindo os REEE. A metodologia da ACV foi adaptada para NMs engenheirados pelo Comitê de Padronização Europeu e permite a avaliação da performance ambiental de produtos contendo NMs ao longo do seu ciclo de vida (ECHA, 2021).

São muitos os desafios que envolvem a possível recuperação de nanoresíduos. Por exemplo, no caso dos REEE, um grande desafio é a complexidade de sua matriz, que contém uma gama diversificada de materiais (BALDÉ et al., 2024), dificultando a separação e recuperação seletiva de NMs. A presença de substâncias perigosas, como mercúrio e chumbo e outras substâncias químicas (BALDÉ et al., 2024) é um desafio adicional.

Algumas tecnologias de recuperação de nanopartículas metálicas (por exemplo, prata, ouro e cobre) a partir de REEE (como Placas de Circuito Impresso) podem ser utilizadas com a aplicação de métodos físicos, químicos, eletroquímicos e biológicos (DUTTA et al., 2018; KUMAR et al., 2025). Entretanto, a viabilidade econômica é um fator crítico que influencia a adoção das tecnologias disponíveis em escala comercial.

5.1. Rotulagem e Informação sobre os Nanoresíduos

A rotulagem adequada ajuda a identificar produtos que contêm NMs, tornando mais fácil para as instalações de reciclagem classificar e processar esses itens separadamente. Também fornece informações essenciais para garantir a segurança dos trabalhadores envolvidos no processo de reciclagem e evitar a contaminação ambiental (SCHWAB et al., 2023). A rotulagem também deve incentivar o descarte correto dos resíduos, prevenir acidentes por resíduos incompatíveis e garantir sua eliminação de acordo com a legislação pertinente, quando houver (SCHWAB et al., 2023).

Um grande desafio para a implementação da rotulagem de NMs nos produtos está relacionado com lacunas em métodos analíticos padronizados para detectar, identificar e quantificar NMs em matrizes complexas (ECHA, 2021; LABUDA et al., 2023).

Apesar de muitos produtos de consumo já possuírem em sua composição NMs engenheirados, esta informação não é obrigatória em muitos países (PAVLICEK et al., 2021), incluindo o Brasil. Dados da União Europeia descrevem que os NMs podem estar presentes em muitos produtos, no entanto, as fontes de informação disponíveis fornecem apenas dados qualitativos sobre a sua presença (OECD, 2016).

As fontes de informação sobre os NMs nos produtos de consumo são importantes instrumentos para gestores, cientistas, organismos reguladores e consumidores (OECD, 2016). Apesar das deficiências na quantificação dos NMs, essas fontes podem fornecer indicações para determinar a composição dos resíduos e serem utilizadas em Análise de Fluxo de Material (MFA, do inglês Material Flow Analysis) de NMs para avaliar seu destino no ambiente e para

apoiar a tomada de decisões regulatórias na avaliação da segurança (ECHA, 2021). Por exemplo, o estudo realizado por Adam e Nowak (2017) indicou que a maior parte dos fluxos de resíduos sólidos contendo nano-Ag, -TiO₂ e -ZnO são direcionados para a separação e reciclagem, enquanto os resíduos contendo CNTs na maioria das vezes são depositados diretamente no solo.

A ausência tanto de dados qualitativos como de dados quantitativos sobre os NMs nos produtos de consumo complica a identificação dos fluxos de resíduos predominantes que contêm NMs e dificulta não apenas o gerenciamento adequado, como a prevenção de riscos para a saúde e o ambiente (OECD, 2016).

No caso dos NMs encontrados nos REEE, uma vez que se apresentam possíveis riscos na produção, uso e destinação dos produtos, torna-se necessário que seja fomentado e protegido o direito à informação (LEAL; HOHENDORFF, 2017). A informação pública sobre os NMs é importante, inclusive, para que consumidores possam tomar decisões sobre a aquisição de nanoproductos (OECD, 2016).

5.2. A Necessidade da Regulação dos Nanoresíduos

Ainda não há regulação para os nanoresíduos e alguns autores sustentam sua preocupação com orientações baseadas no princípio da precaução, estabelecido na legislação de resíduos perigosos (SCHWAB et al., 2023; UNEP, 2018). Gressler et al. (2014) descrevem que pré-requisitos importantes para a existência de um arcabouço legal seriam o conhecimento exato de quais NMs estão sendo utilizados, suas formas e composição, potenciais processos de transformação, além de quantidades e concentrações.

O acordo multilateral mais importante que rege os resíduos perigosos, a Convenção de Basileia, não aborda explicitamente os nanoresíduos, mencionando apenas o pó e as fibras de amianto, historicamente conhecidos (SCHWAB et al., 2023).

Convenção de Basileia, em princípio, aborda implicitamente os nanoresíduos nos seus anexos. Por exemplo, os principais fluxos de resíduos e constituintes discutidos na Convenção citam implicitamente o nano dióxido de titânio (nano-TiO₂). No entanto, a falta de menção explícita de resíduos de Ti contendo propriedades nano-específicas é problemática e conduz a ambiguidades jurídicas. Os resíduos de Ti são classificados principalmente como resíduos não perigosos, o que classifica implicitamente os resíduos de nano-TiO₂ como não perigosos (SCHWAB et al., 2023).

Entretanto, vários metais e compostos metálicos descritos no Anexo I da Convenção, ou como componentes de resíduos encontrados no Anexo VIII da Convenção, podem existir em nanoforma ou não (UNEP, 2018).

No Brasil, atualmente, os instrumentos legais e normativos relacionados à classificação e gerenciamento dos resíduos sólidos não abordam a questão da presença ou quantificação dos NMs nos resíduos como possível indicação de sua periculosidade.

6. Nanoresíduos e Impactos na Saúde Ambiental

Uma potencial mobilização e transformação dos NMs no ambiente são em grande parte influenciadas por processos de transporte hidrodinâmico (lixiviação ou deposição), dissolução, dessorção ou adsorção, além dos processos de oxidação e redução (PART et al., 2015b).



Ainda são escassos os estudos para medir nanopartículas transportadas pelo ar durante os processos de reciclagem, por exemplo, durante a trituração de REEE ou processamento de materiais secundários com base nos aspectos de saúde e segurança ocupacional (PART et al., 2015b).

Do ponto de vista da avaliação de risco, a reciclagem é relevante por três razões: 1) como fonte de exposição ocupacional aos NMs; 2) como fonte de liberação de NMs para o ambiente; e 3) como fonte de recirculação de matérias-primas com conteúdo potencialmente perigoso (OECD, 2016).

Normalmente os NMs entram no organismo por inalação, ingestão ou via dérmica (OECD, 2016). A exposição ocupacional pode ocorrer por meio do contato com líquidos que contenham NMs e NMs transportados pelo ar (OECD, 2016).

Alguns NMs podem persistir por muito tempo no ambiente, serem assimilados por organismos vivos, sofrer biodegradação ou bioacumular ao longo da cadeia alimentar, causando efeitos crônicos em longo prazo. A toxicidade para os componentes da cadeia alimentar foi observada em bactérias, plantas e organismos aquáticos e terrestres multicelulares (OECD, 2016). Além disso, as capacidades de adsorção de alguns NMs e sua capacidade de permear através das membranas biológicas levantam preocupações sobre o transporte de substâncias químicas tóxicas através de tecidos e células. Este fato merece destaque porque, embora certos NMs possam não ser tóxicos, se os nanoresíduos se misturarem/interagirem com outros fluxos de resíduos contendo substâncias químicas tóxicas, os primeiros podem atuar como um “cavalo de Tróia”, transportando os últimos para dentro da célula (OECD, 2016). Deste modo, uma vez que os NMs sejam liberados nas águas superficiais ou subterrâneas, eles podem adicionalmente servir como “carreadores de substâncias” para outros contaminantes (PART et al., 2015b).

Com base no princípio da precaução, o monitoramento ambiental de NMs em nanoresíduos é crucial para permitir a avaliação do impacto potencial dos NMs em longo prazo nos ecossistemas durante e após sua utilização (PART et al., 2015b).

7. Considerações Finais

Estudos internacionais usando modelagem mostram que a fase de fim de vida dos “nanoprodutos”, onde estes são categorizados como “nanoresíduos” pode desempenhar um papel fundamental na liberação potencial de NMs para o ambiente e causar riscos para a saúde humana e para o ambiente.

Atualmente, no entanto, pouco se sabe sobre o comportamento e o destino dos NMs em fluxos de resíduos, especialmente durante os processos de reciclagem e disposição no solo, e muitas questões permanecem em dúvida sobre o destino e a potencial liberação de emissões de nanopartículas nos vários processos de tratamento de resíduos.

Apesar de todos os benefícios dos NMs incorporados aos produtos eletroeletrônicos, é necessário um esforço intensivo na divulgação e educação/conscientização sobre a importância do gerenciamento adequado dos REEE pela possível presença de NMs engenheirados, cujos efeitos adversos, principalmente em longo prazo, ainda necessitam de estudos adicionais, para a prevenção de possíveis impactos na saúde e no ambiente.

Deve-se destacar que as lacunas de informações/conhecimento reforçam a necessidade de ações de segurança durante todas as fases do gerenciamento dos REEE, a fim de prevenir que possíveis efeitos adversos sejam potencializados pela falta de conhecimento sobre os impactos



dos NMs aliada às práticas inadequadas de destinação e reciclagem dos REEE, frequentemente observadas no Brasil.

Ainda não existe um regulamento global explícito para os nanoresíduos. Enquanto isso, procedimentos preventivos podem ser adotados, e é importante destacar que tanto o meio acadêmico como a indústria podem contribuir para a sua gestão adequada. De uma maneira geral, pode-se recomendar:

- 1) Implantação de práticas de rotulagem: implementar práticas de rotulagem padronizadas para produtos que contenham NMs para garantir sua identificação e recuperação eficientes. Este procedimento deveria ser adotado para vários equipamentos eletroeletrônicos, antes de se tornarem REEE.
- 2) Promoção do princípio de SSbD: incentivar os fabricantes a adotarem o princípio SSbD para produtos eletroeletrônicos. Isso melhorará a desmontagem, reciclagem e recuperação dos vários materiais que compõem os REEE.
- 3) Investimento em tecnologias avançadas de recuperação: apoio à pesquisa e ao desenvolvimento de tecnologias avançadas de recuperação de materiais para melhorar a eficiência e reduzir o impacto ambiental.
- 4) Implantação de estruturas regulatórias: desenvolver e aplicar regulamentos e políticas que promovam o gerenciamento adequado e práticas sustentáveis para os nanoresíduos.
- 5) Aumento na conscientização do consumidor: educar os consumidores sobre a importância do descarte e reciclagem responsáveis de produtos contendo NMs e incentivar a utilização de produtos concebidos com os princípios SSbD e com uma rotulagem adequada.
- 6) Realização de ACVs: realizar ACVs para avaliar os impactos ambientais e econômicos dos processos de recuperação de nanoresíduos. Usar as descobertas para otimizar os métodos de recuperação e promover práticas sustentáveis.

Agradecimentos

Cristina Sisino agradece ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pelo fomento da bolsa PCI-DA do MCTI no CETEM.

Referências

ADAM, V. & NOWAK, B. European country-specific probabilistic assessment of nanomaterial flows towards landfilling, incineration and recycling. *Environmental Science Nano*, v.4, p.1961-1973, 2017.

ABNT (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS). ABNT NBR 16156. Resíduos de equipamentos eletroeletrônicos: Requisitos para atividade de manufatura reversa. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

ABNT (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS). ABNT NBR ISO/TR 16197. Nanotecnologias: compilação e descrição de métodos de triagem da toxicidade para nanomateriais manufaturados. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.



- ANDERSEN, L.; CHRISTENSEN, M.F.; NIELSEN, J.M. Nanomaterials in waste – Issues and new knowledge. Environmental Project No. 1608. Copenhagen: The Danish Environmental Protection Agency, 2014.
- BALDÉ, C.P.; KUEHR, R.; BEL, G. et al. The global e-waste monitor 2024. Geneva/Bonn: ITU/UNITAR, 2024.
- BOLDRIAN, A.; HANSEN, S.F.; BAUN, A.; HARTMANN, N.I.B.; ASTRUP, T.F. Environmental exposure assessment framework for nanoparticles in solid waste. *Journal of Nanoparticle Research*, v.16, 2394, p.1-19, 2014.
- CABALLERO-GUZMAN, A.; SUN, T.; NOWACK, B. Flows of engineered nanomaterials through the recycling process in Switzerland. *Waste Management*, v.36, p.33-43, 2015.
- DUTTA, T.; KIM, K.-H.; DEEP, A.; SZULEJKO, J.E.; VELLINGIRI, K.; KUMAR, S.; KWON, E.E.; YUN, S.-T. Recovery of nanomaterials from battery and electronic wastes: A new paradigm of environmental waste management. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v.82, p. 3694-3704, 2018.
- ECHA (EUROPEAN CHEMICALS AGENCY). Study on the Product Lifecycles, Waste Recycling and the Circular Economy for Nanomaterials. Helsinki: ECHA, 2021.
- FADAEI, A. E-waste management status worldwide: major challenges and solutions. *Proceedings of the International Academy of Ecology and Environmental Sciences*, v.12, p.281-293, 2022.
- GRESSLER, S.; PART, F.; GAZSÓ, A. “Nanowaste” – Nanomaterial-containing products at the end of their life cycle. Nano Trust Dossiers. No. 040en. Vienna: ITA. 2014. Disponível em: https://epub.oaw.ac.at/0xc1aa500e_0x003146a3.pdf. Acesso em: 10 abr. 2025.
- HANSEN, S.F.; HANSEN, O.F.H.; NIELSEN, M.B. Advances and challenges towards consumerization of nanomaterials. *Nature Nanotechnology*, v.15, p.964-965, 2020.
- KUMAR, S.; SINGH, H.; SINGH, H.; SONI, H.; BECHELANY, M.; SINGH, J. Extraction of metallic nanoparticles from electronic waste for biomedical applications: Pioneering sustainable technological processes. *Sustainability*, 17, 2100, 2025.
- LABUDA, J.; BAREK, J.; GAJDOSECHOVA, Z.; GOENAGA-INFANTE, H.; JOHNSTON, L.J.; MESTER, Z.; SHTYKOV, S. Analytical chemistry of engineered nanomaterials: Part 1. Scope, regulation, legislation, and metrology (IUAPAC Technical Report). *Pure Applied Chemistry*, v.95, p.133-163, 2023.
- LEAL, D.W.S.; HOHENDORFF, R.V. A era das nanotecnologias no mercado consumidor: a inserção dos “nanoprodutos” ao cotidiano e o direito à informação. *Direito & Desenvolvimento*, v.9, p.286-302, 2018.
- OECD (ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT). Nanomaterials in Waste Streams – Current Knowledge on Risks and Impacts. Paris: OECD Publishing, 2016.



PART, F.; ZECHA, G.; CAUSON, T.; SINER, E.-K.; HUBER-HUMER, M. Current limitations and challenges in nanowaste detection, characterisation and monitoring. *Waste Management*, v.43, p.407-420, 2015a.

PART, F.; GRESSLER, S.; HUBER-HUMER, M.; GAZSÓ, A. Environmentally relevant aspects of nanomaterials at the end of the use phase – Part II: Waste recycling and disposal. *Nano Trust Dossier*, n. 044e, April 2015b. Disponível em: <https://epub.oeaw.ac.at/0xc1aa5576%200x00326c59.pdf>. Acesso em: 14 abr. 2025.

PART, F.; BERGE, N.; BARAN, P.; STRINGFELLOW, A.; SUN, W.; BARTELTHUNT, S.; MITRANO, D.; LI, L.; HENNEBERT, P.; QUICKER, P.; BOLYARD, S.C.; HUBER-HUMER, M. A review of the fate of engineered nanomaterials in municipal solid waste streams. *Waste Management*, v.75, p.427-449, 2018.

PAVLICEK, A.; PART, F.; ROSE, G.; PRAETORIUS, A.; MIERNICKI, M.; GAZSÓ, A.; HUBER-HUMER, M. A European nano-registry as a reliable database for quantitative risk assessment of nanomaterials? A comparison of national approaches. *NanoImpact*, v.21, 100276, 2021.

SCHWAB, F.; ROTHEN-RUTISHAUSER, B.; SCHERZ, A.; MEYER, T.; KARAKOÇAK, B. B.; PETRI-FINK, A. The need for awareness and action in managing nanowaste. *Nature Nanotechnology*, v.18, p.317-321, 2023.

SHAHEEN, I.; KHALIL, A.; SHAHEEN, R.; TAHIR, M.B. A review on nanomaterials: types, synthesis, characterization techniques, properties and applications. *Paradigm Academic Press Innovation in Science and Technology*, v.2, p.56-62, 2023.

SISINNO, C.L.S.; RIZZO, A.C.L.; CUNHA, C.D. Nanomateriais em resíduos de equipamentos eletroeletrônicos: Impactos à saúde e ao ambiente. In: *Seminário Internacional de Resíduos de Equipamentos Eletroeletrônicos*, 6, 2023, Rio de Janeiro. Anais do...Rio de Janeiro: CETEM, p.162-173, 2023.

SISINNO, C.L.S.; MOREIRA, J.C.; PART, F.; BAREK, J.; RIZZO, A.C.L.; CUNHA, C.D. *Nanociência e Nanotecnologia: Considerações gerais para o setor mineral. Série Tecnologia Ambiental (STA 133)*. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2024.

UNEP (UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME). Report on issues related to waste containing nanomaterials and options for further work under the Basel Convention. Geneva: UNEP, 2018.

UNIÃO EUROPEIA (UE). Diretiva 2011/65/UE do Parlamento Europeu e do Conselho de 8 de junho de 2011 relativa à restrição do uso de determinadas substâncias perigosas em equipamentos eléctricos e electrónicos (reformulação). *Jornal Oficial da União Europeia*. L0065, p.1-35.

ZAHRA, Z.; HABIB, Z.; HYUN, S.; SAJID, M. Nanowaste: another future waste, its sources, release mechanism, and removal strategies in the environment. *Sustainability*, 14, 2041, 2022.



ROTAS DE RECICLAGEM DE PLÁSTICOS E RESÍDUOS ELETROELETRÔNICOS: UM ESTUDO DE CASO EM UM MUNICÍPIO DE PEQUENO PORTE DO PARANÁ

Autores: Monfredinho B¹; Sousa M^{1*}; Lovón-Canchumani G¹

¹ Universidade federal do Paraná - UFPR; ² Centro de Tecnologia Mineral - CETEM

*mariannatamye@ufpr.br

Resumo: O estudo teve como objetivo avaliar rotas de reciclagem de resíduos plásticos e eletroeletrônicos em uma empresa localizada em Jandaia do Sul – PR, buscando analisar a efetividade desses processos. Foi utilizado o método de estudo de caso, iniciando-se com a coleta de dados e levantamento do fluxo de entrada e saída de resíduos na empresa. Na etapa seguinte, realizou-se a tabulação e quantificação dos pesos dos resíduos sólidos plásticos e eletroeletrônicos. Por fim, verificou-se a proporção dos resíduos reciclados que retornam à cadeia produtiva em comparação com aqueles destinados a aterros sanitários ou com ciclo encerrado. Para alcançar o objetivo, adotou-se a abordagem quantitativa. Os resultados indicaram que a empresa recicla mensalmente cerca de 2.520 kg de polietileno, 5.397 kg de resíduos eletroeletrônicos e 371 kg de cabos de antena. Também foi possível identificar a composição dos materiais reciclados, incluindo ferro, plástico, borracha, entre outros. Observou-se que a empresa ainda não opera em sua capacidade máxima, indicando potencial para otimizar processos produtivos e ampliar a divulgação das atividades junto à população local.

Palavras-chave: Resíduos sólidos; Eletroeletrônicos; Plástico.



1. Introdução

De acordo com Carvalho (2014), a composição e a quantidade dos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) estão diretamente relacionadas ao nível de desenvolvimento socioeconômico dos países. Nesse contexto, a produção de resíduos no Brasil corresponde a aproximadamente metade daquela registrada nos países europeus. No entanto, a taxa de reciclagem nos países desenvolvidos é significativamente superior. Na Suécia, por exemplo, o índice de reciclagem atinge 43,6% dos RSU gerados, enquanto no Brasil apenas 12% é efetivamente reciclado. De acordo com Clasen et al. (2024), a geração mundial de resíduos sólidos urbanos é estimada em 1,3 bilhão de toneladas por ano, com projeções que indicam um aumento para 2,2 bilhões de toneladas até 2025 e podendo alcançar 3,4 bilhões de toneladas anuais até 2050.

Os resíduos sólidos podem ser classificados de diferentes maneiras, abrangendo categorias como resíduos municipais, médicos, agrícolas, industriais e comerciais. No entanto, alguns autores, como Clasen et al. (2024), especificam que os Resíduos Sólidos Municipais (RSM) se subdividem em diversos componentes, tais como vidro, restos de alimentos, plásticos, têxteis, entre outros.

Conforme Pimentel (2017), o gerenciamento dos resíduos sólidos no Brasil é de responsabilidade dos municípios, que devem seguir as diretrizes estabelecidas pela Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS). Essa política tem como principal objetivo assegurar a coleta e a destinação final ambientalmente adequada dos resíduos. Para isso, são adotadas as chamadas rotas de reciclagem, que englobam as etapas de geração, coleta, transporte, transbordo, triagem ou tratamento e, por fim, a destinação final.

Segundo a ABRELPE (2022), o Brasil gerou, em 2022, cerca de 81,8 milhões de toneladas de resíduos sólidos urbanos (RSU). Desse montante, entre 30% e 40% são resíduos secos com potencial para reaproveitamento, sendo que 16,5% correspondem a plásticos e 13,2% a papel e papelão, conforme aponta o IPEA (2017).

Uma parcela significativa dos resíduos plásticos ainda é destinada a aterros sanitários ou à incineração, o que representa uma prática insustentável e contrária aos princípios da economia circular (Clasen et al., 2024). De acordo com dados disponibilizados pelo Governo Federal, apenas 5,3% desses resíduos, que possuem potencial de reaproveitamento, são efetivamente reciclados (Khan et al., 2022).



Outro resíduo a ser considerado e que vem aumentando nos últimos anos, é aquele proveniente de equipamentos elétricos e eletrônicos (EEE), como televisores, computadores e eletrodomésticos, amplamente utilizados no cotidiano doméstico e corporativo. Esse cenário contribuiu para que a indústria eletrônica se tornasse a maior e a que apresenta o crescimento mais acelerado no mundo, impulsionada pela crescente disponibilidade de recursos físicos (Gu et al., 2016).

De acordo com Liu et al. (2023), os resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos (REEE) estão entre os fluxos de resíduos que apresentam maior crescimento global, com uma taxa anual estimada entre 4% e 5%. Calcula-se que, em 2016, foram geradas cerca de 44,75 milhões de toneladas de lixo eletrônico em todo o mundo, número que aumentou para 53,6 milhões de toneladas em 2019 (He et al., 2021). Contudo, a reciclagem não acompanha o crescimento global desses resíduos. Em 2019, apenas 9,3 milhões de toneladas de lixo eletrônico foram coletadas e recicladas formalmente, correspondendo a apenas 17,4% do total gerado (Da Silva; Leite, 2023).

A reciclagem de resíduos eletroeletrônicos é concentrada principalmente na Europa, que responde por 46,7% do total reciclado, seguida pela Ásia, com 13,3%, América e Oceania, ambas com 10%, e África, com apenas 1,1%. A categoria “Global” representa 18,9% do total, refletindo a contribuição combinada de todas as regiões na reciclagem desses resíduos (Bhoi, 2024).

A reciclagem de resíduos eletroeletrônicos no Brasil alcança apenas 3%, o que representa uma preocupação diante do crescimento anual de aproximadamente 4% na geração desses resíduos. Além disso, o país ocupa a quinta posição mundial na produção de resíduos eletroeletrônicos (Da Silva; Leite, 2023). Estudos indicam que somente 2% dos celulares descartados pelos consumidores são encaminhados para empresas especializadas, enquanto 98% acabam sendo descartados de forma inadequada ou armazenados nas residências (Pafume et al., 2020).

Clasen et al. (2024) destacam a existência de três categorias de reciclagem: física, química e biológica/enzimática. Cada tipo de reciclagem possui um objetivo específico, o que exige uma avaliação cuidadosa do material a ser reciclado e do resultado desejado.

Recentemente, a Economia Circular (EC) tem se destacado mundialmente como uma alternativa ao modelo convencional de produção e consumo, que se apoia no crescimento incessante e no uso intensivo de recursos naturais (Ghisellini, Cialani e Ulgiati, 2016). Além disso, a adoção de processos de tratamento de resíduos pode fomentar a geração de emprego e renda para a comunidade local, ao mesmo tempo em que reduz a exploração dos recursos naturais e minimiza os impactos ambientais causados pelas atividades humanas. Portanto, a implementação de novas tecnologias de tratamento proporciona vantagens não apenas ambientais, mas também econômicas, políticas e sociais, incluindo a melhoria das condições de trabalho dos catadores, conforme destacado por Henríquez (2016).

Dentro desse panorama, entender a conexão entre a gestão dos resíduos sólidos e os indicadores dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) é essencial para desenvolver estratégias integradas e eficazes. Nesse sentido, o objetivo deste trabalho é avaliar rotas de reciclagem de resíduos plásticos e eletroeletrônicos em um município de

pequeno porte. O método é um estudo de caso, foram coletados os dados da produção durante 6 meses, foram feitas entrevistas e análise de documentos.

2. Metodologia

A presente pesquisa tem caráter exploratório e descritiva de um estudo de caso, para alcançar o objetivo geral deste trabalho, são utilizados os fundamentos da pesquisa quantitativa. Esse tipo de abordagem busca identificar relações de causalidade e características de um fenômeno, realizando a coleta de dados e sua análise por meio de técnicas estatísticas (Rodrigues et al., 2007).

Com base nesses conceitos metodológicos, este estudo adotará uma abordagem básica, pois envolverá a análise das diferentes rotas de reciclagem dos resíduos sólidos plásticos e eletroeletrônicos no município, bem como seus impactos ambientais. Conforme apontam Al-Salem, Lettieri e Baeyens (2010), o objetivo é apresentar uma análise dos processos relacionados à recuperação, tratamento e reciclagem desses resíduos.

2.1 Caracterização do objeto de pesquisa

O presente estudo visou avaliar o processo em uma empresa localizada em um município de pequeno porte. Essa cidade está situada na região Norte do Estado do Paraná, no Vale do Ivaí, e, conforme o último censo do IBGE, realizado em 2022, possui uma população de 21.408 habitantes. A distribuição populacional é composta por 90,44% de moradores em área urbana e 9,56% em áreas rurais. Na Figura 1, apresenta-se o mapa da região onde o estudo será conduzido.

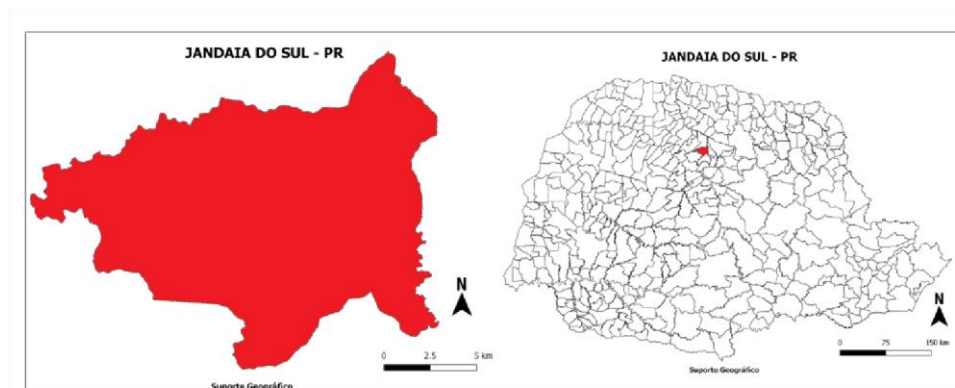


Figura 1: Localização da área de estudo.

Fonte: Adaptado de Suporte Geográfico, (2025)

A empresa Alpha atua há quatro anos na coleta e reciclagem de plásticos e resíduos eletroeletrônicos. Seu foco principal está no reaproveitamento de polietileno de baixa e alta densidade, realizando a separação adequada dos materiais. No caso dos resíduos eletroeletrônicos, a empresa realiza desmontagem, separação e trituração,

exceto para lâmpadas, pilhas e toners de impressoras, que ficam fora do processo. A empresa conta com uma equipe de cinco funcionários e uma infraestrutura de cerca de 700 m², equipada para desmontagem, trituração, corte e lavagem dos materiais.

2.2 Planejamento da pesquisa

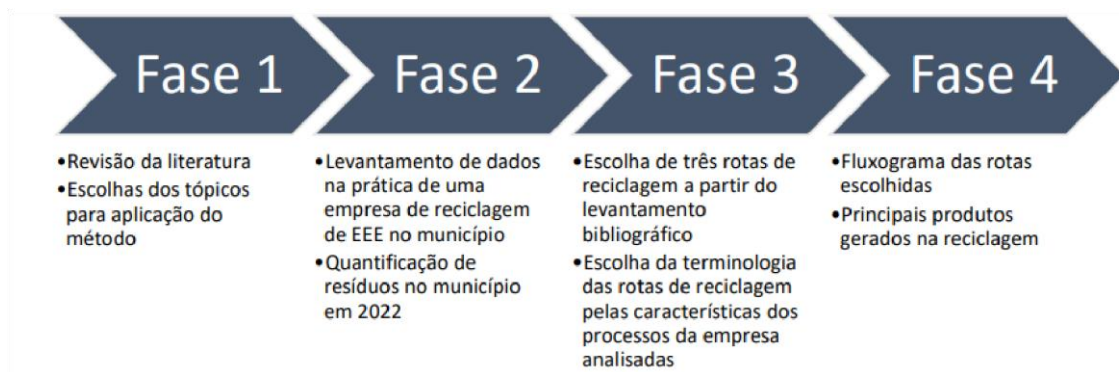


Figura 2: Macrofases da pesquisa
Fonte: Os autores (2024).

A Figura 2 apresenta as fases da pesquisa. Na primeira fase, foi realizada uma revisão da literatura sobre economia circular, com ênfase na reciclagem de plásticos e resíduos eletroeletrônicos, especialmente em contextos de municípios de pequeno porte. Esse levantamento permitiu identificar os principais referenciais teóricos e metodológicos, além de selecionar os tópicos mais relevantes para embasar a aplicação do método adotado na pesquisa.

A segunda fase consistiu no levantamento de dados práticos junto à empresa Paraná Recicla, localizada no município estudado. Foram coletadas informações sobre a quantidade de resíduos plásticos e eletroeletrônicos processados mensalmente, considerando um período de três meses. Esses dados foram fundamentais para subsidiar as decisões nas etapas seguintes da pesquisa.

Na terceira e quarta fase, foram definidas três rotas de reciclagem, selecionadas a partir do levantamento bibliográfico e alinhadas às características operacionais da empresa. Foi elaborado um fluxograma detalhado, representando o fluxo dos materiais e as etapas dos processos, como separação, trituração e transformação dos resíduos.



Também foram identificados os principais produtos gerados, como plásticos reciclados, metais e outros materiais destinados à reutilização como matéria-prima.

2.3 Coleta, obtenção e tabulação dos dados

A obtenção dos dados foi precedida por uma revisão de literatura em fontes nacionais e internacionais, como Science Direct, Elsevier, IPEA e Google Acadêmico, proporcionando uma base teórica sólida sobre o manejo de resíduos plásticos e eletroeletrônicos. A pesquisa adotou uma abordagem quantitativa e qualitativa, permitindo analisar características dos fenômenos e identificar relações, com suporte de técnicas estatísticas (Rodrigues et al., 2007).

Foram analisados os volumes de resíduos eletroeletrônicos (REEE) e plásticos processados pela empresa, possibilitando entender o fluxo produtivo e a geração de valor no reaproveitamento desses materiais. A categorização dos REEE foi baseada na Diretiva 2012/19/EU, adaptada com a classificação de Kunrath (2015) em sete grupos, visando melhor adequação à realidade da empresa.

A coleta de dados ocorreu por meio de questionário estruturado, entrevistas com colaboradores e observação direta durante três meses. Foram identificados e cronometrados os tempos dos principais processos operacionais da empresa, por meio de observações diretas. As informações foram tabuladas e analisadas em conjunto com os representantes da empresa, permitindo maior precisão na representação das operações.

Para a construção das rotas de reciclagem e visualização dos fluxos de materiais, foi utilizado o software *e!Sankey*, que possibilitou a elaboração de diagramas representativos do processo produtivo. Um fluxograma detalhado para três rotas de reciclagem — polietileno, REEE e cabos de antena — mapeando etapas, entradas e saídas de materiais e recursos envolvidos. A coleta de dados ocorreu por meio de questionário estruturado, entrevistas com colaboradores e observação direta durante três meses, abrangendo processos, volumes e recursos operacionais.

3. Resultados e discussão

2.4 Quantificação dos resíduos

Este estudo analisou a gestão dos resíduos eletroeletrônicos, cabos de antena e polietileno em uma empresa de um município de pequeno porte no norte do Paraná. Ao longo de três meses, foram mapeadas as rotas de reciclagem, quantificados os materiais processados e identificado seu destino final.

A reciclagem do polietileno ocorre por meio de uma empresa terceirizada parceira, aplicando os princípios da logística reversa e da economia circular. Os resíduos eletroeletrônicos são obtidos principalmente de associações de catadores, pontos de coleta, doações e compras na cidade e região. Já os cabos coaxiais de antena são coletados de forma esporádica, por meio de compras de moradores e clientes locais.

A Figura 3 ilustra um ecoponto de coleta de resíduos eletroeletrônicos instalado na Universidade Federal do Paraná, no município estudado.



Figura 3: Ponto de coleta de EEE.
Fonte: Os autores (2024).

Durante o período analisado, a empresa separou para reciclagem, mensalmente, cerca de 2.520 kg de polietileno, 5.397 kg de resíduos eletroeletrônicos e 371 kg de cabos de antena. Projetando esses dados para um ano, os volumes chegam a 30.240 kg de polietileno, 64.764 kg de eletroeletrônicos e 4.448,4 kg de cabos de antena. A Tabela 4 apresenta o levantamento das quantidades coletadas desses resíduos no período de três meses.

	Quantidade
Material	Média
Cabo Coaxial (5/8 e 7/8)	371
Polietileno	2520
Sucata Eletrônica	5397

Tabela 1: Quantidade de resíduos coletados em três meses
Fonte: Os autores (2024)

Diante disso, foi realizada a quantificação da composição de uma tonelada de resíduos de equipamentos eletroeletrônicos (REEE), polietileno e cabos coaxiais. O objetivo foi identificar a proporção dos materiais presentes, como metais, plásticos e outros componentes, permitindo avaliar o potencial de reutilização e reciclagem.

Os resultados estão apresentados nas Tabelas 1,2 e 3, que mostram a distribuição percentual dos materiais em cada tipo de resíduo analisado. Essa análise facilita a visualização das principais frações recicláveis e sua contribuição no processamento de uma tonelada de resíduos.

Composição de uma tonelada de resíduos eletroeletrônicos misto	
Componente	%
Ferro	29
Cobre	6 a 10
Fibras e plásticos	8 a 10
Alumínio	4 a 6
Papel e embalagem	0,1 a 0,5
Resíduos não recicláveis	30 a 45

Tabela 2: Composição de uma tonelada de resíduos eletrônicos misto

Fonte: Os autores (2024)

A análise da composição de uma tonelada de resíduos eletroeletrônicos mostrou a predominância de ferro (29%), material de alta importância para reciclagem devido ao seu valor econômico e ampla aplicação. O cobre, representando de 6% a 10%, também se destaca por seu alto valor agregado e pela capacidade de reduzir a necessidade de extração de matéria-prima. Fibras e plásticos correspondem de 8% a 10%, mas sua reciclagem é mais complexa, devido à diversidade de tipos e à necessidade de processos específicos de separação. O alumínio aparece entre 4% e 6%, sendo altamente reciclável e relevante para a economia de recursos naturais.

Por outro lado, resíduos não recicláveis, como vidros especiais e cerâmicas, variam de 30% a 45%, representando um dos principais desafios, especialmente pela ausência de tecnologia adequada na empresa para separação e destinação correta. Na análise dos cabos coaxiais, verificou-se que materiais não recicláveis, como PEAD e borracha, somam 55%, enquanto o cobre e o alumínio, de alto valor comercial, representam 24% e 21%, respectivamente.

Composição de uma tonelada de polietileno compactado	
Componente	%
PEAD	38 a 43
PeEBD	40 a 45
Papelão	4 a 5
Borracha	2 a 5
Resíduos não recicláveis	1 a 2

Tabela 3: Composição de uma tonelada de polietileno

Fonte: Os autores (2024)

A análise de uma tonelada de polietileno compactado revelou que sua composição é majoritariamente de PEAD (38%-43%), utilizado em embalagens rígidas e tubos, e PEBD (40%-45%), aplicado em filmes plásticos e sacos de lixo. Também foram identificadas pequenas proporções de papelão (4%-5%), borracha (2%-5%) e resíduos não recicláveis (1%-2%), indicando contaminação no material.

Apesar dos desafios relacionados à separação dos diferentes tipos de polietileno e à presença de contaminantes, o alto percentual de PEAD e PEBD garante um bom potencial de reciclagem. Esse processo é fundamental para reduzir impactos ambientais e conservar recursos naturais, desde que sejam adotados métodos eficientes que assegurem a qualidade do material reciclado.

Cabos Coaxiais 5/8 e 7/8

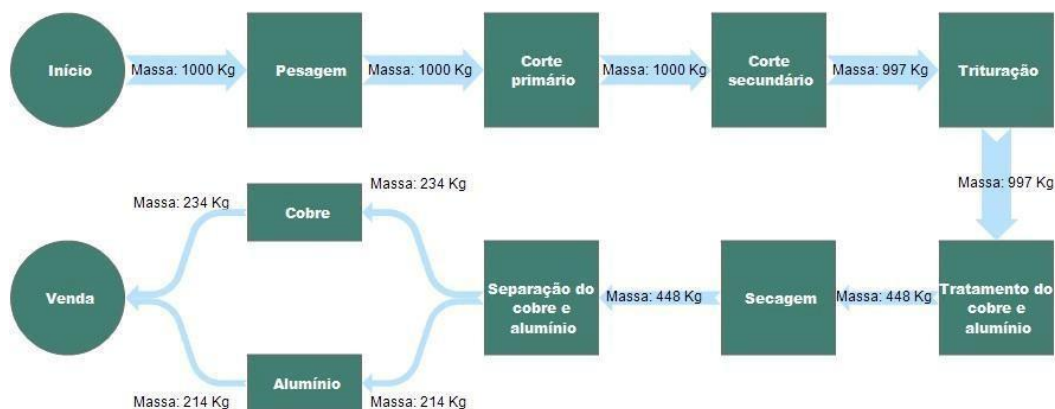


Figura 4: Fluxograma dos Cabos Coaxiais.

Fonte: Os autores (2024).

A Figura 4 apresenta o fluxograma descrito do processo de reciclagem de cabos coaxiais dos tipos 5/8 e 7/8, comuns em torres de antenas, com foco na recuperação de cobre e alumínio para reaproveitamento industrial. O processo inicia com o recebimento e pesagem dos cabos na empresa. Em seguida, os cabos passam por dois cortes para reduzir seu tamanho, facilitando a trituração posterior.

Após a trituração, o material é peneirado para ajustar o tamanho dos grânulos e segue para a separação por gravidade e vibração, onde metais mais densos (cobre e alumínio) se separam da borracha e polietileno. Os materiais úmidos são então secos, geralmente ao sol. Como a separação inicial não é completamente eficaz, uma segunda etapa de separação é realizada para garantir a pureza dos metais, que ficam prontos para comercialização como matéria-prima. A seguir é apresentado a Figura 5 com a reciclagem de cobre.



Figura 5: Reciclagem de REEE – Extração do Cobre.
Fonte: Os autores (2024)

A Figura 6 apresenta o fluxograma do processo de reciclagem do polietileno de alta densidade (PEAD) e baixa densidade (PEBD), usados principalmente em embalagens. O processo começa com a coleta e armazenamento dos materiais, seguida pela separação dos diferentes tipos de polietileno e outros materiais, como papelão.

Depois da separação, os materiais são avaliados e, se estiverem sujos, passam por lavagem para remover impurezas. Por fim, os resíduos limpos são ensacados e preparados para as etapas seguintes, que podem incluir trituração, fusão e moldagem para fabricação de novos produtos plásticos.

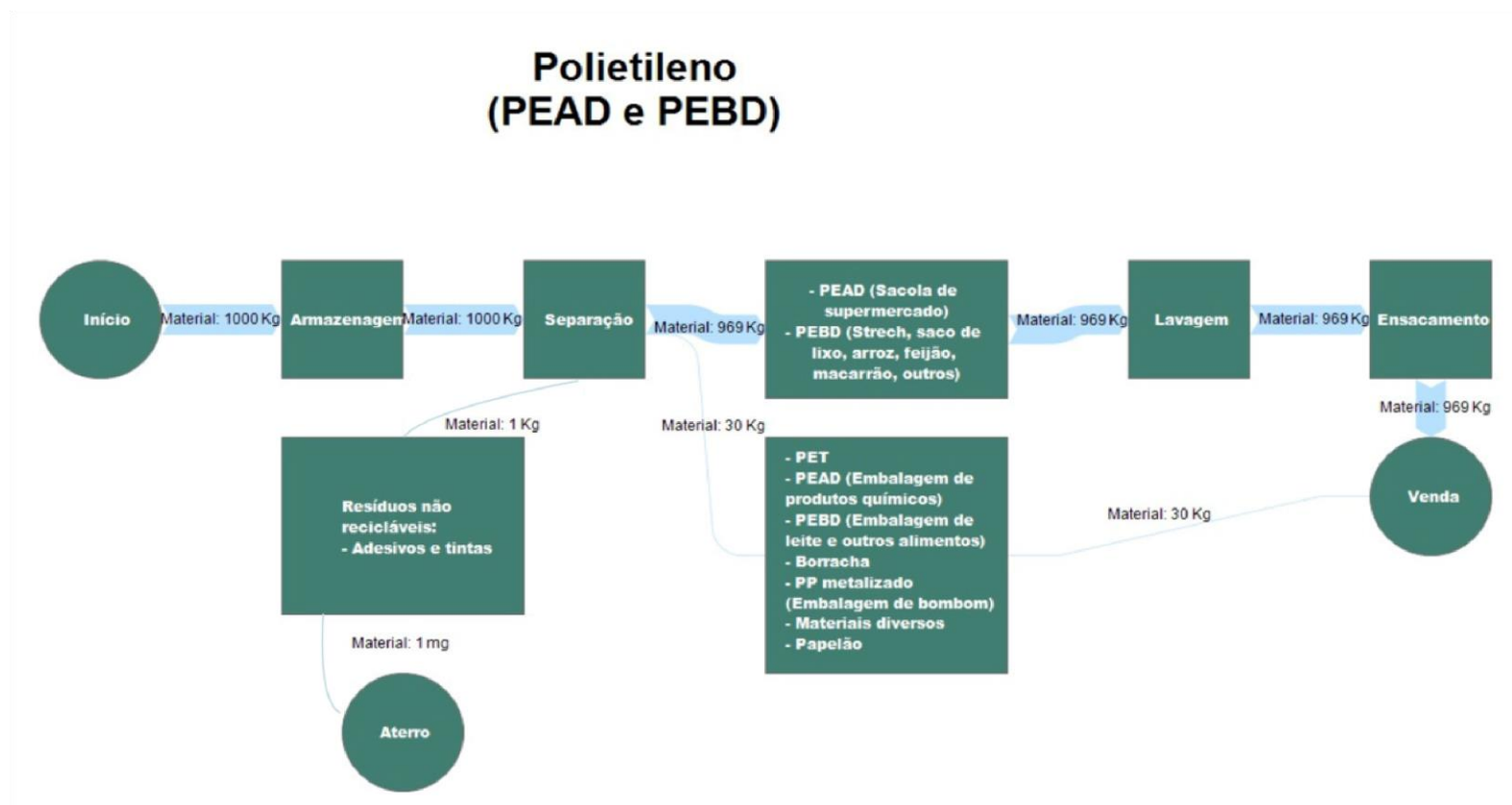


Figura 6: Fluxograma do Polietilenos.
Fonte: Os autores (2024).

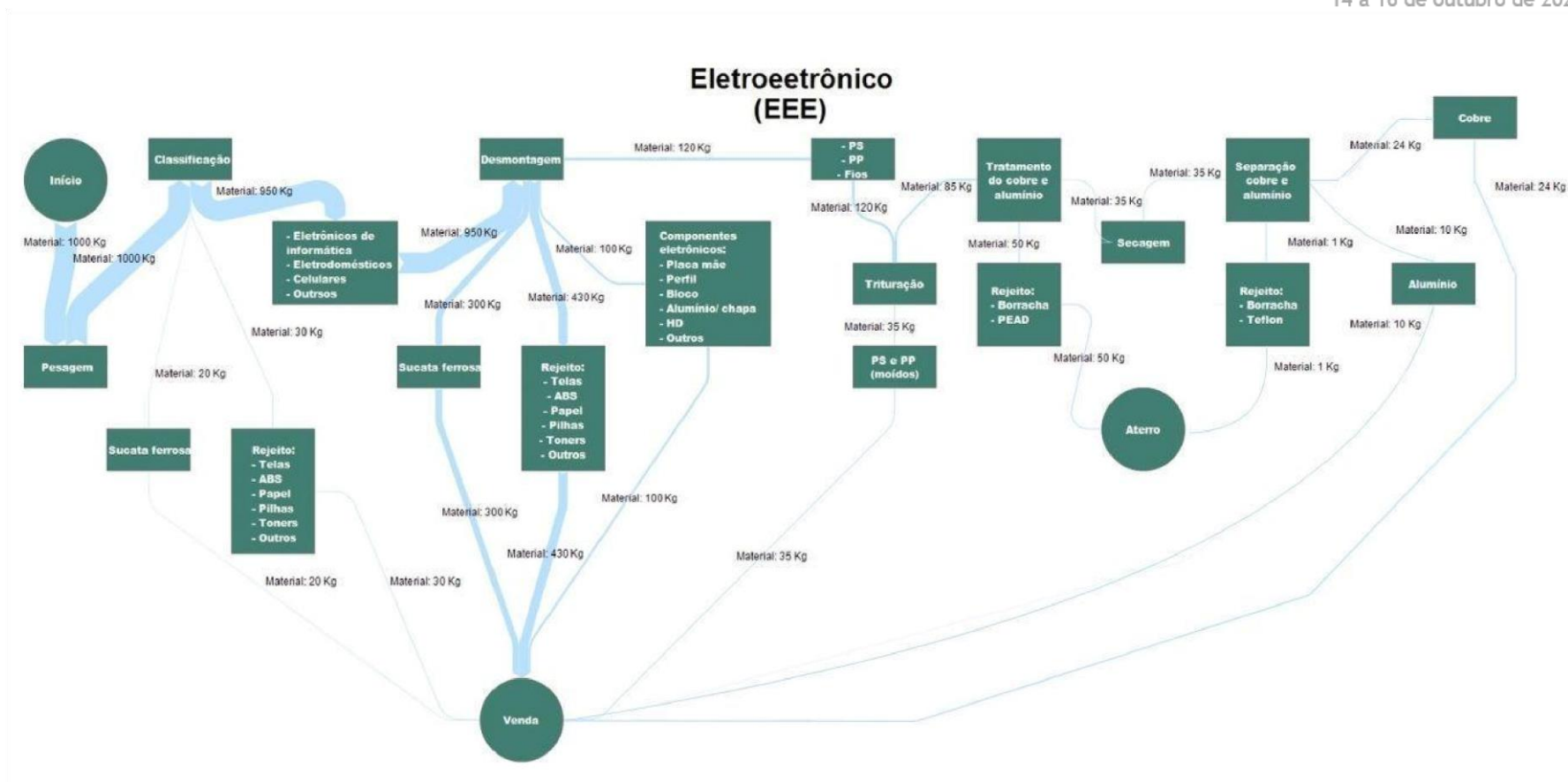


Figura 7: Fluxograma Geral de eletroeletrônicos.
Fonte: Os autores (2024).



A Figura 7 apresenta o fluxograma do processo de reciclagem de equipamentos eletroeletrônicos. O início do processo começa com a recepção dos materiais provenientes de residências, empresas e instituições. Após a pesagem para quantificar o total recebido, os equipamentos são classificados por tipo e material para facilitar a desmontagem manual.

Na desmontagem, são separados eletrônicos de informática, eletrodomésticos e celulares. Componentes como placas de circuito impresso, carcaças e peças pequenas são encaminhados diretamente a clientes sem necessidade de processamento adicional. Sucata ferrosa e rejeitos, que a empresa não pode reciclar, são separados e vendidos para reciclagem por terceiros.

Para materiais como fios e certos plásticos, é realizada a trituração para facilitar a separação dos materiais valiosos. Depois da trituração, os plásticos são enviados aos clientes, e os fios passam por um processo de separação por vibração, similar ao descrito no fluxograma dos cabos coaxiais 5/8 e 7/8.

3. Considerações finais

Este trabalho teve como objetivo quantificar o fluxo de entrada e saída de plásticos e resíduos eletroeletrônicos em uma empresa de reciclagem, além de propor três rotas de reciclagem adaptadas às suas características operacionais.

O desenvolvimento dos fluxogramas permitiu uma visão integrada das etapas envolvidas, demonstrando como os materiais podem ser convertidos em novos produtos, como grânulos plásticos reciclados ou metais recuperados. Os resultados reforçam a importância de uma gestão eficiente de resíduos e da personalização das rotas para atender às demandas específicas, destacando o papel da reciclagem na economia circular para promover a sustentabilidade e reduzir impactos ambientais.

Conclui-se que a análise composicional permitiu identificar as principais frações recicláveis e os desafios associados aos resíduos não recicláveis. Além disso, os fluxogramas elaborados evidenciam a complexidade e a importância das etapas de separação, trituração e purificação para garantir a qualidade dos materiais reciclados. Os dados gerados podem subsidiar estratégias para aprimorar a gestão de resíduos, contribuir com a economia circular e apoiar futuras pesquisas no setor.

Como proposta para trabalhos futuros, sugere-se a realização de análises ambientais por meio de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), visando quantificar os impactos da reciclagem desses resíduos. Além disso, recomenda-se a investigação de tecnologias para o aproveitamento das frações não recicláveis. Estudos de viabilidade econômica também podem ampliar a aplicabilidade dos resultados.

Agradecimentos

Agradecemos ao Centro de Tecnologias Minerais CETEM/MCTI, que por meio do Projeto RECUPER3 apoiou o desenvolvimento deste trabalho.

Referências

ABRELPE - Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. “Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil”. ABRELPE [2022].



BHOI, Neeraj Kumar. Advancements in E-waste recycling technologies: A comprehensive overview of strategies and mechatronics integration for future development. **Sustainable Materials and Technologies**, p. e01182, 2024.

CARVALHO, J. T. A. DE. **Política nacional de resíduos sólidos e rotas tecnológicas de reciclagem no município de Salvador**. 27 out. 2014.

CLASEN, A. P. et al. Advancing towards circular economy: Environmental benefits of an innovative biorefinery for municipal solid waste management. **Sustainable Production and Consumption**, v. 46, p. 571–581, 1 maio 2024.

DA SILVA, Lorena Albuquerque Adriano; LEITE, Eyshila Gabrielly Rodrigues. Mapeamento de patentes sobre reciclagem de resíduos eletroeletrônicos. in: sustentabilidade aplicada ao ambiente urbano: estratégias sustentáveis para a melhoria das cidades brasileiras. **Editora Científica Digital**, 2023. p. 79-88.

DE OLIVEIRA, Ederson Dias; VESTENA, Leandro Redin; VESTENA, Carla Luciane Blum. Efeitos da urbanização no ribeirão cambará, jandaia do sulpr. **REVISTA EQUADOR**, v. 5, n. 2, p. 139-158, 2016.

GHISELLINI, Patrizia; CIALANI, Catia; ULGIATI, Sergio. A review on circular economy: the expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems. **Journal of Cleaner production**, v. 114, p. 11-32, 2016.

GU, Yifan et al. Waste electrical and electronic equipment (WEEE) recycling for a sustainable resource supply in the electronics industry in China. **Journal of Cleaner Production**, v. 127, p. 331-338, 2016.

HE, Yifeng et al. Driving sustainable circular economy in electronics: A omprehensive review on environmental life cycle assessment of e-waste recycling. **Environmental Pollution**, p. 123081, 2023

HENRÍQUEZ, A. I. M. Análise de Ciclo de Vida (ACV) de Sistemas Integrados de Tratamento e disposição final de Resíduos Sólidos Urbanos para cidades de médio porte. 22 set. 2016.

IPEA – INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA. **Brasil em desenvolvimento: Estado, planejamento e políticas públicas**. Brasília: Ipea, 2017.

KHAN, S. et al. Technologies for municipal solid waste management: Current status, challenges, and future perspectives. **Chemosphere**, v. 288, p. 132403, 1 fev. 2022.

KUNRATH, Jorge Luiz. Resíduos eletroeletrônicos: um diagnóstico da cadeia de processamento. 2015.

PAFUME, Robson et al. Panorama da reciclagem de eletroeletrônicos no brasil, 2020.

PIMENTEL, C. H. L. A gestão dos resíduos sólidos urbanos no município de João Pessoa/PB - à luz das rotas tecnológicas de tratamento. **doctoralThesis**. Disponível em: . Acesso em: 11 jun. 2024.

RODRIGUES, William Costa et al. Metodologia científica. Faetec/IST. Paracambi, v. 2, 2007.



SEMINÁRIO INTERNACIONAL DE RESÍDUOS DE EQUIPAMENTOS ELETROELETRÔNICOS

14 a 16 de outubro de 2025

AVALIAÇÃO DE ESTRATÉGIAS METODOLÓGICAS NO GERENCIAMENTO DE RESÍDUOS ELETRÔNICOS: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA

Autores: Carlos Eduardo Bueno^{1*}; Abner Fernandes Souza da Silva²; Pedro Henrique Muguinda Kuniyoshi³; Virgínia Aparecida Silva Moris⁴

¹ Universidade Federal de São Carlos, Campus Sorocaba.

*carlos@ufscar.br

Resumo: Considerando o crescente desafio de reduzir o impacto ambiental aliado à necessidade de viabilidade socioeconômica na gestão e no tratamento de resíduos eletrônicos, esta revisão sistemática teve como objetivo identificar metodologias de gestão utilizadas, fatores críticos de sucesso (FCS) na adoção de práticas pelos tomadores de decisão, empregados para avaliar a eficiência de processos e estratégias de gestão. A pesquisa foi conduzida nas bases Scopus e Web of Science, abrangendo publicações dos últimos cinco anos, seguindo o protocolo PRISMA em conjunto com o método SPIDER para definição da estratégia de busca, seleção e análise dos estudos. Os resultados apresentam metodologias consolidadas e uma análise cruzada dos critérios do Triple Bottom Line (TBL), evidenciando uma tendência na escolha das metodologias e indicadores empregados pelos autores, indicando caminhos para a adoção de práticas mais sustentáveis e integradas. Conclui-se que os achados oferecem subsídios relevantes para o aprimoramento de políticas públicas, para a tomada de decisão gerencial e para futuras pesquisas na gestão de resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos.

Palavras-chave: Electronic Waste; E-waste; Management; FCS; Circular Economy



1. Introdução

Os resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos (REEE), são compostos por uma vasta gama de aparelhos em fim-de-vida, sendo que computadores e telefones celulares são mais abundantes devido à sua curta vida útil (ROBINSON, 2009). O volume global de REEE tem crescido exponencialmente, impulsionado pela rápida inovação tecnológica e pelo curto ciclo de vida dos dispositivos eletrônicos. Em 2022, o mundo gerou 62 bilhões de quilos de REEE, dos quais apenas 22,3% (13,8 bilhões de quilos) foram devidamente coletados e reciclados. Ainda, há uma estimativa de aumento para 82 bilhões de quilos até 2030 (Baldé et al., 2024). Tais dados apresentam um desafio no cumprimento do ODS 12, que trata sobre o consumo e produção sustentável, presente no relatório mundial apresentado pela ONU (2023) que visa a redução na produção de resíduos e aumento na taxa de reciclagem até 2030.

A gestão inadequada dos REEE, que muitas vezes envolve o descarte em aterros sanitários ou o processamento por meio de reciclagem informal em países em desenvolvimento, representa um desafio global significativo. Diante desse cenário, a transição para uma economia circular surge como um paradigma promissor, buscando reter o valor dos materiais, reduzir o desperdício e minimizar os impactos ambientais ao longo do ciclo de vida dos produtos eletrônicos (Baldé et al., 2024).

Apesar do crescente reconhecimento da importância de uma gestão sustentável e das tecnologias disponíveis existentes, a literatura ainda apresenta uma lacuna na consolidação das metodologias e estratégias de gerenciamento que explorem as múltiplas dimensões de aspectos da sustentabilidade (Baldé et al., 2024). Este estudo se justifica ao preencher essa lacuna, fornecendo de maneira sistemática uma base conceitual e atualizada que pode guiar pesquisadores, formuladores de políticas e tomadores de decisão na área de gestão dos resíduos eletrônicos.

Os objetivos desta revisão sistemática são: Identificar e analisar as principais metodologias e estratégias atuais no gerenciamento de REEE encontradas na literatura assim como os principais Fatores Críticos de Sucesso (FCS) para a implementação eficaz destas estratégias e também em apontar os principais indicadores de desempenho utilizados para avaliar a eficácia no gerenciamento deste tipo de resíduos.

2. Fundamentação Teórica

Para compreensão da complexidade e escolha de uma gestão eficiente da logística reversa dos REEE, é necessário compreender os principais motivadores na escolha da estratégia e metodologia a ser utilizada. Da perspectiva do tripé da sustentabilidade (TBL) proposto por Elkington (1997), existem três vieses principais a serem seguidas, sendo eles: aspectos com impactos sociais, ambientais e econômicos. Visando atender os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) estabelecidos pela ONU (2023) que elenca 17 objetivos através de um planejamento a ser alcançado até 2030, onde diversos países implementaram ou contam com políticas nacionais e metas próprias para estabelecer indicadores de desempenho a serem acompanhados localmente, como a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) estabelecida pelo Governo Federal no Brasil (2010) para prevenção e redução na geração de resíduos sólidos, estendendo a responsabilidade dessa tarefa de forma compartilhada à todos: população, empresas e governo.

Os resíduos e produtos que se encontram no fim de vida representam tanto desafios como oportunidades para as todas as esferas mencionadas, possibilitando a conservação de

recursos naturais, redução de custos e criação de novos empregos, por exemplo, através da implantação de uma Economia Circular, segundo a Ellen MacArthur Foundation (2013).

3. Metodologia

Este estudo seguiu os princípios metodológicos do protocolo PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*), ferramenta utilizada durante uma revisão de literatura para elaborar um modelo sistemático de pesquisa que poderá auxiliar pesquisadores futuros a compreenderem cada fase de uma revisão, permitindo manter uma documentação que possibilite a replicação com base nos parâmetros estabelecidos (PAGE et al., 2021). O objetivo foi identificar metodologias de gestão utilizadas, fatores críticos de sucesso (FCS) na adoção de práticas pelos tomadores de decisão, empregados para avaliar a eficiência de processos e estratégias de gestão.

3.1 Estratégia de Busca

Para determinar a *string* e operadores desta pesquisa, foi utilizado o *framework* SPIDER de pesquisa estruturada para a exploração de fenômenos voltados para estudos qualitativos ou mistos (COOKE; SMITH; BOOTH, 2012), onde foram elencadas as variações dos termos principais por cada categoria, conforme descrito na tabela 1.

Referência	Objetivo referencial	Dado referencial
S (Sample):	Resíduos eletrônicos.	"Electronic waste" ; "WEEE" ; "e-waste"
Pi (Phenomenon of Interest):	Metodologias de gestão.	"Framework" ; "Method" ; "Comparison" ; "approaches" ; "Management" ; "Process"
D (Design):	Coleta para análise através de bases de dados (períodos por pares).	Scopus e Web of Science
E (Evaluation):	Indicadores utilizados na avaliação da eficiência da gestão de resíduos eletrônicos.	"Evaluation" ; "Sustainability indicators" ; "KPI" ; "assessment" ; "rate calculation"
R (Research Type):	Pesquisa aplicada, com o objetivo de identificar e recomendar metodologias e estratégias.	Artigos

Tabela 1 – Framework SPIDER de elaboração da string de busca

Fonte: Adaptado de Cooke, Smith e Booth (2012).

A busca foi realizada nas seguintes bases de dados eletrônicas: Scopus e Web of Science. Os termos utilizados na busca foram definidos com base na combinação de uma *string* com operadores booleanos específicos, da seguinte forma para a base Scopus e de forma semelhante para a Web of Science: *TITLE-ABS* ("Electronic waste" OR "WEEE" OR "e-waste") AND *TITLE-ABS* ("Framework" OR "Method" OR "Comparison" OR

"approaches" OR "Management" OR "Process") AND TITLE-ABS ("Evaluation" OR "Sustainability indicators" OR "KPI" OR "assessment" OR "rate calculation").

3.2 Critérios de Inclusão e Exclusão

Buscando a seleção de estudos recentes sobre o tema proposto, foram incluídos estudos que atendiam aos seguintes critérios: (i) artigos publicados em periódicos científicos revisados por pares; (ii) que abordassem diretamente o tema da revisão; (iii) disponíveis em texto completo; (iv) dentro do recorte temporal de 5 anos; e (v) linguístico estabelecido, sendo de língua inglesa. Foram excluídos os seguintes estudos: (i) artigos de opinião, resumos de congresso, dissertações, teses, revisões narrativas; (ii) estudos com dados insuficientes para análise; (iii) duplicatas identificadas nas bases; (iv) artigos que não estavam disponíveis para o autor na íntegra; e (v) por fim foi realizado a leitura do título e do resumo dos artigos obtidos com o objetivo de refinar o resultado relacionado ao fenômeno de interesse desta RSL.

Os critérios utilizados para este refinamento foram a exclusão de artigos: cujo objetivo estava diretamente relacionado a um único viés da sustentabilidade (como na avaliação de riscos e impactos ambientais, no beneficiamento econômico ou no viés social), com o foco na avaliação de aproveitamento de recuperação de um determinado recurso (como cobre, ouro, terras raras), artigos cujo objetivo esteja relacionado à reformulação do início do ciclo de vida (berço) ou otimização de design de um produto, artigos de análises sobre contaminações de solo ou consequências de descarte inadequado e artigos com títulos e resumos que não estão claros sobre seu objetivo.

3.3 Seleção dos Estudos

Após a aplicação dos critérios de elegibilidade, os artigos potencialmente relevantes foram selecionados para fichamento, conforme representado pelo fluxograma PRISMA da figura 1:

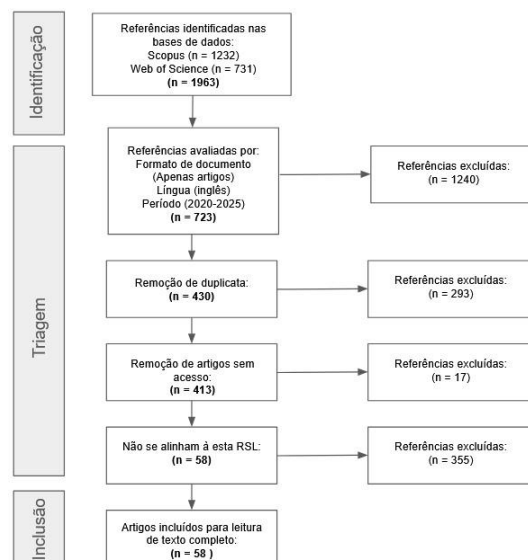


Figura 1 – Fluxograma PRISMA.

Fonte: Elaboração do autor utilizando o método PRISMA (PAGE et al., 2021).

3.4 Extração e Análise dos Dados

Os dados dos estudos selecionados foram extraídos por meio de um formulário padronizado, contemplando informações como título, autores, ano de publicação, país, objetivos (gerais e específicos), metodologia empregada, amostra, principais resultados, conclusões e lacunas identificadas pelos autores. A síntese dos dados foi conduzida de forma qualitativa, a partir da categorização temática dos achados, complementada por uma classificação que permitiu relacionar cada artigo aos objetivos específicos delineados neste estudo.

Para a extração e Análise dos dados foram utilizados as seguintes ferramentas de apoio: o site Rayyan para remoção de duplicatas e validação dos critérios de inclusão e exclusão conforme nas fases iniciais da metodologia; o Google Planilhas para realização do fichamento (padronização dos resultados resultantes desta triagem); e uso da IA Perplexity (versão PRO) para auxílio no preenchimento sumarizado da planilha de fichamento com de identificação de padrões de frequências das metodologias e indicadores, presentes nos resultados encontrados.

4. Resultados

A seção de resultados foi dividida em duas partes principais para garantir clareza e abrangência. Primeiramente, a Categorização de estudos selecionados oferece uma visão organizada do universo da pesquisa, agrupando os artigos com base em critérios relevantes que facilitam a compreensão do panorama geral e das tendências emergentes na literatura. Em seguida, a seção Principais metodologias, ferramentas e indicadores utilizados na literatura apresentando os caminhos trilhados pelos pesquisadores, descrevendo os métodos empregados e as ferramentas tecnológicas utilizadas.

4.1 Categorização de estudos selecionados

Dos estudos selecionados para leitura e análise, foi realizada uma categorização em quatro possíveis grupos que respondem às seguintes perguntas de pesquisas estipuladas: **Pergunta 1:** O estudo explora uma (ou um conjunto de) metodologia ou ferramenta para o gerenciamento dos resíduos eletrônicos? **Pergunta 2:** O estudo explora um (ou um conjunto de) indicador ou Fator Crítico de Sucesso para implantação ou monitoramento dos resíduos eletrônicos? **Ambas:** O estudo explora satisfatoriamente ambas as perguntas ou **nenhuma:** O estudo não responde diretamente ou satisfatoriamente nenhuma das duas perguntas apresentadas.

Foi realizada então uma nova categorização das principais metodologias, ferramentas e indicadores presentes nos estudos compreendidos neste recorte da literatura e no compilado a seguir presente na figura 3 estão os conjuntos que se enquadraram em mais de um grupo (Pergunta 1, Pergunta 2 e Ambos), excluindo, portanto, metodologias, ferramentas e indicadores menos convencionais (fato que será discutido na seção de discussões desta revisão). Os resultados contendo os conjuntos mais relevantes serão mais bem explorados na seção a seguir.

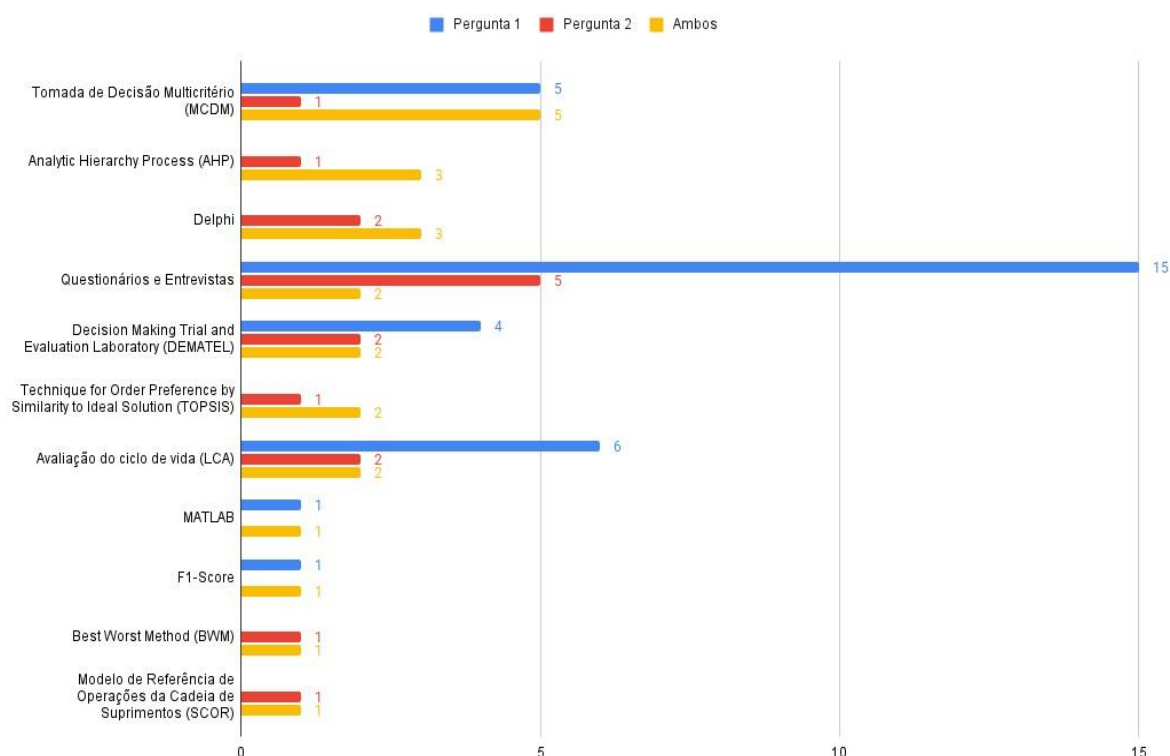


Figura 3 – Gráfico de metodologias dos artigos agrupados nas perguntas de pesquisa desta revisão.

Fonte: Elaboração do autor.

4.2 Principais metodologias, ferramentas e indicadores utilizados na literatura

A literatura apresenta diversos desafios na mitigação do impacto no fim de vida dos REEE, onde a escolha de estratégias são multifacetadas e dependem da ponderação de diferentes aspectos para determinar os Fatores Críticos de Sucesso (FCS) do gerenciamento deste material (YUN ARIFATUL FATIMAH et al., 2024), portanto um ponto característico comum em estudos encontrados é a apresentação de uma avaliação de variações em diferentes cenários, propostas de metodologias, e indicadores, baseadas na tomada de decisão multicritério (MCDM), podendo considerar as diferentes dimensões do TBL, visando atender os aspectos sociais, ambientais e econômicos associados a este tipo de resíduo (KAZANCOGLU; OZKAN-OZEN, 2019).

A utilização da Avaliação do Ciclo de Vida (LCA) como principal medida estratégica para analisar e buscar alternativas visando a redução dos impactos ambientais causados pelos REEE (BOLDOCZKI; THORENZ; TUMA, 2020; NIKOLIC et al., 2024), é realizada pelos autores nas dimensões ambientais e econômicas, como forma de quantificação destes aspectos no fluxo de materiais passíveis de reciclagem e reutilização (AL-KHATIB; FRAIGE, 2024; MAGRINI; JAGODZIŃSKA, 2022; SILVA et al., 2023) enquanto a utilização de uma Análise Social de Ciclo de Vida (SLCA) visa quantificar os impactos sociais envolvidos (PATRIZIA GHISELLINI; PASSARO; SÉRGIO ULGIATI, 2023; TRAVERSO et al., 2024). Já a avaliação de diferentes políticas públicas como principais indicadores e variáveis para análise é utilizada por ALI (2022), SILVA (2024) e

WANG et al. (2025) para validação de uma estratégia que destaca, por sua vez, os aspectos ambientais e sociais.

Uma ferramenta originada de MCDM e que conta com diversas variações exploradas na literatura é a Decision Making Trial and Evaluation Laboratory (DEMATEL), que visa identificar e analisar as relações de causalidade e efeito entre diferentes fatores em um sistema complexo, como as principais barreiras e os indicadores de desempenhos mais influentes, auxiliando na tomada de decisões (WANG; WANG, 2022), permitindo uma análise mais precisa e estratégica das ações prioritárias, como avaliado por Chandra, Yeh e Dutta (2022), quanto as plataformas online de coleta de REEEE. Ao aplicar visando a avaliação de uma cadeia de suprimentos circular, utilizando em conjunto a comparação de Métodos "do Melhor ao Pior" (BWM), JAIN et al. (2022) avaliam o grau de desempenho de operações apresentados dentro de um Modelo de Referência de Operações da Cadeia de Suprimentos (SCOR).

Outros dois métodos variados de MCDM também se destacaram como tendência pela literatura: O Processo de Hierarquia Analítica (AHP) cujo objetivo é determinar um peso e priorização para os diferentes critérios e alternativas que avaliados (KAZANCOGLU; OZKAN-OZEN, 2019) e também a Técnica para Ordem de Preferência por Similaridade à Solução Ideal (TOPSIS) para auxiliar na tomada de decisões através do ranqueamento das estratégias de mitigação com base nos pesos dos critérios, considerando cenários ideais e menos ideais. (KARUPPIAH; SANKARANARAYANAN, 2023, WIBOWO et al., 2021)

Considerando os aspectos diversos somados ao alto grau de incerteza e subjetividade na tratativa da logística reversa dos REEE como precisão sobre quantidade, estoque, transporte, custos operacionais, barreiras, indicadores para monitoramento e melhorias, por exemplo, a utilização da lógica *Fuzzy* e teorias *Grey* para lidar com a imprecisão e a complexidade em cenários reais podem dar suporte à critérios e pesos a serem integrados em uma estratégia mensurável (CHENG; LUAN, 2022; IMNATILA PONGEN; RAY; GUPTA, 2023; KESHAVARZ-GHORABAE et al., 2022; MIJANUR RAHAMAN SEIKH; CHATTERJEE, 2024; RANI; MISHRA, 2020; WANG et al., 2020). Através da compreensão de barreiras para implementação e da efetividade de logística reversa dos REEE em cenários reais, com a perspectiva de diferentes *stakeholders* envolvidos no processo como especialistas, coletores e desmontadores certificados, é possível a melhora da taxa de reciclagem e dos resultados obtidos (NI et al., 2024; OLIVEIRA NETO et al., 2024; WANG et al., 2020).

Além dos aspectos reconhecidos pelo TBL, outros autores como Xu et al. (2020) ampliam a necessidade da avaliação de outros critérios, como em indicadores de eficiência na reciclagem e na recuperação dos materiais para a escolha de melhores estratégias e na avaliação de riscos, como de falhas operacionais no processo adotado. Gonzalez, Collaraoz e Archenti (2025) propõem uma matriz de avaliação desenvolvida através de um sistema de lógica *Fuzzy*, integração e priorização para estabelecer um monitoramento através de indicadores-chave de desempenho (KPI) para formulação de práticas otimizadas.

Devido a natureza subjetiva de determinados critérios, como conscientização de políticas públicas ou logística reversa, diversos artigos também utilizam questionários e entrevistas com especialistas e *stakeholders* envolvidos para assegurar uma análise qualitativa confiável em seus resultados (D'ALMEIDA et al., 2021) e para avaliação estatística de dados em estudos de caso (NGUYEN THANH GIAO; LAM; HONG, 2023), onde o método Delphi também é utilizado para uma análise qualitativa e flexível,

envolvendo especialistas da área e aplicações de critérios para obtenção de um consenso fidedigno e sistemático (AL-KHATIB; FRAIGE, 2024; KAZANCOGLU; MAHESWARI et al., 2020; OZKAN-OZEN, 2019; SILVA et al., 2023).

Embora a revisão apresente os artigos mais relevantes utilizados na atualidade, se faz necessário destacar que a utilização de ferramentas computacionais como o uso do software MATLAB para a modelagem e análise dos dados (FERREIRA et al., 2024; YUAN et al., 2025), o YOLOv8 que é um modelo de visão computacional que pode ser utilizado para classificação, comparação de métricas e aprimoramento utilizado na triagem (P AKHIL RAJEEV et al., 2025), a utilização de critérios e indicadores baseados em aprendizado de máquina, como a análise PESTEL (Política, Econômica, Social, Tecnológica, Legal e Ambiental) e o indicador F1-Score (ALI; SHIRAZI, 2022), por exemplo, podem representar Fatores Críticos de Sucesso a serem adotados futuramente no apoio à escolha da estratégia, critérios e indicadores a serem comparados em diferentes estudos de caso, mesmo representando uma quantidade de trabalhos mais discreta comparado aos demais nos resultados encontrados.

5. Conclusão

A análise cruzada destes critérios, de forma direta e indireta, possibilita uma visão holística da metodologia adotada pelos autores, cuja representação gráfica pode ser observada na figura 4 quanto à escolha das principais metodologias e indicadores encontrados, onde os critérios motivadores para a elaboração das estratégias e a escolha das metodologias na gestão de resíduos eletrônicos parecem estar alinhados diretamente às dimensões do TBL — ambiental, social e econômica — de forma integrada (SMITH; BEHDAD, 2025). Do ponto de vista ambiental, a gestão adequada dos REEE visa reduzir os impactos negativos decorrentes do descarte incorreto, como a contaminação do solo e da água por metais pesados e o aumento de gases de efeito estufa, promovendo a circularidade de materiais e a conservação de recursos naturais (KAZANCOGLU; OZKAN-OZEN, 2019; KESHAVARZ-GHORABAEE et al., 2022; MAGRINI; JAGODZIŃSKA, 2022). Já sob a perspectiva econômica, a escolha de metodologias voltadas para o reuso e reciclagem contribui para a redução de custos com matéria-prima, cria oportunidades de negócios sustentáveis e incentiva a inovação tecnológica, agregando valor ao setor produtivo (KESHAVARZ-GHORABAEE et al., 2022; MAGRINI; JAGODZIŃSKA, 2022). Por fim, no âmbito social, a estratégia prioriza a proteção da saúde pública ao minimizar os riscos associados ao manuseio inadequado de resíduos através de políticas públicas, destacando também a geração de emprego e renda por meio de iniciativas de coleta, triagem e recondicionamento, muitas vezes envolvendo cooperativas e comunidades locais (KAZANCOGLU; OZKAN-OZEN, 2019; KESHAVARZ-GHORABAEE et al., 2022).

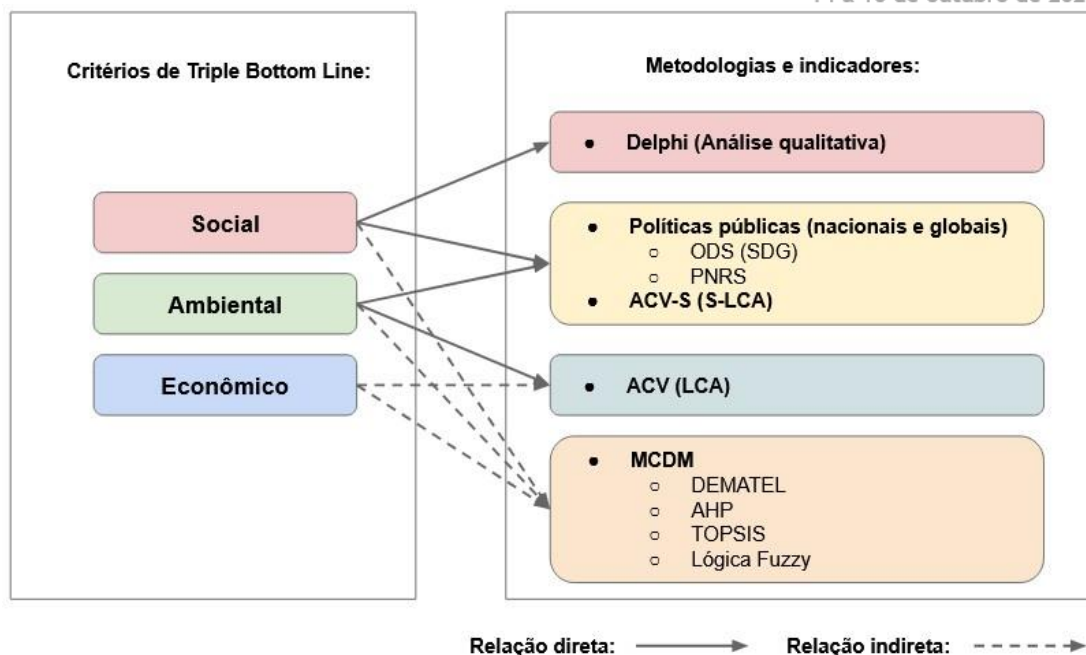


Figura 4 – Relacionamento de critérios TBL em metodologias e indicadores.

Fonte: Elaboração do autor.

A gestão de REEE, embora complexa devido à vasta gama de variáveis e incertezas, encontra na literatura diversas abordagens, metodologias e indicadores promissores. Estruturas consolidadas e confiáveis, como a Avaliação do Ciclo de Vida (LCA), podem embasar a elaboração de planos de gerenciamento eficientes, alinhados a critérios e objetivos específicos. Contudo, a aplicação prática dessas ferramentas em cenários reais apresenta desafios significativos, especialmente em relação ao grau de especialização exigido dos *stakeholders* e à carência de políticas públicas de incentivo. Soma-se a isso a necessidade de capacitação e conscientização dos coletores diretos, aspectos que não podem ser negligenciados. Porém, por meio de uma análise criteriosa dos principais motivadores para a adoção de uma estratégia em determinado cenário, torna-se possível identificar barreiras, definir indicadores de desempenho e estabelecer fatores de sucesso, mesmo em contextos marcados por múltiplas variáveis, fatores externos e incertezas.

Referências

- AL-KHATIB, L. A.; FRAIGE, F. Y. The Potential Material Flow of WEEE in a DataConstrained Environment—The Case of Jordan. **Recycling**, v. 9, n. 1, p. 4, 9 jan. 2024.
- ALI, S.; SHIRAZI, F. A Transformer-Based Machine Learning Approach for Sustainable E-Waste Management: A Comparative Policy Analysis between the Swiss and Canadian Systems. **Sustainability**, v. 14, n. 20, p. 13220, 14 out. 2022.
- BALDÉ, C.P. et al. The Global E-waste Monitor 2024: Quantities, flows and the circular economy potential. Geneva: International Telecommunication Union (ITU) and United Nations Institute for Training and Research (UNITAR), 2024. Disponível em: <https://ewastemonitor.info/the-global-e-waste-monitor-2024/>. Acesso em: 06/07/2025.



BOLDOCZKI, S.; THORENZ, A.; TUMA, A. The environmental impacts of preparation for reuse: A case study of WEEE reuse in Germany. **Journal of Cleaner Production**, v. 252, p. 119736, abr. 2020.

BRASIL. **Lei n.º 12.305, de 02 de agosto de 2010**. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei n.º 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Diário Oficial da União: Brasília, 03 de ago. de 2010.

CHANDRA, P.; YEH, C.-H.; DUTTA, P. Managing strategies for mitigating interacting barriers to sustainable online e-waste collection platforms in India. **Benchmarking: An International Journal**, 19 jul. 2022.

CHENG, C.; LUAN, X. Sorting Center Value Identification of “Internet + Recycling” Based on Transfer Clustering. *Sensors*, v. 22, n. 19, p. 7629–7629, 8 out. 2022. COOKE, A.; SMITH, D.; BOOTH, A. Beyond PICO: the SPIDER Tool for Qualitative Evidence Synthesis. **Qualitative Health Research**, v. 22, n. 10, p. 1435–1443, 24 jul. 2012.

D’ALMEIDA, F. S. et al. On the Hibernating Electronic Waste in Rio de Janeiro Higher Education Community: An Assessment of Population Behavior Analysis and Economic Potential. **Sustainability**, v. 13, n. 16, p. 9181, 16 ago. 2021.

ELKINGTON, John. **The triple bottom line. Environmental management: Readings and cases**, v. 2, 1997.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. **Towards the circular economy: Economic and business rationale for an accelerated transition**. 2013.

FERREIRA, D. S. et al. Electronic waste analysis using laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS) and X-ray fluorescence (XRF): Critical evaluation of data fusion for the determination of Al, Cu and Fe. **Analytica Chimica Acta**, v. 1303, p. 342522– 342522, 22 mar. 2024.

GONZALEZ, M. K.; COLL-ARAOZ, M. J.; ARCHENTI, A. Enhancing reliability in advanced manufacturing systems: A methodology for the assessment of detection and monitoring techniques. **Journal of Manufacturing Systems**, v. 79, p. 318–333, abr. 2025.

IMNATILA PONGEN; RAY, P.; GUPTA, R. Evaluating the barriers to e-waste closedloop supply chain adoption. *Benchmarking: An International Journal*, 15 ago. 2023.

KAZANCOGLU, Y.; OZKAN-OZEN, Y. D. Sustainable disassembly line balancing model based on triple bottom line. **International Journal of Production Research**, v. 58, n. 14, p. 1–21, 13 ago. 2019.

KARUPPIAH, K.; SANKARANARAYANAN, B. An integrated multi-criteria decisionmaking approach for evaluating e-waste mitigation strategies. **Applied Soft Computing**, p. 110420, 27 maio 2023.

KESHAVARZ-GHORABAE, M. et al. A Fuzzy Simultaneous Evaluation of Criteria and Alternatives (F-SECA) for Sustainable E-Waste Scenario Management. **Sustainability**, v. 14, n. 16, p. 10371, 20 ago. 2022.

JAIN, V. et al. Sustainability performance evaluation of the E-waste closed-loop supply chain with the SCOR model. **Waste Management**, v. 147, p. 36–47, jun. 2022. MAGRINI, C.; JAGODZIŃSKA, K. Can bioleaching of NIB magnets be an answer to the criticality of rare earths? An ex-ante Life Cycle Assessment and Material Flow Cost Accounting. **Journal of Cleaner Production**, v. 365, p. 132672, set. 2022.

MAHESWARI, H. et al. Sustainable reverse logistics scorecards for the performance measurement of informal e-waste businesses. **Heliyon**, v. 6, n. 9, p. e04834, 1 set. 2020.



- MIJANUR RAHAMAN SEIKH; CHATTERJEE, P. Identifying sustainable strategies for electronic waste management utilizing confidence-based group decision-making method in interval valued Fermatean fuzzy environment. **Engineering Applications of Artificial Intelligence**, v. 135, p. 108701–108701, 1 set. 2024.
- NIKOLIC, M. et al. Closing the loop of small WEEE – life cycle based approach for the evaluation of end-of-life strategies on the example of coffee machines. **Resources, Conservation & Recycling Advances**, v. 23, p. 200220, nov. 2024.
- NI, Z. et al. Toward a better understanding of China's e-waste reverse logistics implementation barriers: A certified disassembler's perspective. **Sustainable Chemistry and Pharmacy**, v. 41, p. 101660–101660, 1 out. 2024.
- NGUYEN THANH GIAO; LAM, T.; HONG, T. Assessment of E-Waste Management and Potential for Laptop Reuse and Recycling. **Civil Engineering Journal**, v. 9, n. 6, p. 1471–1481, 1 jun. 2023.
- OLIVEIRA NETO, J. F. DE et al. Critical barriers to material recovery from e-waste in Brazil. **Journal of Hazardous Materials Advances**, v. 17, p. 100562, 8 dez. 2024.
- ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS - ONU. The Sustainable Development Goals Report. Special edition. Nova Iorque: ONU, 2023. Disponível em: <https://unstats.un.org/sdgs/report/2023/The-Sustainable-Development-GoalsReport-2023.pdf>. Acesso em: 06/07/2025.
- PAGE, M. J. et al. The PRISMA 2020 statement: an Updated Guideline for Reporting Systematic Reviews. **British Medical Journal**, v. 372, n. 71, 29 mar. 2021.
- PATRIZIA GHISELLINI; PASSARO, R.; SÉRGIO ULGIATI. Environmental and Social Life Cycle Assessment of Waste Electrical and Electronic Equipment Management in Italy According to EU Directives. **Environments**, v. 10, n. 7, p. 106–106, 22 jun. 2023. P
- AKHIL RAJEEV et al. Advancing e-waste classification with customizable YOLO based deep learning models. **Scientific Reports**, v. 15, n. 1, 25 maio 2025.
- RANI, P.; MISHRA, A. R. Novel Single-Valued Neutrosophic Combined Compromise Solution Approach for Sustainable Waste Electrical and Electronics Equipment Recycling Partner Selection. **IEEE Transactions on Engineering Management**, p. 1–15, 2020.
- ROBINSON, B. H. E-waste: An assessment of global production and environmental impacts. **Science of The Total Environment**, v. 408, n. 2, p. 183–191, dez. 2009.
- SILVA, R. M. G. et al. Indicadores de sustentabilidade para análise do gerenciamento dos resíduos de equipamentos eletroeletrônicos. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 28, p. e20220220, 7 jul. 2023.
- SILVA; RIBEIRO, M. Improvements in the regulation and implementation of extended producer responsibility systems: analysis from the e-waste case study in the State of São Paulo from 2012 to 2021. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais**, v. 59, 1 jan. 2024.
- SMITH, R. L.; BEHDAD, S. From present to future: A review of e-waste recycling processes. **Waste Management**, v. 204, p. 114863–114863, 30 maio 2025.
- TRAVERSO, M. et al. Social Hotspot analysis of the e-waste sector in Ghana and Nigeria. **Waste management**, v. 183, p. 271–277, 1 jun. 2024.
- WANG, L. et al. How effective are WEEE policies in China? A strategy evaluation through a PMC-index model with content analysis. **Environmental Impact Assessment Review**, v. 110, p. 107672, jan. 2025.
- WANG, Q.; WANG, X. An Expert Decision-Making System for Identifying Development Barriers in Chinese Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE) Recycling Industry. **Sustainability**, v. 14, n. 24, p. 16721, 13 dez. 2022.



WANG, W. et al. Understanding the barriers for Internet-based e-waste collection system in China. **Journal of Environmental Planning and Management**, v. 63, n. 4, p. 629–650, 20 mar. 2020.

WIBOWO, N. et al. Strategies for Improving the E-Waste Management Supply Chain Sustainability in Indonesia (Jakarta). **Sustainability**, v. 13, n. 24, p. 13955, 17 dez. 2021.

XU, Y. et al. Risk-based performance evaluation of improvement strategies for sustainable e-waste management. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 155, p. 104664, abr. 2020.

YUAN, L. et al. Environmental Impact Assessment and Mitigation Strategies for WPCCN: Fostering Sustainable Development Through Technological and Policy Interventions. **International Journal of Distributed Sensor Networks**, v. 2025, n. 1, jan. 2025.

YUN ARIFATUL FATIMAH et al. The Critical Success Factors for Sustainable Resource Management in Circular Economy: Assessment of Urban Mining Maturity Level. **Journal of cleaner production**, p. 143084–143084, 1 jul. 2024.



SEMINÁRIO INTERNACIONAL DE RESÍDUOS DE EQUIPAMENTOS ELETROELETRÔNICOS

14 a 16 de outubro de 2025

ESTRATÉGIAS DE FIM DE VIDA PARA PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA

Autores: Abner Fernandes Souza da Silva^{1*}; João Eduardo Azevedo Ramos da Silva¹; Carlos Eduardo Bueno¹; Pedro Henrique Muguinda Kuniyoshi¹; Virgínia Aparecida da Silva Moris¹

¹ Universidade Federal de São Carlos, Campus Sorocaba.

*abnersilva@estudante.ufscar.br

Resumo: A Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) permite analisar os impactos ambientais potenciais de um processo, produto ou serviço. Aplicada à gestão de resíduos, a ACV identifica os principais hotspots e possibilita alterações para avaliar a sensibilidade dos dados e as mudanças nos impactos ambientais. Resíduos de placas de circuito impresso (RPCI) contêm materiais valiosos e tóxicos, especialmente se descartados incorretamente. Com isso, a ACV auxilia tomadores de decisão na escolha da melhor estratégia de fim de vida para esses resíduos. Este trabalho realiza uma revisão sistemática da literatura para entender como a ACV contribui para a gestão de RPCI e identificar lacunas para futuras pesquisas. Utilizando o método prisma, constatou-se que a China é o principal foco de publicações no tema, com os métodos CML e ReCiPe sendo os mais utilizados para avaliação de impacto, e o software Simapro sendo o mais empregado. Os artigos foram classificados em categorias, conforme sua temática principal. As categorias avaliadas se concentraram em: Processo de Recuperação de Material Secundário; Gestão da Logística Reversa; Composição e Toxicidade, revelando a dominância dos processos de reciclagem e logística reversa. Conclui-se que há espaço para uma evolução significativa na gestão de RPCI, especialmente em países em desenvolvimento como o Brasil.

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



1. Introdução

A gestão eficiente de resíduos é um desafio global e tem sido alvo de preocupação em todo o mundo (MULYA et al., 2022). Com o avanço da tecnologia e o ritmo acelerado da produção industrial, a geração de resíduos sólidos tende a aumentar e surge a necessidade de compreender e mitigar os impactos ambientais associados ao descarte desses resíduos, especialmente aqueles provenientes de equipamentos eletrônicos, como as placas de circuito impresso (PCIs). O relatório The Global E-waste Monitor 2020 destaca o crescente volume de resíduos de equipamentos eletroeletrônicos (REEE) e a necessidade urgente de soluções para a sua gestão (Forti et al., 2020). Segundo Baldé et al. (2024), em 2022 foram geradas mundialmente 62 milhões de toneladas de resíduos de equipamentos eletroeletrônicos (REEE), com uma média de 7.8 kg/per capita. Dessa quantidade, apenas 22.3% (13.8 milhões de toneladas) foi devidamente registrado, coletado e reciclado.

As PCIs são componentes fundamentais de uma ampla gama de dispositivos eletrônicos, com diferentes funcionalidades. No entanto, o descarte inadequado desses dispositivos pode resultar em sérios danos ao meio ambiente e à saúde humana. Isso porque as PCIs contêm materiais tóxicos como metais pesados, retardantes de chamas e hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (NAN et al., 2024). Além disso, também conta com a presença de materiais preciosos como ouro e prata e outros como alumínio, cobre e zinco, os quais despertam um interesse econômico (POKHREL, LIN e TSAI, 2020).

Por ser alvo de preocupação em diversos locais ao redor do mundo, muitas legislações surgiram com o intuito de promover o gerenciamento correto de REEE (ROCHA e PENTEADO, 2021). No Brasil, em 2010, foi promulgada a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), a qual traz princípios, objetivos, metas e ações envolvendo a gestão de resíduos sólidos, com destaque para a responsabilidade compartilhada entre poder público, produtores, importadores, distribuidores e comerciantes pelo ciclo de vida do produto (BRASIL, 2010). Ademais, a PNRS torna obrigatório o estabelecimento da logística reversa (LR) para REEE, dentre outros resíduos. Contudo, somente em 2019 foi assinado um acordo setorial que estabelece parâmetros para o setor, incluindo uma meta de coletar 17% de todo o REEE gerado em território brasileiro (BRASIL, 2019). Em 2020, o decreto nº 10.240, de 12 de fevereiro de 2020 foi publicado, replicando o conteúdo do acordo setorial (BRASIL, 2020). Assim, as empresas do setor precisam apresentar relatórios periodicamente, mostrando seus resultados e próximas metas a serem alcançadas.

Todavia, por conta das diversas incertezas existentes, formar uma estrutura de logística reversa destaca-se como uma tarefa importante. A qualidade do material a ser coletado, o volume, a frequência e os altos custos relacionados à LR são algumas das barreiras existentes (ALSHAMSI e DIABAT, 2015). Apesar disso, questões como legislações ambientais mais exigentes e pressão por um desenvolvimento sustentável e competitividade tornam fundamental a busca das empresas por uma logística reversa eficiente (AYVAZ, BOLAT e AYDIN, 2015). Formar uma rede de logística reversa exige um planejamento eficaz, já que além dos custos, operações de transporte são grandes emissoras de gases de efeito estufa (GEE) (ROCHA E PENTEADO, 2021).

Para lidar com esse desafio complexo, a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) surge como uma ferramenta para auxiliar na tomada de decisão. A ACV oferece uma abordagem holística para avaliar os impactos ambientais de um produto ou processo ao longo de todo o seu ciclo de vida, desde a extração de matérias-primas até o descarte final (FINVEDENN et al., 2009). Ao aplicar a ACV à gestão de resíduos, é possível identificar os pontos críticos do

sistema e avaliar o impacto de diferentes estratégias de fim de vida de produtos (MULYA et al., 2022).

Portanto, o objetivo principal desta revisão sistemática da literatura é explorar como a ACV tem sido utilizada na gestão de resíduos de placas de circuito impresso (RPCIs) para a identificação de *hotspots* e proposição de estratégias de fim de vida mais ambientalmente sustentáveis. Ao examinar as pesquisas existentes, é possível identificar lacunas de conhecimento e direcionar futuras investigações para aprimorar a gestão sustentável de RPCIs.

Por conseguinte, o objetivo do estudo é responder à seguinte pergunta de revisão: “De que maneira a Avaliação do Ciclo de Vida auxilia na identificação de *hotspots* na tomada de decisões para a gestão sustentável de resíduos de placas de circuito impresso?”

2. Materiais e Métodos

A revisão da literatura é parte de qualquer pesquisa científica, pois entender qual é o estado da arte relacionado ao tema estudado é fundamental para o avanço em um assunto específico. Porém, para garantir que a revisão tenha um forte caráter científico e que todo desenvolvimento dado a problemática estudada foi de fato mapeado, é importante seguir um método claro, com um protocolo bem estabelecido, para que a revisão tenha rigor, conforme ressaltado por Tranfield, Denyer e Smart (2003), os quais mostram que a revisão sistemática da literatura permite gerenciar o conhecimento científico gerado até então a partir de uma metodologia clara, o que dá ao estudo uma maior confiabilidade. A revisão foi realizada utilizando o método PRISMA, consagrado para revisões sistemáticas, garantindo um protocolo que atribui uma maior transparência às pesquisas, deixando claro o que o autor fez, encontrou e o motivo da revisão. (PAGE et al., 2021).

Para a elaboração da revisão sistemática, as bases de dados escolhidas foram: Scopus e Web of Science. Segundo Prancutè (2021), essas são as principais bases de dados para análise de informações bibliográficas, por serem mais abrangentes para diversos propósitos, além de oferecerem uma ampla gama de índices especializados, o que gera precisão, transparência e controle de dados. A Figura 1 apresenta o diagrama PRISMA elaborado para a revisão.

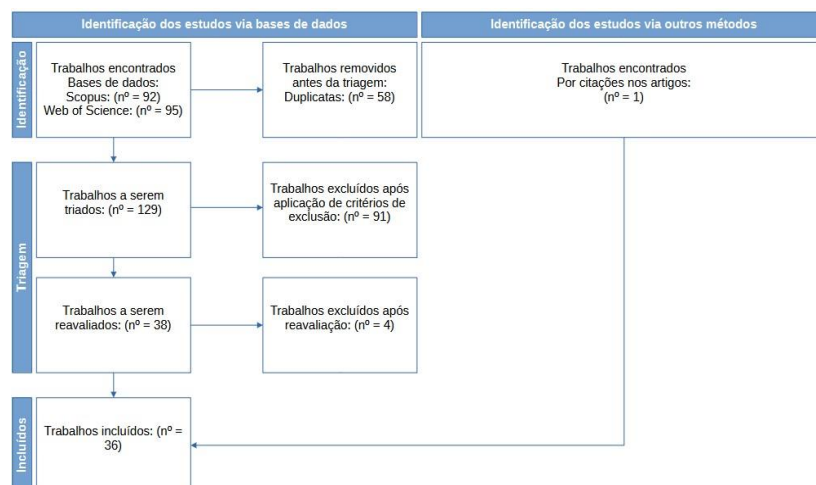


Figura 1 – Diagrama PRISMA

Fonte: AUTORES, 2025. Adaptado de PRISMA (2020).

O início das buscas se deu considerando dois conceitos principais: "Avaliação de Ciclo de Vida" e "Placas de Circuito Impresso". A partir disso, uma primeira revisão exploratória foi realizada para maior conhecimento do assunto e busca de termos variantes desses conceitos (GIL, 2002). Após análise dos resultados com a ferramenta VOSViewer, que permite uma análise iterativa dos metadados dos artigos, foram encontradas palavras-chave que se encaixam nos constructos estabelecidos com base na coocorrência (FILHO; RUSSO, 2018). Assim, a busca foi realizada nas bases de dados com a seguinte expressão: para Web of Science: TS = ("life cycle assessment" OR "life cycle analysis" OR LCA) AND TS = ("printed circuit board*" OR PCB) e para Scopus: TITLE-ABS-KEY ("life cycle assessment" OR "life cycle analysis" OR LCA) AND TITLE-ABS-KEY ("printed circuit board*" OR PCB)

A busca, com filtro para artigos de pesquisa em ambas as bases de dados, resultou em 92 artigos na Scopus e 95 na Web of Science, totalizando 187 artigos para uma primeira análise. Os dados referentes a esses artigos foram extraídos das bases e, com o auxílio da ferramenta Rayyan, que segundo Ouzzani et al. (2016), permite uma análise mais eficiente de documentos, com a possibilidade de separação de artigos incluídos e excluídos com os devidos critérios, foram encontrados e excluídos 58 artigos duplicados, restando 129 artigos. Ainda, os seguintes critérios de exclusão foram aplicados, após leitura atenta dos títulos e resumos de todos os artigos encontrados: não mencionar nenhuma abordagem sobre gerenciamento/logística reversa e/ou avaliação de ciclo de vida; artigos de revisão da literatura; não mencionar placas de circuito impresso e foco exclusivo em análises químicas; Sem acesso ao artigo completo; Artigos de congresso.

Ao aplicar esses critérios, 91 artigos foram excluídos, restando 38 para reavaliação. Após uma leitura desses artigos, 4 foram excluídos por focarem basicamente em aspectos não aderentes ao objetivo deste trabalho. Além disso, ao longo da leitura dos artigos, um outro estudo foi bastante citado e, por isso, incluído na análise, restando, portanto, 36 artigos. Estes foram lidos e analisados a partir de sua temática principal e algumas características gerais, permitindo a extração de dados sobre o atual estado da arte e a formação de uma categorização de acordo com o enfoque de cada trabalho. Essa organização foi realizada a partir de uma planilha no Google Sheets, para registro das informações relevantes sobre os artigos como ano de publicação, método, resultados, conclusões e país de origem.

3. Resultados e Discussões

3.1 Análise bibliométrica

Com a análise dos artigos incluídos após execução de todas as etapas do PRISMA, foi possível mapear a literatura relacionada a interface entre Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) e gestão de resíduos de placas de circuito impresso (PCIs).

Primeiramente, destaca-se a predominância de artigos produzidos por autores vinculados a instituições chinesas, enquanto Brasil, Estados Unidos e Japão aparecem empatados na segunda colocação. A Figura 2 apresenta a distribuição dos artigos por país.

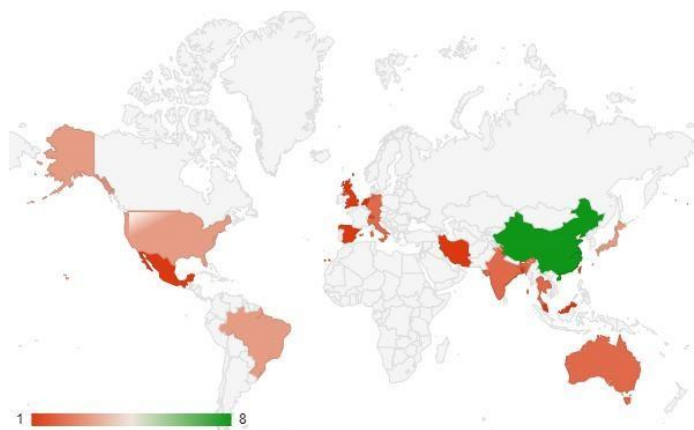


Figura 2 – Distribuição de artigos por país.
Fonte: AUTORES, 2025.

Outra percepção importante é a distribuição das publicações ao longo dos anos. A primeira publicação data de 2009, seguida por um crescimento até 2016, com 5 trabalhos publicados. Após esse período, houve uma queda acentuada até 2018, com apenas uma publicação. Em seguida, ocorreu outro aumento, com 6 artigos publicados em 2023 e 3 artigos até maio de 2024. A Figura 3 apresenta essa análise graficamente.

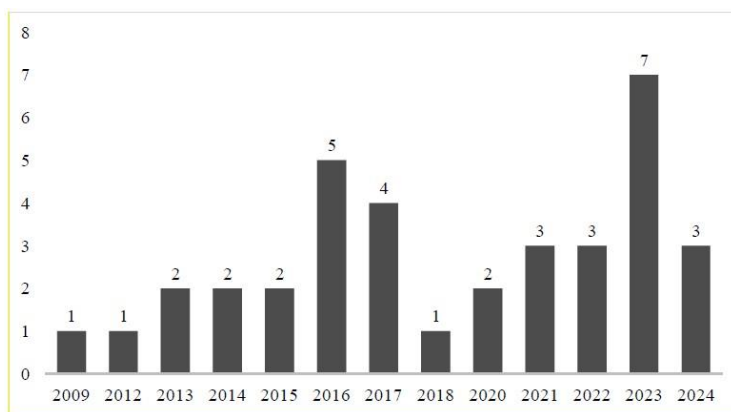


Figura 3 – Distribuição de artigos por ano de publicação.
Fonte: AUTORES, 2025.

Analisando as características dos métodos utilizados, os principais softwares utilizados para realizar a ACV nos artigos encontrados foi o SimaPro, seguido pelo GaBi. Outros, como o OpenLCA, aparecem com menor frequência. Em alguns casos, o software utilizado não foi informado. A Figura 4 apresenta os principais softwares utilizados e as suas frequências.

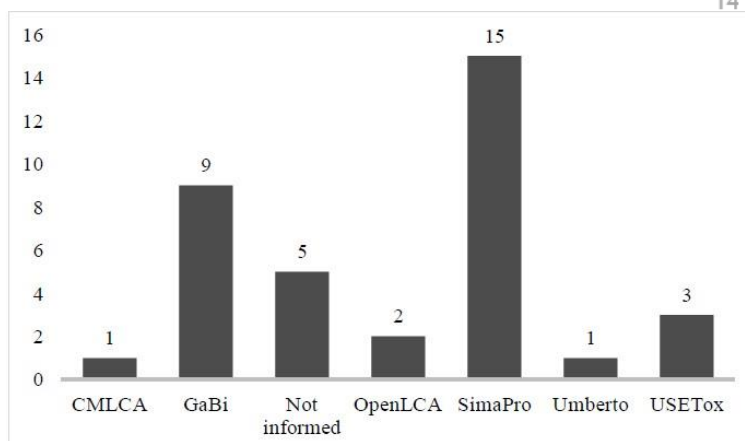


Figura 4 – Softwares de ACV utilizados.

Fonte: AUTORES, 2025.

Para realizar os cálculos do impacto ambiental resultante em cada categoria, o método CML foi o mais destacado, seguido pelo ReCiPe. Alguns artigos utilizaram dois métodos em conjunto para efeitos de comparação. A Figura 5 apresenta a frequência de utilização de cada método de Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (AICV).

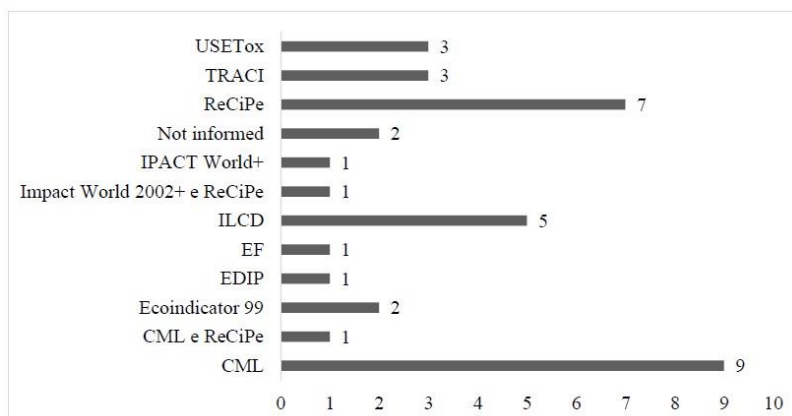


Figura 5 – Métodos de AICV utilizados.

Fonte: AUTORES, 2025.

Por fim, quanto ao método de alocação, a maioria dos artigos não utilizou ou não informou se utilizou algum método. Dos que utilizaram, os métodos de alocação mássica e econômica foram os mais destacados (utilizados em conjunto para efeito de comparação). Outros artigos utilizaram, ao invés dos critérios de alocação, a expansão do sistema, considerando que os produtos obtidos ao final do processo poderiam substituir a obtenção de matéria-prima virgem, evitando os impactos ambientais inerentes a esses processos.

Análise de conteúdo

Para um melhor mapeamento da literatura, os artigos analisados foram classificados em categorias, conforme sua temática principal. As categorias avaliadas se concentraram em: Processo de Recuperação de Material Secundário: Artigos que focam em processos de reciclagem, incluindo métodos hidrometalúrgicos, pirometalúrgicos e biohidrometalúrgicos; Gestão da Logística Reversa: Artigos que abordam a logística reversa de maneira abrangente

e Composição e Toxicidade: Artigos que exploram a composição dos equipamentos eletrônicos e os potenciais de toxicidade dessa composição; a Tabela 1 mostra os trabalhos e respectivas classificações.

Abordagem	Trabalhos	Quantidade
Processo de Recuperação de Material Secundário	Rubin et al. (2014), Rao et al. (2023), Nan et al. (2024), Villares et al. (2016), Rezaee et al. (2023), Zubianni et al. (2017), Hibbert e Ogunseitán (2014), Koulompis e Yan (2022), Rochetti et al. (2013), Choi et al. (2023), Karan e Chakraborty (2022), Liu et al. (2024), Ghodrata et al. (2017), Song et al. (2015), Deng et al. (2016)	15
Gestão da Logística Reversa	Rocha e Penteado (2021), Islam e Iyer-Raniga (2023), Pokhrel, Lin e Tsai (2020), Xue et al. (2015), Kwonpongsagoon, Jareemit e Kanchanapiya (2017), Bian et al. (2016), Arain et al. (2022), Roy et al. (2022), Yao et al. (2018), Alcántara-Concepción, Gavilán-García e Gavilán-García (2016), Bovea, Ibanez-Fores e Perez-Belis (2022), Le et al. (2013), Iklayel (2017), Ismail e Hanafiah (2021)	14
Composição e toxicidade	Chen et al. (2016), Chen et al. (2021), Dias et al. (2023), Sudheshwar et al. (2023), Nili et al. (2024), Fuse e Tsunemi (2012), Chancerel et al. (2009)	7

Tabela 1 – Classificação dos artigos

Fonte: AUTORES, 2025

A categoria de processos de reciclagem mostrou-se proeminente, contendo 15 artigos. Nessa categoria, o principal objetivo dos estudos é analisar os impactos ambientais gerados pelos métodos de extração de metais de placas de circuito impresso (PCI), que envolvem o uso de produtos químicos, calor, bactérias, energia, entre outros. Alguns desses artigos utilizaram simulação de processos químicos para a formação do inventário de ciclo de vida. Rubin et al. (2014) compararam dois métodos de extração de cobre de PCI e concluíram que o uso de aqua regia é menos impactante ao meio ambiente devido ao menor potencial de acidificação, a principal categoria de impacto do estudo. Por outro lado, Nan et al. (2024) destacaram que a lixiviação básica com hidróxido de sódio tem menor impacto ambiental do que a lixiviação com ácido nítrico. Em outro estudo, Rao et al. (2023) investigaram um processo hidrometalúrgico para a recuperação de ouro e cobre de PCI, identificando a delaminação, que consiste na extração da solda que conecta os componentes eletrônicos, como o principal hotspot. Outros estudos realizaram análises semelhantes utilizando diferentes processos, como Villares et al. (2016), que estudaram uma operação de biometalurgia em uma ACV prospectiva.

A segunda abordagem de destaque é a de gestão da logística reversa, que inclui artigos avaliando desde o transporte e a coleta até a obtenção de materiais valiosos, como metais. Além da ACV, essa abordagem utiliza outros métodos de apoio, como análise de fluxo de materiais, surveys e dinâmica de sistemas. Rocha e Penteado (2021) estudaram a logística reversa de Resíduos de Equipamentos Eletroeletrônicos na Região de Campinas e concluíram que a recuperação de metais, principalmente ouro, de PCI tem grande potencial de benefícios ambientais. Em outro contexto, Islam e Iyer-Raniga (2023) analisaram a gestão de resíduos de PCI na Austrália, evidenciando que a recuperação de metais seguida da incineração dos demais componentes para recuperação de energia é a solução mais ambientalmente sustentável para o cenário australiano. Na Malásia, Ismail e Hannafiah (2021) concluíram que a incineração seria a estratégia menos impactante. Além disso, Xue et al. (2015) estudaram a logística reversa de PCI na China, identificando o uso de energia ao longo dos processos de desmonte e reciclagem, e o transporte como os principais hotspots.



Por fim, a abordagem de composição e toxicidade destaca-se pela utilização do método USETox para avaliação da toxicidade desses resíduos e pela proposição de substituição do material base das PCI por materiais biobased, contribuindo para um facilitar a destinação correta no fim de vida.

4. Conclusões

As análises revelaram o desenvolvimento da literatura sobre Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) na gestão de resíduos de placas de circuito impresso (PCI) nos últimos anos, com 2023 sendo o ano com mais publicações até o momento da pesquisa realizada. Além disso, a China, um país em desenvolvimento, destaca-se como o local com o maior número de publicações, indicando que outros países em desenvolvimento, como o Brasil, podem seguir essa tendência e produzir mais pesquisas relevantes nesse contexto.

As abordagens identificadas no trabalho permitiram entender como os estudos relacionados ao ciclo de vida na gestão de resíduos contribuem em diferentes frentes. Os artigos sobre processos de reciclagem visam encontrar maneiras de tornar esses processos menos tóxicos ao ambiente e menos geradores de resíduos e efluentes. A outra abordagem de destaque, relacionada à logística reversa, oferece uma visão holística da gestão de resíduos, identificando hotspots ao longo de todo o sistema. Dado que o Brasil ainda não se destaca frente ao assunto, é possível afirmar que existe uma lacuna para uma evolução significativa na gestão de resíduos de placas de circuito impresso no contexto nacional. A biometalurgia ainda tem muito espaço para ser estudada e aprimorada, enquanto os processos hidro e pirometalúrgicos tem mais estudos. Porém, ainda podem ser estudados para melhorias e diminuição do impacto ambiental potencial.

É importante destacar que as conclusões deste estudo não só ressaltam a necessidade de mais pesquisas e inovações tecnológicas na área de gestão de resíduos de placas de circuito impresso, mas também sublinham a importância de políticas públicas eficazes e de uma maior conscientização ambiental. A adoção de tecnologias mais limpas e a implementação de uma logística reversa eficiente são essenciais para mitigar os impactos ambientais negativos. Além disso, fomentar a colaboração internacional pode acelerar o desenvolvimento de soluções sustentáveis e inovadoras. Estudos recentes têm mostrado que a integração de abordagens interdisciplinares é fundamental para enfrentar os desafios complexos apresentados pelo gerenciamento de REEE, e o presente estudo contribui significativamente para essa discussão ao mapear as tendências e identificar as lacunas na literatura atual.

Agradecimentos

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

Referências



ALCÁNTARA-CONCEPCIÓN, V.; GAVILÁN-GARCÍA, A.; GAVILÁN-GARCÍA, I. C. Environmental impacts at the end of life of computers and their management alternatives in México. **Journal of Cleaner Production**, v. 131, p. 615–628, 2016.

ALLESCH, A.; BRUNNER, P. H. Material Flow Analysis as a Tool to improve Waste Management Systems: The Case of Austria. **Environmental Science & Technology**, v. 51, p. 540–551, 2017.

ALSHAMSI, A.; DIABAT, A. A reverse logistics network design. **Journal of Manufacturing Systems**, v. 37, p. 589–598, 2015.

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

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

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

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

BRASIL. Política Nacional de Resíduos Sólidos - Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/12305.htm. Acesso em: 24 abr. 2024.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente celebra o acordo setorial dos eletrônicos. 2019. Disponível em: <https://www.gov.br/mma/pt-br/noticias/ministerio-do-meioambiente-celebra-acordo-setorial-de-eletroeletronicos>. Acesso em: 24 abr. 2024.

BRASIL. Implementação de sistema de logística reversa de produtos eletroeletrônicos e seus componentes de uso doméstico - Decreto nº 10.240, de 12 de fevereiro de 2020. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato20192022/2020/Decreto/D10240.htm. Acesso em: 24 abr. 2024.

BRUNNER, P. H.; RECHBERGER, H. Practical Handbook of Material Flow Analysis. CRC Press, 2004.

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

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

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

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

BALDÉ, C. P.; et al. **Global E-waste Monitor 2024**. International Telecommunication Union (ITU) and United Nations Institute for Training and Research (UNITAR), Geneva/Bonn, 2024.



- DENG, Y.; et al. Life cycle assessment of flax-fibre reinforced epoxidized linseed oil composite with a flame retardant for electronic applications. **Journal of Cleaner Production**, v. 133, p. 427–438, 2016.
- DIAS, J.; et al. Environmental and Technological Assessment of Operations for Extraction and Concentration of Metals in Electronic Waste. **Sustainability (Switzerland)**, v. 15, n. 17, 2023.
- FILHO, A. R. M.; RUSSO, S. L. **Biblios**, Pittsburgh, n. 71, p. 50–67, abr. 2018.
- FINNVEDEN, G.; et al. Recent developments in Life Cycle Assessment. **Journal of Environmental Management**, v. 91, n. 1, p. 1–21, 2009.
- FORTI, V.; BALDÉ, C. P.; KUEHR, R.; BEL, G. **The Global E-waste Monitor 2020: Quantities, flows and the circular economy potential**. United Nations University (UNU), International Telecommunication Union (ITU) & International Solid Waste Association (ISWA), 2020.
- FUSE, M.; TSUNEMI, K. Assessment of the effects of the Japanese shift to lead-free solders and its impact on material substitution and environmental emissions by a dynamic material flow analysis. **Science of the Total Environment**, v. 438, p. 49–58, 2012.
- GHODRAT, M.; et al. A thermodynamic-based life cycle assessment of precious metal recycling out of waste printed circuit board through secondary copper smelting. **Environmental Development**, v. 24, p. 36–49, 2017.
- GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2002.
- HIBBERT, K.; OGUNSEITAN, O. A. Risks of toxic ash from artisanal mining of discarded cellphones. **Journal of Hazardous Materials**, v. 278, p. 1–7, 2014.
- IANNICELLI-ZUBIANI, M.; et al. Environmental impacts of a hydrometallurgical process for electronic waste treatment: A life cycle assessment case study. **Journal of Cleaner Production**, v. 140, p. 1204–1216, 2017.
- IKHLAYEL, M. Environmental impacts and benefits of state-of-the-art technologies for E-waste management. **Waste Management**, v. 68, p. 458–474, 2017.
- ISLAM, M. T.; IYER-RANIGA, U. Life cycle assessment of e-waste management system in Australia: Case of waste printed circuit board (PCB). **Journal of Cleaner Production**, v. 418, 2023.
- ISMAIL, H.; HANAFIAH, M. M. Evaluation of e-waste management systems in Malaysia using life cycle assessment and material flow analysis. **Journal of Cleaner Production**, v. 308, 2021.
- KARAN, P.; CHAKRABORTY, R. E-waste derived silica-alumina for eco-friendly and inexpensive Mg-Al-Ti photocatalyst towards glycerol carbonate (electrolyte) synthesis: Process optimization and LCA. **Waste Management**, v. 140, p. 213–224, 2022.
- KOULOUMPIS, V.; YAN, X. Life cycle assessment of a novel metal recovery method from co-processing of coal mine waste and low-grade printed circuit boards. **Journal of Environmental Management**, v. 314, 2022.
- KWONPONGSAGOON, S.; JAREEMIT, S.; KANCHANAPIYA, P. Environmental impacts of recycled nonmetallic fraction from waste printed circuit board. **International Journal of GEOMATE**, v. 12, n. 34, p. 8–14, 2017.
- LE, H. L.; et al. Assessment of metal recovery efficiency for waste printed circuit boards in Vietnam with memrecs and different end-of-life scenarios. **Journal of Solid Waste Technology and Management**, v. 40, n. 2, p. 100–116, 2014.
- LIU, K.; et al. Negative-carbon recycling of copper from waste as secondary resources using deep eutectic solvents. **Journal of Hazardous Materials**, v. 465, 2024.
- MULYA, K. S.; et

- al. A systematic review of life cycle assessment of solid waste management: Methodological trends and prospects. **Science of the Total Environment**, v. 831, 2022.
- NAN, T.; et al. Process simulation and life cycle assessment of hydrometallurgical recycling routes of waste printed circuit boards. **Journal of Cleaner Production**, v. 435, 2024.
- NILI, S.; et al. Exploring the environmental impact of metallic element usage in smartphone evolution. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 205, 2024. PAGE, M. J.; et al. The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. **Systematic Reviews**, v. 10, n. 1, 2021.
- POKHREL, P.; LIN, S. L.; TSAI, C. T. Environmental and economic performance analysis of recycling waste printed circuit boards using life cycle assessment. **Journal of Environmental Management**, v. 276, 2020.
- PRANCKUTĖ, R. Web of Science (WoS) and Scopus: the titans of bibliographic information in today's academic world. **Publications**, v. 9, n. 1, 2021.
- RAO, M. D.; et al. Life cycle analysis on sequential recovery of copper and gold from waste printed circuit boards. **Waste Management**, v. 171, p. 621–627, 2023.
- REZAEI, M.; et al. Eco-friendly recovery of base and precious metals from waste printed circuit boards by step-wise glycine leaching: Process optimization, kinetics modeling, and comparative life cycle assessment. **Journal of Cleaner Production**, v. 389, 2023.
- ROCCHETTI, L.; et al. Environmental impact assessment of hydrometallurgical processes for metal recovery from WEEE residues using a portable prototype plant. **Environmental Science and Technology**, v. 47, n. 3, p. 1581–1588, 2013.
- ROCHA, T. B.; PENTEADO, C. S. G. Life cycle assessment of a small WEEE reverse logistics system: Case study in the Campinas Area, Brazil. **Journal of Cleaner Production**, v. 314, 2021.
- ROY, H.; et al. Electronic waste management scenario in Bangladesh: policies, recommendations, and case study at Dhaka and Chittagong for a sustainable solution. **Sustainable Technology and Entrepreneurship**, v. 1, n. 3, 2022.
- RUBIN, R. S.; et al. Utilization of Life Cycle Assessment methodology to compare two strategies for recovery of copper from printed circuit board scrap. **Journal of Cleaner Production**, v. 64, p. 297–305, 2014.
- SONG, Q.; et al. Environmental risk assessment of CRT and PCB workshops in a mobile e-waste recycling plant. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 22, n. 16, p. 12366–12373, 2015.
- SUDHESHWAR, A.; et al. The need for design-for-recycling of paper-based printed electronics – a prospective comparison with printed circuit boards. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 189, 2023.
- TRANFIELD, D.; DENYER, D.; SMART, P. Towards a Methodology for Developing Evidence-Informed Management Knowledge by Means of Systematic Review. **British Journal of Management**, v. 14, n. 3, p. 207–222, 2003.
- VILLARES, M.; et al. Applying an ex-ante life cycle perspective to metal recovery from e-waste using bioleaching. **Journal of Cleaner Production**, v. 129, p. 315–328, 2016. XUE, M.; KENDALL, A.; XU, Z.; SCHOENUNG, J. M. Waste management of printed wiring boards: A life cycle assessment of the metals recycling chain from liberation through refining. **Environmental Science and Technology**, v. 49, n. 2, p. 940–947, 2015.
- YAO, L.; et al. An integrated method of life-cycle assessment and system dynamics for waste mobile phone management and recycling in China. **Journal of Cleaner Production**, v. 187, p. 852–862, 2018.



SEMINÁRIO INTERNACIONAL DE RESÍDUOS DE EQUIPAMENTOS ELETROELETRÔNICOS
14 a 16 de outubro de 2025



SEMINÁRIO INTERNACIONAL DE RESÍDUOS DE EQUIPAMENTOS ELETROELETRÔNICOS

14 a 16 de outubro de 2025

PRÉ-EVENTO: ABERTURA ESTRATÉGICA E VISÃO GLOBAL SOBRE REEE

O evento principal foi precedido por um pré-evento de grande relevância estratégica, realizado na segunda-feira, 13 de outubro de 2025. Dedicado a estabelecer um panorama global e aprofundar discussões técnicas, o pré-evento serviu como um catalisador para os debates subsequentes, reunindo especialistas de renome internacional e nacional. A programação foi cuidadosamente estruturada para oferecer uma imersão nas perspectivas globais e nas pesquisas de ponta sobre Resíduos de Equipamentos Eletroeletrônicos (REEE) e minerais críticos.

A manhã começou com a abertura oficial, seguida pela palestra de Kees Baldé, do United Nations Institute for Training and Research (UNITAR). Baldé, uma voz proeminente no cenário global de REEE, trouxe dados e análises cruciais sobre o volume e o fluxo de resíduos eletrônicos em escala mundial, estabelecendo a urgência do tema. Em seguida, o pré-evento contou com Evi Petavratzi, do British Geological Service (BGS), que compartilhou insights valiosos sobre a criticidade de minerais e as estratégias de segurança de suprimentos, conectando a gestão de REEE à geopolítica dos recursos. A manhã foi encerrada com uma Sessão de Discussão produtiva, permitindo a interação direta entre os participantes e os palestrantes internacionais.

A programação da tarde, manteve o alto nível técnico e estratégico. Gavin Mudd, também do British Geological Service, complementou a discussão da manhã, provavelmente aprofundando-se em metodologias de avaliação de criticidade ou em estudos de caso específicos. A perspectiva nacional foi trazida por Lúcia Helena Xavier, do Centro de Tecnologia Mineral (CETEM), que apresentou a pesquisa brasileira e os avanços tecnológicos desenvolvidos no país para a recuperação de materiais de REEE.

Ainda na parte da tarde, Guilherme Ranier representante do Consulado Britânico, abordou sobre a importância da cooperação internacional e das parcerias bilaterais para o avanço da agenda de economia circular e minerais críticos. O pré-evento foi concluído com uma



SEMINÁRIO INTERNACIONAL DE RESÍDUOS DE EQUIPAMENTOS ELETROELETRÔNICOS

14 a 16 de outubro de 2025

Sessão de Discussão final, que consolidou os aprendizados do dia e preparou o terreno para a abertura do evento principal.

O pré-evento, com sua agenda focada e a presença de figuras-chave de organizações internacionais e governamentais, cumpriu com excelência seu papel de preparar o ecossistema para as discussões aprofundadas que se seguiriam, destacando a dimensão global e a relevância científica do tema REEE.





SEMINÁRIO INTERNACIONAL DE RESÍDUOS DE EQUIPAMENTOS ELETROELETRÔNICOS
14 a 16 de outubro de 2025

SUMÁRIO EXECUTIVO: OS TEMAS QUE MOLDARAM O FUTURO

Dia	Destaque do dia	Frase de impacto
Dia 1: Governança Global	O papel do Estado e a urgência da Logística Reversa.	<i>"A Logística Reversa é a ponte entre a política pública e a sustentabilidade econômica."</i>
Dia 2: Minerais e Mercado	Tecnologias de ponta e a viabilidade econômica da Mineração Urbana.	<i>"A Mineração Urbana transforma o resíduo eletrônico em um novo e estratégico mercado de minerais."</i>
Dia 3: Conhecimento em Ação	A prática da circularidade em oficinas e seminários técnicos.	<i>"Transformar o REEE em recurso é a nossa maior inovação."</i>

DIA 1(14 DE OUTUBRO) – ABERTURA OFICIAL DO EVENTO

Mesa de abertura: O compromisso institucional

A abertura oficial, com a presença de líderes do CETEM e do MCTI, ressaltou a importância da sinergia entre pesquisa e política pública. A mesa de abertura contou com a presença de Dr. Osório Guimarães Diretor do Departamento de Programas de Inovação (DEPIN/MCTI), A Dra. Silvia França, Diretora do CETEM e a pesquisadora do CETEM Dr.^a Lúcia Helena Xavier. A Dra. Silvia França, destacou a urgência de transformar o conhecimento científico em ação concreta.

"A mineração urbana não é uma alternativa, é uma necessidade estratégica para a soberania tecnológica do Brasil." — Dr.^a. Lúcia Helena Xavier, Pesquisadora CETEM/MCTI



SEMINÁRIO INTERNACIONAL DE RESÍDUOS DE EQUIPAMENTOS ELETROELETRÔNICOS
14 a 16 de outubro de 2025



Painel 1: Estratégias governamentais para a gestão de REEE no Brasil

O Painel 1 dedicou-se a debater as Estratégias governamentais para a gestão de REEE no Brasil, reunindo representantes de ministérios chave para delinear o panorama regulatório e as ações de fomento. O debate ressaltou a necessidade de uma abordagem interministerial e coordenada para o desafio da logística reversa e do tratamento de Resíduos de Equipamentos Eletroeletrônicos. O painel contou com a participação de Miguel Crisóstomo, do Ministério de Minas e Energia (MME), Sissi Alves, do Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços (MDIC), Cristina Silva, do Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI), e Reyna Ubeda, da União Internacional de Telecomunicações (ITU).

A mensagem central do Painel 1 ressaltou a importância de *"Alinhar as políticas públicas de inovação com as metas de sustentabilidade, transformando o resíduo em um novo recurso estratégico para o país."*



SEMINÁRIO INTERNACIONAL DE RESÍDUOS DE EQUIPAMENTOS ELETROELETRÔNICOS
14 a 16 de outubro de 2025





Painel 2: Experiências Internacionais na Gestão dos REEE

O Painel 2 proporcionou uma visão panorâmica e estratégica sobre as Experiências internacionais na gestão dos REEE, trazendo para o debate a expertise de organizações globais que monitoram e influenciam as políticas de resíduos eletrônicos. O foco foi a comparação de modelos de sucesso, desafios regulatórios e as tendências que moldam a logística reversa em diferentes regiões do mundo. O painel contou com a participação de Evi Petavratzi, do British Geological Service (BGS), e Kees Baldé (UNITAR), sob a moderação de Carlos Moraes, da UNISINOS.

Durante o Painel 2, a apresentação de Kees Baldé, do UNITAR, trouxe à luz a dimensão global do desafio dos Resíduos de Equipamentos Eletroeletrônicos (REEE). Os dados apresentados sublinharam a disparidade entre o volume de resíduos gerados anualmente e a taxa de coleta e reciclagem, revelando o imenso potencial econômico que está sendo desperdiçado. A seguir, a tabela sintetiza os principais indicadores globais de REEE, conforme detalhado pelo palestrante:

TESOURO DESCARTADO

Item	Valor Global Anual (Estimado)
REEE Gerado	62 Bilhões de Quilos
REEE Coletado/Reciclado	22,3%
Valor dos Materiais Descartados	US\$ 62 Bilhões

Fonte: Kees Baldé, 2024.

Os números apresentados por Kees Baldé reforçam a urgência da ação global. A discrepância entre os 62 bilhões de quilos de REEE gerados e a taxa de coleta/reciclagem de apenas 22,3% evidencia uma falha sistêmica na gestão deste tipo de resíduo, resultando na perda anual de US\$ 62 bilhões em materiais valiosos. Esta lacuna não representa apenas um



SEMINÁRIO INTERNACIONAL DE RESÍDUOS DE EQUIPAMENTOS ELETROELETRÔNICOS

14 a 16 de outubro de 2025

passivo ambiental, mas uma imensa oportunidade econômica e estratégica para a mineração urbana e a segurança de suprimentos de minerais críticos.

A mensagem central do Painel 2 destacou que *"A gestão eficaz dos REEE exige a adoção de padrões globais, a harmonização de regulamentações e o compartilhamento de dados e melhores práticas entre as nações, transformando o desafio do resíduo em uma oportunidade de cooperação internacional."*



Painel 3: A cadeia de valor e a gestão dos REEE no Brasil

Com foco na operacionalização da logística reversa, o Painel 3 explorou A cadeia de valor e a gestão dos REEE no Brasil, trazendo a perspectiva de órgãos ambientais, empresas e indústrias. O debate aprofundou-se nos gargalos e nas oportunidades de mercado que surgem com a correta destinação dos resíduos. O painel foi composto por Liv Nakashima, da Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB), Marcus Oliveira, da CIRCULARE, e Marcelo Souza, da INDÚSTRIA FOX, com a moderação de Sebastião Eleutério, do Centro de Tecnologia da Informação Renato Archer (CTI).

A conclusão principal do Painel 3 destacou que *"A gestão eficiente dos REEE passa necessariamente pela integração de todos os elos da cadeia, desde o consumidor até o reprocessamento industrial, exigindo modelos de negócio inovadores."*



Painel 4: Além da Vida Útil: CRC's como agentes da recuperação de recursos de REEE

O Painel 4 trouxe para o centro da discussão o papel fundamental dos Centros de Recondicionamento e Reciclagem (CRC's) na recuperação de materiais valiosos, abordando o tema Além da Vida Útil: CRC's como agentes da recuperação de recursos de REEE. O foco esteve na capacitação e na inclusão social promovida por esses centros, que atuam como catalisadores da economia circular. O painel contou com as contribuições de Emmanuelle Freitas, do CETEM, e Vilmar Simion, do Programando o Futuro, sob a moderação de Franciele Cúnico, da RECUPER3.

"Os CRC's são a porta de entrada para a mineração urbana, não apenas estendem a vida útil dos equipamentos, mas também reconfiguram narrativas sociais, ao transformar resíduos em oportunidades de inclusão digital, profissionalização e cidadania". – Dr^a Emmanuelle Freitas Pesquisador/bolsista PCI CETEM/MCTI



RESULTADOS PROJETO RECUPER3|MCTI – SETEC

Na sequência, a sessão de apresentação dos RESULTADOS PROJETO RECUPER3|MCTI – SETEC detalhou os avanços e as descobertas científicas alcançadas pela iniciativa. A equipe técnica compartilhou dados sobre a caracterização dos REEE e o desenvolvimento de rotas tecnológicas para a recuperação de metais. A apresentação foi conduzida pela Dr^a. Lúcia Helena Xavier, Pesquisadora do CETEM, Luciana Contador, Pesquisa e bolsista PCI do CETEM, Luciana Mofati, da equipe REMINAR3, Genyr Kappler, da UNISINOS, e

Franciele Cúnico, do projeto RECUPER3. A Dr^a. Lúcia Helena Xavier, líder da pesquisa, sublinhou que *"Os resultados do RECUPER3 comprovam a viabilidade técnica e econômica de se extrair minerais críticos dos REEE, posicionando o Brasil na vanguarda da pesquisa em economia circular."* – Dr^a Emmanuelle Freitas Pesquisadora/bolsista PCI CETEM/MCTI



Painel 5: Avaliação de Criticidade do Reino Unido 2024

O Painel 5 ofereceu uma perspectiva internacional crucial, com a apresentação da Avaliação de Criticidade do Reino Unido 2024. O foco foi a metodologia e os resultados do estudo britânico, que servem de referência para a formulação de políticas de segurança de suprimentos de minerais críticos em escala global. O painel contou com a participação de Gavin Mudd, do British Geological Service.

A mensagem central do Painel 5 detalhou que *"A avaliação de criticidade é uma ferramenta dinâmica e essencial para que os países possam mitigar riscos na cadeia de suprimentos e garantir a transição energética e tecnológica."*



DIA 2 (15 DE OUTUBRO): MINERAIS CRÍTICOS E OPORTUNIDADES DE MERCADO

Painel 6: Regulamentação de REEE e oportunidades do mercado internacional

Abrindo o segundo dia, o Painel 6 abordou a Regulamentação de REEE e oportunidades do mercado internacional, explorando como as normativas globais e os acordos comerciais influenciam o mercado brasileiro de reciclagem e recuperação de materiais. O debate destacou a necessidade de harmonização regulatória para facilitar o comércio de materiais secundários. O painel reuniu Henrique Mendes, da Associação Brasileira de Reciclagem e Recondicionamento de Eletroeletrônicos (ABRAMAR), Luciana Yamane, da RECUPER3, e Alice Libânia, da Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável (SEMAD), com a moderação de Paula Teixeira, da Recuper3.



SEMINÁRIO INTERNACIONAL DE RESÍDUOS DE EQUIPAMENTOS ELETROELETRÔNICOS
14 a 16 de outubro de 2025

A conclusão principal do Painel 6 salientou que *"O mercado internacional de REEE é um vetor de crescimento, mas exige que o Brasil eleve seus padrões de rastreabilidade e qualidade do material recuperado."*



MOMENTO ESPECIAL

Um dos momentos mais especiais e marcantes do evento foi a homenagem ao pesquisador aposentado do Centro de Tecnologia Mineral (CETEM), Francisco Mariano, reconhecido por seu trabalho pioneiro na área de mineração urbana e pela contribuição significativa ao avanço das pesquisas sobre recuperação de materiais e sustentabilidade no setor mineral





SEMINÁRIO INTERNACIONAL DE RESÍDUOS DE EQUIPAMENTOS ELETROELETRÔNICOS
14 a 16 de outubro de 2025

Painel 7: Recuperação de Minerais Críticos e Estratégicos

Este foi o coração do Seminário. Especialistas da VIRIDION e CETEM detalharam as tecnologias de ponta para a recuperação de Terras Raras e outros minerais essenciais para a transição energética. A discussão se aprofundou com Gabriel Longo, da VIRIDION RARE EARTH TECHNOLOGIES, e Ysrael Vera, do CETEM, sob a moderação de Júlio Afonso, da UFRJ.

A mensagem central do painel 7 é: *"O futuro da eletrônica não está na extração primária, mas sim na química de precisão que nos permite colher o que já foi descartado."*





SEMINÁRIO INTERNACIONAL DE RESÍDUOS DE EQUIPAMENTOS ELETROELETRÔNICOS
14 a 16 de outubro de 2025

Painel 8: Mineração urbana e economia circular

O Painel 8 trouxe uma visão abrangente sobre Mineração urbana e economia circular, examinando o potencial de recuperação de metais preciosos e críticos a partir de resíduos urbanos e industriais. O debate enfatizou a mudança de paradigma de uma economia linear para uma circular. O painel contou com a presença de Jan-Marius Tillmanns, Consultor Sênior Independente de Hamburgo, Alemanha, Sonia Rocha, da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), e Beatriz Luz, do Instituto Brasileiro de Economia Circular (IBEC), com a moderação de Feliciane Brehm, da UNISINOS.

A mensagem central do Painel 8 afirmou que *"A mineração urbana não é apenas uma alternativa, mas uma necessidade estratégica para a segurança de suprimentos em um mundo com recursos naturais finitos."*





SEMINÁRIO INTERNACIONAL DE RESÍDUOS DE EQUIPAMENTOS ELETROELETRÔNICOS
14 a 16 de outubro de 2025

Painel 9: Inovação tecnológica e parcerias

O Painel 9 focou em Inovação tecnológica e parcerias, discutindo como a colaboração entre academia, setor privado e governo pode acelerar o desenvolvimento de tecnologias de ponta para a gestão de REEE. O painel buscou identificar modelos de sucesso para a transferência de tecnologia. Participaram Philipp Bohr, da Fundação OpenCE, Carlos Alberto Pachelli, da TRAMPPPO, Marcos Pimentel, do CTI, e Marcos Berton, do SENAI, com a moderação de Luciana Contador, do CETEM.

A conclusão do Painel 9 foi que *"A inovação disruptiva na reciclagem de REEE só será alcançada por meio de parcerias estratégicas que compartilhem riscos e recompensem o desenvolvimento de soluções escaláveis."*



Painel 10: Créditos de Logística Reversa no Brasil: Desafios e Oportunidades

Encerrando o ciclo de debates, com um tema quente: a monetização da logística reversa. Fernando Bernardes (Central de Custódia), Ademir Brescansin (GREEN ELETRON) e Robson Esteves (ABREE) discutiram o mercado de créditos e como ele pode ser o catalisador financeiro para o setor. E moderação da Dr^a. Luciana Mofati.



SEMINÁRIO INTERNACIONAL DE RESÍDUOS DE EQUIPAMENTOS ELETROELETRÔNICOS
14 a 16 de outubro de 2025

Créditos de Logística Reversa: Sua Empresa Está Preparada?

O Painel 10 detalhou como o mercado de créditos pode garantir o fluxo de caixa para cooperativas e gerenciadores. A chave é a **rastreabilidade** e a **certificação**.



Painel 11: Perspectivas para a circularidade no setor

O Painel 11 encerrou o ciclo de debates com uma visão prospectiva sobre as Perspectivas para a circularidade no setor, reunindo líderes empresariais para discutir os desafios e as inovações necessárias para consolidar a economia circular no tratamento de resíduos eletroeletrônicos. O debate focou nas estratégias de longo prazo e nos investimentos em tecnologia para fechar o ciclo dos materiais. O painel contou com a participação de Jorge Demov, da VERTAS, Ricardo Rodrigues, da UMICORE, e David Noronha, da ENERGY SOURCE, com a moderação de Genyr Kappler, da UNISINOS.

O painel 11 destacou que *"A circularidade no setor não é apenas uma tendência, mas um imperativo econômico e ambiental que exige a colaboração de toda a cadeia de valor, desde o design do produto até o reprocessamento final."*



DIA 3 (16 DE OUTUBRO): OFICINAS E SEMINÁRIOS

SEMINÁRIO 1: MINERAÇÃO URBANA E CIRCULARIDADE DE RECURSOS MINERAIS

O Seminário 1 aprofundou o conceito de Mineração urbana e circularidade de recursos minerais, apresentando a visão acadêmica sobre o potencial de recuperação de metais e



SEMINÁRIO INTERNACIONAL DE RESÍDUOS DE EQUIPAMENTOS ELETROELETRÔNICOS

14 a 16 de outubro de 2025

minerais a partir de resíduos. A sessão destacou a importância da pesquisa científica para o desenvolvimento de rotas tecnológicas eficientes. O seminário foi conduzido por Sônia Rocha, da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Sônia Rocha enfatizou que *"Sem mineração urbana não há economia circular na mineração."*



OFICINA: MAKER CIRCULAR DANDO NOVA VIDA AOS RESÍDUOS ELETROELETRÔNICOS



SEMINÁRIO INTERNACIONAL DE RESÍDUOS DE EQUIPAMENTOS ELETROELETRÔNICOS

14 a 16 de outubro de 2025

A Oficina: Maker Circular dando nova vida aos Resíduos Eletroeletrônicos proporcionou uma experiência prática, demonstrando como a criatividade e o conceito "faça você mesmo" (Maker) podem ser aplicados para o reuso e a transformação de REEE. A atividade prática ressaltou o valor intrínseco dos componentes eletrônicos. A oficina foi ministrada por Kenzo Abiko, Marianna Tamye, Roberto Júnior e Akio Goya, na Sala Lapido. Os instrutores da oficina mostraram que *"O movimento Maker, aplicado aos REEE, não só estende a vida útil dos equipamentos, mas também estimula a inovação e a conscientização sobre o descarte correto."*



OFICINA DE DESMONTAGEM E VALORIZAÇÃO DE EQUIPAMENTOS ELETROELETRÔNICOS



SEMINÁRIO INTERNACIONAL DE RESÍDUOS DE EQUIPAMENTOS ELETROELETRÔNICOS

14 a 16 de outubro de 2025

Com foco na etapa inicial da logística reversa, a Oficina de desmontagem e valorização de equipamentos eletroeletrônicos ofereceu treinamento prático nas técnicas seguras e eficientes de desmonte. O objetivo foi maximizar a recuperação de componentes e materiais de alto valor. A oficina foi conduzida pelos palestrantes Emanuele Santos, Josimar Rosa, Tales Oliveira Figueiró e Katia Ocanha, também na Sala Lápido. Os participantes aprenderam que *"A desmontagem correta é o primeiro passo crucial para a valorização dos REEE, garantindo a pureza dos materiais e a segurança dos operadores."*



SEMINÁRIO 2 – SISTEMAS DE LOGÍSTICA REVERSA DE ELETROELETRÔNICOS: UMA SIMULAÇÃO DE IMPACTOS PARA APOIAR POLÍTICAS PÚBLICAS



SEMINÁRIO INTERNACIONAL DE RESÍDUOS DE EQUIPAMENTOS ELETROELETRÔNICOS

14 a 16 de outubro de 2025

O Seminário 2 apresentou uma abordagem inovadora, utilizando simulação de impactos para analisar a eficácia de diferentes Sistemas de logística reversa de eletroeletrônicos e subsidiar a formulação de políticas públicas. A sessão demonstrou o uso de ferramentas de modelagem para prever cenários. O seminário foi conduzido por Philipp Bohr, da Fundação OpenCE. Philipp Bohr destacou que *"A simulação de impactos é uma ferramenta poderosa para que gestores públicos possam tomar decisões baseadas em dados, otimizando a alocação de recursos e a eficácia das regulamentações de logística reversa."*



SEMINÁRIO 3: GESTÃO, TRIAGEM, REPARO, E VALORIZAÇÃO DE LÂMPADAS LED

O Seminário 3 dedicou-se a um segmento específico e crescente de resíduos, abordando a Gestão, Triagem, Reparo, e Valorização de lâmpadas LED. A discussão focou nos desafios técnicos e ambientais impostos por este tipo de resíduo e nas soluções para sua correta destinação. O seminário contou com a participação do Dr. Josimar Rosa, Dr. Carlos Moraes e Dr^a. Feliciane Brehm. Os palestrantes ressaltaram que *"A complexidade das lâmpadas LED exige processos de triagem e valorização específicos, sendo fundamental o desenvolvimento de tecnologias que permitam a recuperação de seus componentes críticos."*



SEMINÁRIO INTERNACIONAL DE RESÍDUOS DE EQUIPAMENTOS ELETROELETRÔNICOS
14 a 16 de outubro de 2025



SEMINÁRIO 4: PROCESSOS DE RECUPERAÇÃO DE MATERIAIS CRÍTICOS DE REEE POR BIOLIXIVIAÇÃO

Encerrando a série de seminários técnicos, o Seminário 4 explorou a vanguarda da pesquisa em recuperação de metais, apresentando os Processos de Recuperação de Materiais Críticos de REEE por Biolixiviação. A sessão detalhou o uso de microrganismos para a extração seletiva de metais, uma alternativa mais sustentável aos métodos tradicionais. O seminário foi conduzido pela Dra. Isabela Ferreira e pela Doutoranda Emanuele Santos. A Dra. Isabela Ferreira afirmou que *"A biolixiviação é uma promissora tecnologia verde que pode revolucionar a recuperação de materiais críticos, oferecendo um caminho mais limpo e eficiente para a mineração urbana."*





SEMINÁRIO INTERNACIONAL DE RESÍDUOS DE EQUIPAMENTOS ELETROELETRÔNICOS

14 a 16 de outubro de 2025

MESA DE ENCERRAMENTO E PREMIAÇÕES: O CICLO QUE SE FECHA E O FUTURO QUE SE ABRE

Ao final de intensos dias de debates, descobertas e conexões, a mesa de encerramento não foi apenas o ponto final de um evento, mas a celebração de um novo começo. Em um momento de profunda reflexão e inspiração, a comunidade de especialistas, pesquisadores e gestores reafirmou seu compromisso com a circularidade e a sustentabilidade. O encerramento foi marcado por um sentimento de esperança renovada, onde cada painel e cada seminário se somaram para construir a visão de um futuro em que o resíduo se transforma em recurso, e a tecnologia se alia à consciência ambiental. Foi um convite emocionante para que todos os presentes levassem a chama do conhecimento e da colaboração para suas esferas de atuação, transformando a teoria em ação concreta.

Um momento importante desta celebração foi a Cerimônia de Premiação, um reconhecimento merecido à excelência da pesquisa que impulsiona a mineração urbana no Brasil. Os trabalhos laureados representam a vanguarda do pensamento e da inovação, pavimentando o caminho para soluções escaláveis e impactantes.

O prêmio de Melhor Apresentação Oral foi concedido ao trabalho AVALIAÇÃO ORÇAMENTÁRIA DA LOGÍSTICA REVERSA DE REEE COMO FONTE DE MATÉRIA-PRIMA ESTRATÉGICA DE SEGUNDA GERAÇÃO, de autoria de Thiago Dai Prá da Silva e Lisiane Kleinkauf da Rocha. Este estudo foi aclamado por sua profundidade analítica e por demonstrar, com rigor orçamentário, a viabilidade de transformar a logística reversa de REEE em uma fonte estratégica de riqueza para o país.

Na categoria Melhor Apresentação em Pôster, a vencedora foi Cristina Sisinnio, Andrea Rizzo e Cláudia Cunha, com o trabalho RESÍDUOS DE EQUIPAMENTOS ELETROELETRÔNICOS COMO NANORESÍDUOS: DESAFIOS PARA SUA GESTÃO. A pesquisa foi destacada por sua abordagem e pela coragem de mergulhar nos desafios emergentes da gestão de resíduos em escala nanométrica, um tema crucial para a segurança e a inovação tecnológica.



SEMINÁRIO INTERNACIONAL DE RESÍDUOS DE EQUIPAMENTOS ELETROELETRÔNICOS

14 a 16 de outubro de 2025

A entrega dos prêmios selou o evento com a certeza de que o futuro da circularidade está sendo construído agora, pelas mentes brilhantes e pelos corações engajados que se reuniram, prontos para transformar o desafio do resíduo eletrônico em uma oportunidade de ouro para o Brasil. O ciclo se fecha, mas a jornada da inovação e da sustentabilidade apenas começou.

