



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

JOSÉ FRANCISCO DE OLIVEIRA NETO

**POTENCIAL DE RECICLAGEM DE RESÍDUOS DE EQUIPAMENTOS
ELETROELETRÔNICOS PRODUZIDOS NO BRASIL**

Recife
2023

JOSÉ FRANCISCO DE OLIVEIRA NETO

**POTENCIAL DE RECICLAGEM DE RESÍDUOS DE EQUIPAMENTOS
ELETROELETRÔNICOS PRODUZIDOS NO BRASIL**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para à obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil.

Área de concentração: Tecnologia
Ambiental e Recursos Hídricos.

Orientadora: Profa. Dra. Maria de Lourdes Florencio dos Santos.

Coorientadora: Profa. Dra. Simone Machado Santos.

Recife

2023

Catálogo na fonte
Bibliotecária Margareth Malta, CRB-4 / 1198

O48p

Oliveira Neto, José Francisco de.

Potencial de reciclagem de resíduos de equipamentos eletroeletrônicos produzidos no Brasil / José Francisco de Oliveira Neto – 2023.

177 f.: il., fig., tab., abrev. e siglas.

Orientadora: Profa. Dra. Maria de Lourdes Florencio dos Santos.

Coorientadora: Profa. Dra. Simone Machado Santos.

Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2023.

Inclui Referências.

1. Engenharia Civil. 2. REEE. 3. Circularidade de materiais. 4. Sustentabilidade. 5. Estimativa de geração. 6. Desafios e oportunidades. 7. Recuperação de recursos. I. Santos, Maria de Lourdes Florencio dos (Orientadora). II. Santos, Simone Machado (Coorientadora). III. Título.

UFPE

624 CDD (22. ed.)

BCTG/2024-60

JOSÉ FRANCISCO DE OLIVEIRA NETO

**POTENCIAL DE RECICLAGEM DE RESÍDUOS DE EQUIPAMENTOS
ELETROELETRÔNICOS PRODUZIDOS NO BRASIL**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, como requisito parcial para à obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil. Área de concentração: Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos.

Aprovada em: 07/12/2023.

BANCA EXAMINADORA

participação por videoconferência
Profa. Dra. Maria do Carmo Martins Sobral
Universidade Federal de Pernambuco

participação por videoconferência
Prof. Dr. Valdir Schalch
Universidade de São Paulo

participação por videoconferência
Prof. Dr. Marcos Paulo Gomes Mol
Fundação Ezequiel Dias

participação por videoconferência
Profa. Dra. Werônica Meira de Souza
Universidade Federal do Agreste de Pernambuco

participação por videoconferência
Profa. Dra. Maísa Mendonça Silva
Universidade Federal de Pernambuco

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer a Deus e aos que não me deixar andar só neste mundo, me dando proteção, saúde e força para levantar todos os dias e batalhar pelos meus sonhos, objetivos e por minha evolução espiritual. A minha mãe, por ser o maior exemplo de pessoa forte que tenho na vida e que fez, e faz, de tudo para que eu alcance meus objetivos. Em nome de Maria Júlia e Ainá, agradeço às minhas famílias (de sangue e de santo) por todo o suporte nos momentos difíceis, e pelos risos nos momentos de descontração. Obrigado por me fazer sentir amado.

Também quero agradecer aos meus amigos, pelo companheirismo e suporte nessa caminhada até aqui. Obrigado pela força que vocês me deram nos momentos em que achei que não conseguiria. Aos amigos que fiz no PPGEC, obrigado pela companhia.

Agradeço a minha orientadora (Prof^a Lourdinha Florêncio) e a minha coorientadora (Prof^a Simone Machado) por acreditarem na minha capacidade e contribuírem para meu amadurecimento e crescimento profissional. Dedico também a todos os outros professores que puderam me passar um pouco do seu conhecimento e aprendizado, em especial a professora Maisa Silva. Todo o meu carinho e gratidão as pessoas que formam os laboratórios LSA e o LEA, os quais contribuem imensamente para a ciência pernambucana, brasileira e mundial.

Por fim, agradeço a oportunidade de poder desfrutar de um ensino superior gratuito e de qualidade. Não sei quantos mais terão a mesma oportunidade que eu, por isso devemos valorizar o que temos no presente e lutar, através da educação, por um futuro melhor para todos.

RESUMO

Os resíduos de equipamentos eletroeletrônicos (REEE) incluem desde grandes e pequenos eletrodomésticos e equipamentos de informática e de telecomunicação até distribuidores automáticos, quando chegam ao fim de sua vida útil. Seu gerenciamento é significativamente mais complexo devido à sua composição química diferenciada e a rápida evolução tecnológica. Nos últimos anos, países desenvolvidos e em desenvolvimento têm buscado soluções para enfrentar os problemas causados pelo crescente fluxo dos REEE (velocidade de geração e toxicidade). No geral, são soluções sustentáveis baseadas na redução da exploração de recursos por meio do reuso, reparo e reciclagem (com recuperação de materiais) desses resíduos. Nesse sentido, a circularidade de materiais surge como uma solução viável para mitigar os impactos negativos causados pela crescente produção de REEE, principalmente pela composição heterogênea e complexa desses resíduos. Para que seja possível, é fundamental apresentar o panorama do perfil de geração e descarte desse fluxo de resíduos sólidos. Desse modo, é possível estimar o potencial de recuperação de materiais e os potenciais benefícios ambiental, econômico e social. O presente trabalho apresenta um panorama nacional das potencialidades e desafios à recuperação de materiais provenientes dos resíduos de equipamentos eletroeletrônicos (REEE) gerados no Brasil. Através de uma revisão de literatura foram identificadas e analisadas as práticas de gestão de REEE no mundo. Em seguida, foi estimado o potencial de mineração da fração metálica dos REEE e das placas de circuito impresso presnetes neste fluxo. Por fim, foram identificadas e analisadas as barreiras para a recuperação de materiais contidos nos REEE. Através da revisão de literatura, observou-se que os artigos têm enfatizado temas de reciclagem, reutilização e recuperação dos materiais presentes nos REEE. No entanto, nota-se um aumento nas publicações com foco na extensão de vida útil de EEE, o que representa uma perspectiva futura de maior sustentabilidade. Através da aplicação de um método de estimativa de geração de REEE, observou-se que, entre 2015 e 2030, a geração de REEE no Brasil aumentará 48% (saindo de 131,87 kt para 195,22 kt). No período, a geração de resíduos de PCI estimada aumentará cerca de 34%, saindo de 13,6 kt para 18,2 kt. Mas para que a circularidade de materiais no fluxo de REEE gerados no Brasil seja recuperado completamente no país, faz-se necessário que os fatores críticos que podem levar ao sucesso ou fracasso de um sistema voltado a extração

de materiais dos REEE. Entre esses fatores, pode-se citar as tecnologias disponíveis e a infraestrutura adequada, o conhecimento técnico especializado nos processos de recuperação, a aplicação das leis mais rigorosas, os custos operacionais do sistema de recuperação e a participação ativa dos consumidores. Portanto, superar os desafios relacionados aos REEE requer uma abordagem abrangente, envolvendo o governo, setor privado e a sociedade civil.

Palavras-chave: REEE; circularidade de materiais; sustentabilidade; estimativa de geração; desafios e oportunidades; recuperação de recursos.

ABSTRACT

Waste of electrical and electronic equipment (WEEE) includes everything from large and small household appliances, computer and information and telecommunication (IT) equipment to automatic distributors when they reach the end of their useful life. The management of WEEE is significantly more complex due to its unusual chemical composition and fast and increasing evolution and premature disposal. In the last few years, both developed and developing countries have been looking for solutions to deal with the problems caused by the growing flow of electronic waste (both in quantity and toxicity). In general, these solutions are based on reducing resource exploitation through the reuse, repair, or recycling of this waste. Given this, the circular economy emerges as a viable solution to mitigate the negative impacts caused by the growing production of WEEE, mainly due to the heterogeneous and complex composition of these wastes. Thus, it is necessary to enhance the current WEEE management system through the implementation of material circularity practices (such as minimization, product design planning, reuse, recycling). To establish legal and operational mechanisms and instruments that favor material circularity in the WEEE stream, it is crucial to present an overview of the generation and disposal profile of this solid waste stream. In this way, it is possible to estimate the potential for material recovery and the potential environmental, economic, and social benefits. This work presents a national overview of the potential and challenges in recovering materials from waste electrical and electronic equipment (WEEE) generated in Brazil. Through a literature review, WEEE management practices around the world were identified and analyzed. Next, the mining potential of the metallic fraction of WEEE and printed circuit boards present in this flow was estimated. Finally, barriers to the recovery of materials contained in WEEE were identified and analyzed. Through the literature review, it was observed that the articles have emphasized themes of recycling, reuse and recovery of materials present in WEEE. However, there is an increase in publications focusing on extending the useful life of EEE, which represents a future perspective of greater sustainability. By applying a WEEE generation estimation method, it was observed that, between 2015 and 2030, WEEE generation in Brazil will increase by 48% (from 131.87 kt to 195.22 kt). During the period, estimated PCB waste generation will increase by around 34%, from 13.6 kt to 18.2 kt. But for the circularity of materials in the WEEE flow generated in Brazil to be

completely recovered in the country, critical factors are needed that can lead to the success or failure of a system focused on extracting materials from WEEE. Among these factors, one can mention available technologies and appropriate infrastructure, specialized technical knowledge in recovery processes, the implementation of stricter laws, operational costs of the recovery system, and active consumer participation. Therefore, overcoming challenges related to WEEE requires a comprehensive approach involving the government, private sector, and civil society.

Keywords: WEEE; material circularity; sustainability; generation estimate; challenges and opportunities; resource recovery.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Produção de REEE em 2019 por categoria de eletroeletrônico.	223
Figura 2 - Geração total de REEE por região em 2017 e 2019.	235
Figura 3 - Composição geral dos resíduos de equipamentos eletroeletrônicos.	30
Figura 4 - Matérias-primas críticas e não-críticas de acordo com a União Europeia (a); Metais tecnológicos e suas aplicações (b).	324
Figura 5 - Evolução temporal das políticas e legislações para gestão de REEE. ...	357
Figura 6 - Concepções que contribuíram para a formação do conceito de Economia Circular.	457
Figura 7 - Esquema da metodologia adotada (protocolo de pesquisa).	50
Figura 8 - Distribuição temporal (a) e geográfica (b) dos artigos avaliados nesta revisão.	502
Figura 9 - As referências e autores de maior destaque segundo os resultados do CiteSpace: (a) rede de referência e (b) rede de autores.	535
Figura 10 - (a) Análise SWOT e (b) TOWS: estratégias para a melhoria da gestão de REEE numa perspectiva de economia circular.	679
Figura 11 - Distribuição da posse de EEE nos domicílios brasileiros por renda familiar.	1046
Figura 12 - Séries históricas e projeções de vendas de EEE no Brasil.	1079
Figura 13 - Estimativa de geração de REEE/PCI no Brasil.	10911
Figura 14 - Evolução dos REEE gerados no Brasil em termos de: (a) peso dos EEE; (b) quantidade de EEE descartados.	1113
Figura 15 - Evolução temporal dos estoque de EEE no Brasil.	1124
Figura 16 - Potencial de recursos secundários disponíveis para reciclagem de lixo eletrônico no Brasil.	1157
Figura 17 - Economia estimada em emissões anuais de CO ₂ (kt) e energia (TJ) provenientes da reciclagem de metais disponíveis em REEE.	1168
Figura 18 - Valor potencial de recursos secundários disponíveis para reciclagem de lixo eletrônico no Brasil.	1179
Figura 19 - Diagrama de causa-efeito para as barreiras (de acordo com o especialista 1).	1479
Figura 20 - Diagrama de causa-efeito para as barreiras (de acordo com o especialista 2).	14850

Figura 21 - Diagrama de causa-efeito para as barreiras (de acordo com o Especialista 3).14951

Figura 22 - Diagrama de causa-efeito para as barreiras (de acordo com o Especialista 4).1502

Figura 23 - Diagrama de causa-efeito para as barreiras (de acordo com o Especialista 5).1524

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Levantamento dos estudos que realizaram estimativas de geração para REEE.	268
Quadro 2 - Estudos que aplicaram o DEMATEL para identificar barreiras no gerenciamento de REEE.....	1368

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Citações, padrões temáticos e termos chave dos artigos incluídos na revisão.....	602
Tabela 2 - Proporção de PCIs e fração metálica por tipo de EEE.....	925
Tabela 3 - Caracterização dos EEE considerados na estimativa de geração de REEE.	101
Tabela 4 - Matriz de relação direta.....	1435
Tabela 5 - Influência Direta e Indireta para as barreiras (de acordo com o Especialista 1).....	1468
Tabela 6 - Influência Direta e Indireta para as barreiras (de acordo com o Especialista 2).....	1479
Tabela 7 - Influência Direta e Indireta para as barreiras (de acordo com o Especialista 3).....	14951
Tabela 8 - Influência Direta e Indireta para as barreiras (de acordo com o Especialista 4).....	1502
Tabela 9 - Influência Direta e Indireta para as barreiras (de acordo com o especialista 5)	1513

LISTA DE SIGLAS

ABDI	Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial
ABINEE	Agência Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica
ABNT	Agência Brasileira de Normas Técnicas
ACV	Avaliação do Ciclo de Vida
ACVS	Avaliação do Ciclo de Vida Social
ASCV	Avaliação de Sustentabilidade do Ciclo de Vida
BFR	Brominated Flame Retardant (Retardantes de Chamas à Base de Brometos)
CFC	Chlorofluorocarbon (<i>Clorofluorcarbono</i>)
CRT	Cathode Ray Tube (Tubo de Raios Catódicos)
EEE	Equipamento Eletroeletrônico
EU	European Union (União Europeia)
EUA	Estados Unidos da América
LCD	Liquid Crystal Display (Display de Cristal Líquido)
LED	Light Emitting Diode (Diodo Emissor de Luz)
PBB	Polybrominated Biphenyl (Bifenila Polibromada)
PBDE	Polybrominated Diphenyl Ether (Difenil Éter Polibromado)
PCB	Polychlorinated Biphenyl (Bifenila Policlorada)
PCI	Placa de Circuito Impresso
PNRS	Política Nacional de Resíduos sólidos
PVC	Polyvinyl Chloride (Policloreto de Vinila)
REEE	Resíduos de Equipamento Eletroeletrônico
REP	Responsabilidade Estendida do Produtor
TBBPA	Tetrabromobisphenol A (Tetrabromobisfenol)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
2	HIPÓTESES	19
3	OBJETIVOS	20
3.1	OBJETIVO GERAL	20
3.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	20
4	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
4.1	RESÍDUOS DE EQUIPAMENTOS ELETROELETRÔNICOS	21
4.2	FLUXO E GERAÇÃO DE REEE.....	21
4.2.1	Panorama da geração mundial.....	21
4.2.2	Métodos para estimativa de geração	24
4.2.3	Estimativas de geração de REEE no Brasil.....	27
4.3	CARACTERÍSTICAS DOS REEE: DO RISCO AO RECURSO	28
4.4	MODELOS DE GESTÃO E TENDÊNCIAS.....	33
5	GERENCIAMENTO DE RESÍDUOS DE EQUIPAMENTOS ELETROELETRÔNICOS NA PERSPECTIVA DE UMA ECONOMIA CIRCULAR: UMA REVISÃO.....	39
6	O POTENCIAL DE RECUPERAÇÃO DE METAL DE PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO NO BRASIL	89
7	AVALIAÇÃO DAS BARREIRAS CRÍTICAS À RECUPERAÇÃO DE MATERIAIS PRESENTES NOS REEE: UMA PERSPECTIVA BRASILEIRA	132
8	CONCLUSÕES GERAIS.....	166
	REFERÊNCIAS	168

1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento tecnológico e o surgimento de equipamentos “smart” aumentaram a quantidade de equipamentos eletroeletrônicos (EEE) produzidos, consumidos e rapidamente descartados como resíduos (KIDDEE; NAIDU; WONG, 2013; ONGONDO; WILLIAMS; CHERRETT, 2011). Vários equipamentos são classificados como eletroeletrônicos, sendo a definição mais abrangente de EEE dada pela Diretiva nº 2012/19 da União Europeia (*WEEE Directive 2012/19/EU*): grandes eletrodomésticos; pequenos eletrodomésticos; equipamentos de informática e de telecomunicação (IT) ; equipamentos de consumo e painéis fotovoltaicos; equipamentos de iluminação; ferramentas eletroeletrônicas; ferramentas eletrônicas; brinquedos e equipamentos de esporte e lazer; aparelhos médicos; instrumentos de monitoramento e controle; e distribuidores automáticos (UE, 2012). Essa categorização está diretamente relacionada com os diferentes processos de reciclagem praticados pelos países que adotam a diretiva. Dentre todas as categorias, os resíduos de equipamentos de IT estão entre os mais gerados (ONGONDO, F. O.; WILLIAMS, I. D.; CHERRETT, 2011), pois são os equipamentos que apresentam uma maior rapidez de substituição e menores tempos de vida útil (BETTS, 2008; COBBING, 2008).

A geração mundial estimada de resíduos de equipamentos eletroeletrônicos (REEE) aumentou cerca de 20% (média de crescimento de 6.7% ao ano), entre 2016 (44.7 Mt / 6.1 kg per capita) (BALDÉ et al., 2017) e 2019 (53.6 Mt / 7.3 kg per capita) (FORTI et al., 2020). O Brasil é o segundo maior produtor de resíduos de equipamentos eletroeletrônicos (REEE) nas Américas, com uma produção anual de 2,14 Mt (FORTI et al., 2020). Um fluxo cada vez maior de produção, associado a uma potencial toxicidade, fazem com que o gerenciamento de REEE seja um grande desafio, especialmente nos países em desenvolvimento.

Conhecer a composição dos EEE que um dia se tornarão REEE é um aspecto importante, dada a peculiaridade e individualidade dos equipamentos que compõem as categorias supracitadas. Os EEE apresentam uma composição muito heterogênea e sua fabricação demanda diversos materiais, incluindo metais especiais (como prata, ouro, paládio, ferro, alumínio, cobre) (CHANCEREL et al., 2009; HEACOCK; KELLY; SUK, 2016), além de elementos de terras raras de alta tecnologia de origem antropogênica (GWENZI et al., 2018). Os EEE também são composto por substâncias

potencialmente perigosas ao meio ambiente e à saúde humana, como cádmio, chumbo, cromo, mercúrio, assim como químicos encontrados em plástico e retardantes de chamas (ABDELBASIR et al., 2018; HEACOCK; KELLY; SUK, 2016).

Dessa forma, a recuperação e reciclagem de materiais presentes nos REEE, principalmente metais, tem grande importância econômica e ambiental (GÖK; TULUN; GÜRBÜZ, 2017). Assim, a escolha do processo para a recuperação desses materiais deve considerar o uso de recursos naturais e a geração de novos poluentes. Em países desenvolvidos, a reciclagem de REEE é realizada de forma legal e segura, até o estágio final de refino e recuperação de materiais raros e preciosos (PERKINS et al., 2014). Em grande parte dos países em desenvolvimento, a reciclagem de REEE é feita na informalidade, com práticas rudimentares e inseguras, causando problemas ambientais e de saúde pública (OLIVEIRA; BERNARDES; GERBASE, 2012; TSYDENOVA; BENGTSSON, 2011).

Na sua maioria, são os países desenvolvidos os que têm suas convenções, diretivas e leis para regular o descarte adequado de seus resíduos (inclusive os de WEEE), principalmente baseado no princípio da responsabilidade estendida do produtor (EPR). A EPR cobra do produtor a responsabilidade pelo seu produto até a fase pós-consumo, incentivando o investimento na modificação dos processos de produção e no design do produto para minimizar o uso de recursos naturais e a geração de poluentes (GARLAPATI, 2016). Na União Europeia existe legislação para os REEE desde 2002, quando foram publicadas as diretivas *WEEE Directive* (2002/96/EC) e *RoHS Directive* (2002/95/EC). Desde então, a região se tornou pioneira no gerenciamento desses resíduos a partir da atualização de instrumentos legais existentes ou estabelecimento de novos.

No Brasil, a Lei 12.305/2010 estabelece a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), que é considerada uma estrutura nacional para a gestão de resíduos sólidos (BRASIL, 2010). A PNRS exige que fabricantes, importadores, distribuidores e comerciantes de produtos eletrônicos e seus componentes desenvolvam planos de ação para implementação de logística reversa de lixo eletrônico, facilitando o reaproveitamento dos materiais coletados e proporcionando o seu retorno ao setor produtivo em forma de matéria-prima. Dessa forma, a logística reversa atua como um instrumento facilitador da reciclagem. Em 2019, representantes do governo brasileiro e de entidades vinculadas ao setor de equipamentos eletroeletrônicos assinaram o Acordo Setorial (BRASIL, 2019) para logística reversa de produtos eletroeletrônicos e

seus componentes. Em fevereiro de 2020, foi assinado o Decreto nº 10.240, que estabelece as regras para implantação do sistema de logística reversa e cumprimento do Acordo Setorial.

O modelo econômico linear comumente praticado nos países, também conhecido como “*take-make-dispose*”, é baseado no princípio de que os recursos naturais são ilimitados e que há espaço ilimitado para o descarte dos resíduos gerados (GRDIC; NIZIC; RUDAN, 2020). No contexto atual, esse modelo é insustentável e precisa de mudanças que considerem a reutilização, a recuperação e a recirculação de materiais/produtos como aspectos importantes para a sustentabilidade da produção, sendo estas as bases do conceito da economia circular. Desse modo, a economia circular surge como um modelo inovador e com potencial de promover benefícios, incluindo a redução na demanda por matéria-prima e no consumo de recursos básicos, a geração de emprego e a prevenção dos impactos negativos decorrentes da exploração e processamento de recursos naturais (XAVIER et al., 2019).

Países desenvolvidos e em desenvolvimento têm buscado soluções para lidar com os problemas causados pelo volume crescente de lixo eletrônico, principalmente no que diz respeito a redução da exploração de recursos naturais através da reciclagem desses resíduos.

Nesse sentido, a compreensão abrangente da quantidade e composição dos REEE é fundamental para desenvolver estratégias eficazes de recuperação de materiais e promover a transição para uma economia circular. Assim, as estimativas precisas de geração REEE são um ponto de partida crucial para otimizar a recuperação de materiais, especialmente metais, presentes nesse fluxo de resíduos sólidos (PEETERS et al., 2015; AWASTHI et al., 2018).

As estimativas confiáveis da quantidade de lixo eletrônico gerado permitem dimensionar a escala do desafio e identificar áreas prioritárias para intervenção. Com isso, políticas e regulamentações podem ser desenvolvidas e implementadas de maneira direcionada, abordando os setores e produtos que contribuem significativamente para o fluxo de REEE. Além disso, a projeção precisa do volume de REEE é essencial para o desenvolvimento de infraestruturas de reciclagem e processamento de resíduos (BOUZON et al., 2016; GUARNIERI; E SILVA; LEVINO, 2016; LODHIA; MARTIN; RICE, 2017), garantindo que essas instalações possam lidar eficientemente com a demanda e contribuir para a recuperação de materiais.

No contexto da recuperação de materiais, especialmente metais preciosos, estimativas precisas de geração de REEE são cruciais para otimizar os processos de coleta e reciclagem (LAU; CHUNG; ZHANG, 2013; BABAYEMI; OSIBANJO; WEBER, 2017). Saber quais dispositivos e/ou componentes dos EEE contêm as concentrações mais elevadas de metais valiosos permite direcionar esforços para uma recuperação mais eficiente (ONGONDO; WILLIAMS; WHITLOCK, 2015; COLE et al., 2019). Além disso, considerar a evolução tecnológica e a obsolescência programada nos métodos de estimativa de geração é crucial para antecipar mudanças nos fluxos de resíduos e adaptar estratégias de recuperação de materiais de forma proativa.

Diante desse contexto, essa pesquisa teve como foco identificar e analisar os desafios e oportunidades para a recuperação de materiais derivados dos REEE produzidos no território brasileiro.

2 HIPÓTESES

A reciclagem dos REEE traz benefícios econômicos, ambientais e sociais. No entanto, os métodos de processamento dos diversos componentes desses resíduos podem ter impactos ambientais significativos. Em países em desenvolvimento, geralmente, o processamento dos REEE ainda ocorre de forma rudimentar, sem controle da poluição ambiental e fora das normas de segurança do trabalho, causando problemas ambientais e de saúde pública. No Brasil, os atores envolvidos no ciclo de vida dos (R)EEE, incluindo poder público, fabricantes e consumidores, desconhecem tanto as vantagens (ambientais, econômicas e sociais) da reciclagem de REEE, como também desconhecem as necessidades de infraestrutura e controle ambiental necessários ao correto andamento dessa atividade.

Portanto, listam-se como hipóteses:

- a) O Brasil tem um grande potencial para mineração urbana a partir dos REEE, que pode trazer benefícios ambientais e socioeconômicos;
- b) Há barreiras de diversas naturezas (técnica, infraestrutural, econômica, sociais, legal, etc) que impedem a recuperação completa de materiais contidos nos REEE em território brasileiro.

Diante disso, o presente trabalho está ancorado nas seguintes questões de pesquisa: *(i)* Como a hierarquia de gerenciamento dos resíduos sólidos, em conjunto com as práticas de economia circular, podem auxiliar na logística reversa dos equipamentos eletroeletrônicos proposta pelo Acordo Setorial? *(ii)* Qual o potencial de geração de REEE e resíduos de PCI a partir dos equipamentos eletrônicos colocados no mercado interno? *(iii)* Quais as principais barreiras à recuperação completa dos materiais presentes nos REEE em território brasileiro?

3 OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GERAL

Apresentar um panorama nacional das potencialidades e desafios à recuperação de materiais provenientes dos resíduos de equipamentos eletroeletrônicos (REEE) gerados no Brasil.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Realizar uma revisão de literatura sistemática e abrangente sobre as práticas de gestão de REEE no mundo, sob a perspectiva da circularidade dos materiais;
- b) Estimar o potencial de mineração da fração metálica dos REEE, com ênfase nas placas de circuito impresso (PCI);
- c) Identificar e analisar as barreiras para a recuperação de materiais contidos nos REEE.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 RESÍDUOS DE EQUIPAMENTOS ELETROELETRÔNICOS

A vida moderna levou a um aumento significativo no uso de equipamentos eletroeletrônicos (EEE), e isso aumentou a preocupação com a enorme geração de lixo eletrônico (ou resíduos de equipamentos eletroeletrônicos - REEE). De acordo com a diretiva da União Europeia para REEE, *WEEE Directive* (2012/19/EU), esses resíduos são divididos em dez categorias: (i) grandes eletrodomésticos; (ii) pequenos eletrodomésticos; (iii) equipamentos de informática e de telecomunicação; (iv) equipamentos de consumo e painéis fotovoltaicos; (v) equipamentos de iluminação; (vi) ferramentas eletroeletrônicas; (vii) ferramentas eletrônicas; (viii) brinquedos e equipamentos de esporte e lazer; (ix) aparelhos médicos; (x) instrumentos de monitoramento e controle; e (xi) distribuidores automáticos (UE, 2012). Essa categorização está relacionada com a composição dos EEE que um dia se tornarão resíduos e com os processos de reciclagem praticados por alguns países europeus.

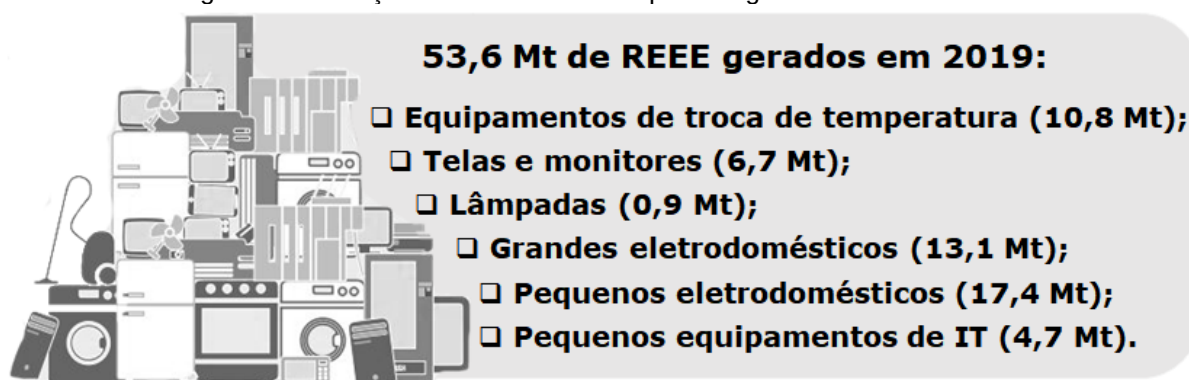
4.2 FLUXO E GERAÇÃO DE REEE

4.2.1 Panorama da geração mundial

Entre 2016 e 2019, a geração mundial estimada de REEE aumentou cerca de 20% (média de crescimento de 6,7% ao ano), saindo 44,7 Mt (6,1 kg per capita) (BALDÉ et al., 2017) para 53,6 Mt (7,3 kg per capita) (FORTI et al., 2020). A estimativa é que até 2030 esse valor atinja 74,7 Mt (9,0 kg per capita). Conforme Figura 1, os pequenos eletrodomésticos e os grandes eletrodomésticos foram responsáveis por 32% e 24% da produção total, respectivamente.

Na Figura 2 são apresentados os valores de geração por região. Em 2019, a maior parte dos REEE foram gerados na Ásia, cerca de 24,9 Mt (ou 5,6 kg per capita) (FORTI et al., 2020). Comparando com a produção de REEE em 2016, que foi cerca de 18,2 Mt (BALDÉ et al., 2017), observa-se um crescimento de aproximadamente 37%. Em relação a quantidade de REEE documentados como sendo coletados e reciclados, também houve um aumento (~7%) entre os anos de 2016 (2,7 Mt) (BALDÉ et al., 2017) e 2019 (2,9 Mt) (FORTI et al., 2020).

Figura 1 - Produção de REEE em 2019 por categoria de eletroeletrônico



Fonte: O Autor (2024) (adaptado de (FORTI et al., 2020).

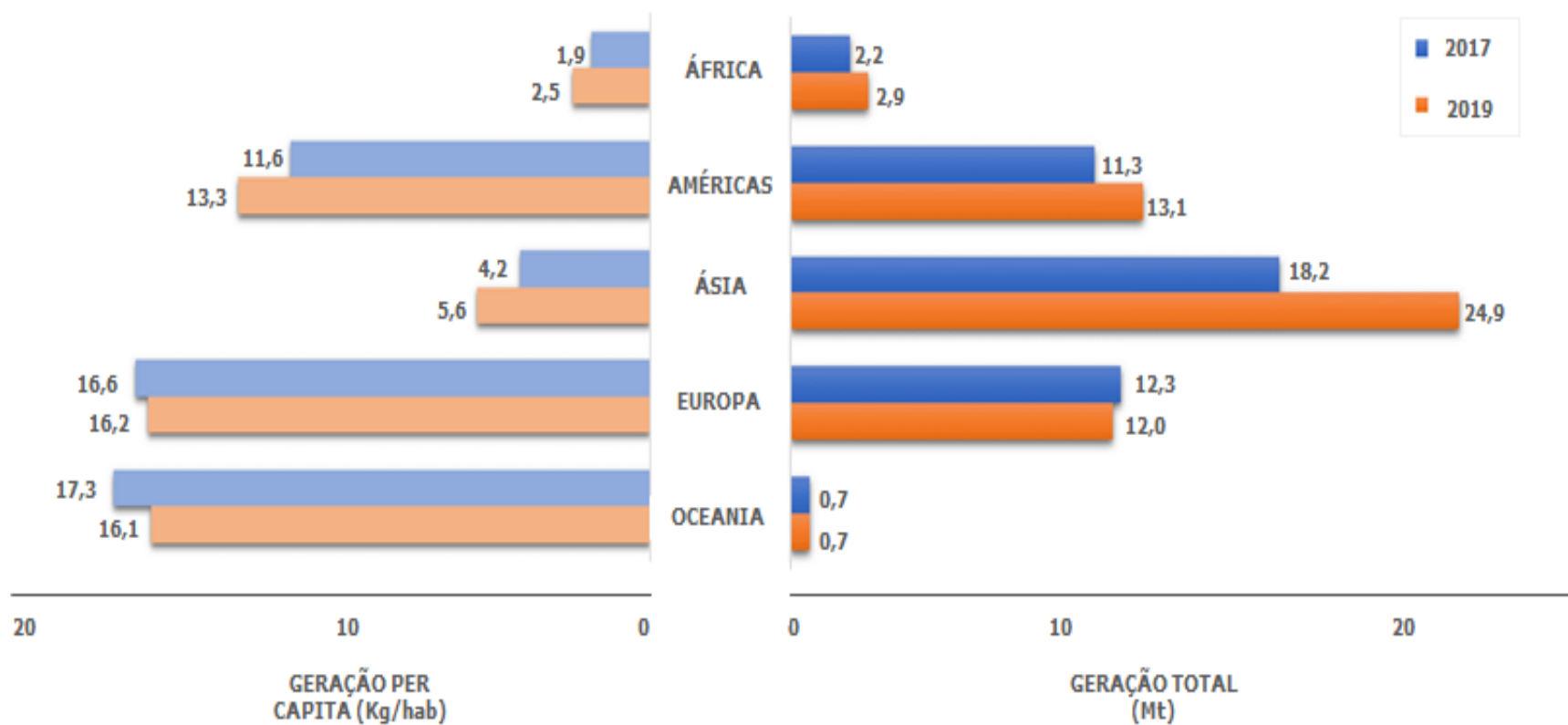
Em segundo lugar no ranking, as Américas foram responsáveis por 13,1 Mt (ou 13,3 kg per capita) dos REEE gerados em 2019 (FORTI et al., 2020). Em relação a geração de 2016, cerca de 11,3 Mt (BALDÉ et al., 2017), houve um aumento de aproximadamente 16%. Entretanto, foi registrada uma redução (~37%) na quantidade de REEE coletados e enviados para reciclagem, passando de 1,9 Mt (BALDÉ et al., 2017) para 1,2 Mt (FORTI et al., 2020).

A Europa foi responsável por 12 Mt (ou 16,2 kg per capita) dos REEE gerados em 2019, dos quais 42,5% (ou 5,1 Mt) foram documentados com sendo coletados para reciclagem (FORTI et al., 2020). Portanto, a região registrou uma redução (~2%) em relação a geração de REEE em 2016, cerca de 12,3 Mt (BALDÉ et al., 2017), e um aumento (~19%) na taxa de REEE coletados e enviados para reciclagem.

A África foi responsável pela geração de 2,9 Mt de REEE em 2019, dos quais menos de 1% foram coletados e direcionados a reciclagem (FORTI et al., 2020). Enquanto houve um aumento na geração em relação a 2016 (cerca de 2,2 Mt (BALDÉ et al., 2017)), não foi registrada nenhuma melhora na taxa de REEE coletados para reciclagem na região. A África também registra a menor geração per capita entre os continentes, cerca de 2,5 kg por habitante (FORTI et al., 2020).

A Oceania foi a região com a menor geração de REEE em 2019, aproximadamente 0,7 Mt, dos quais apenas 0,06 Mt foram coletados para reciclagem (FORTI et al., 2020). Não houve nenhuma mudança em relação a geração de 2016. No entanto, a região tem uma alta produção per capita (16,1 kg por habitante), equivalente a da Europa.

Figura 2 - Geração total de REEE por região em 2017 e 2019



Fonte: Adaptado de Baldé et al. (2017) (dados 2017) e Forti et al., (2020) (dados 2019).

4.2.2 Métodos para estimativa de geração

Problemas associados ao alto fluxo de produção e a toxicidade do lixo eletrônico tornam o seu gerenciamento adequado um dos grandes desafios relacionados à gestão de resíduos, principalmente nos países em desenvolvimento (OLIVEIRA NETO; SILVA; MACHADO SANTOS, 2019). Assim, a estimativa de produção de REEE é um importante passo para se conhecer melhor a realidade e planejar as ações de manejo adequado desses resíduos.

Estudos têm sido realizados em diversos países para estimar a geração de REEE utilizando métodos geralmente baseados em estimativas de vendas/estoque, vida útil e peso médio dos equipamentos, além das condições de mercado (saturado ou dinâmico). No Quadro 1 são apresentados detalhes de estudos que realizaram estimativas de geração de REEE e os métodos aplicados (e suas características).

O Método do Consumo e Uso (*The consumption and use method*) estima a geração de REEE com base em dados de estoque e vida útil média. Apesar de resultar em uma estimativa grosseira, o método é particularmente útil onde os dados de estoque disponíveis são confiáveis, mas as informações sobre o número de vendas são limitadas. Diversos autores, incluindo Araújo et al., 2012; Lau; Chung; Zhang, 2013; Schluep et al., 2012, utilizaram o método para estimar a produção de REEE. Para a estimativa da geração anual de REEE, o Método de Aproximação de Robinson (*Robinson's approach*) requer os seguintes dados: peso do EEE, estoque de EEE e vida útil média do EEE. O método é aplicável quando há restrições na obtenção dos dados requeridos em outras estimativas, como por exemplo número de venda e estoque de produtos. Araujo et al. (2017) e Alavi et al. (2015) estão entre os trabalhos que aplicaram o método para estimar a geração de REEE. O método do intervalo de tempo (*Time step method*) é baseado em dados de estoque e venda de EEE (incluindo produção, importação e exportação). Os dados de estoque podem ser obtidos através de estatísticas nacionais. Araújo et al. (2012) aplicou o método para estimar o potencial de REEE de telefone celular e computador *Desktop* no Brasil. O método do atraso simples (*The Simple delay method*) parte do pressuposto que os EEE são descartados ao atingir o fim de sua vida útil. Assim, para estimar a geração de REEE, o método requer dados de venda de EEE (obtidos através de importação, produção e exportação). Lau; Chung; Zhang (2013) e Wang et al. (2013) são alguns dos estudos que aplicaram o método para estimar a geração do REEE.

Outros estudos, como os de Baldé et al. (2017) e Forti et al. (2020), são baseados em dois dos principais inventários globais de lixo eletrônico: (i) “*The Global E-waste Statistics Partnership*”, que representa esforços substanciais para expandir as capacidades nacionais e regionais em estatísticas de e-waste em vários países e (ii) “*the Organization for Economic Co-operation and Development*”, uma divisão de estatísticas das Nações Unidas e da Comissão Econômica das Nações Unidas para a Europa, que utilizou a medição estrutura em pilotos para coletar dados globais sobre o lixo eletrônico.

Quadro 1 - Levantamento dos estudos que realizaram estimativas de geração para REEE

Referência	Localidade	Método de Estimativa	Dados Requeridos			Principais Resultados
			Venda	Estoque	Vida útil	
Ravindra and Mor (2019)	Chandigarh (Índia)	<i>Questionnaire-based analysis</i>			✓	Uma geração anual de 4.100 toneladas (17 kg por residência) de lixo eletrônico foi estimada em Chandigarh.
Araujo et al. (2017)	Ilha de Fernando de Noronha (Brasil)	<i>Robinson's approach</i>			✓	Estimou-se que 1.3 toneladas de lixo eletrônico foram geradas em um período de 1 ano (2014–2015).
Cabral Neto, Silva e Santos (2016)	Recife (Brasil)	<i>Time series model</i>	✓		✓	Foi estimada a geração anual de sucatas de bateria chumbo-ácido entre 2016 e 2020.
Alavi et al. (2015)	Ahvaz (Irã)	<i>Consumption and use</i>		✓	✓	Em 2011 foram descartadas 2.157.742 unidades de itens eletrônicos; A geração total de lixo eletrônico foi de 9.952,25 toneladas métricas por ano (9,95 kg per capita por ano).
		<i>Robinson's approach</i>			✓	
Wang et al. (2013)	Holanda	<i>Time step</i>	✓	✓		Os resultados demonstraram uma disparidade significativa entre diferentes métodos de estimativa decorrentes do uso de dados com qualidades distintas.
		<i>Simple delay</i>	✓		✓	
Araújo et al. (2012)	Brasil	<i>Consumption and use</i>		✓	✓	Foi estimada uma produção anual de 709.012 toneladas (3.77kg/hab/ano) de REEE.
		<i>Time step</i>	✓	✓		
Chung, Lau e Zhang (2011)	Hong Kong	<i>Robinson's approach</i>			✓	Foi estimada uma produção anual de 80.443 toneladas (11.5 kg/capita) de REEE.
Robinson (2009)	Global	<i>Robinson's approach</i>				A produção global de lixo eletrônico estimada foi de 20–25 milhões de toneladas por ano; Até 2020, China, Europa Oriental e América Latina se tornarão grandes produtores de lixo eletrônico.

Fonte: Adaptado de Oliveira Neto et al. (2021).

4.2.3 Estimativas de geração de REEE no Brasil

De acordo com FORTI et al. (2020), o Brasil é o maior produtor de REEE na América Latina e o segundo maior produtor de REEE das Américas, atrás apenas dos Estados Unidos. Entre os anos de 2016 e 2019, houve um aumento (~43%) na geração REEE no país, passando de 1,5 Mt/ano (ou 7,4 kg por habitante) (BALDÉ et al., 2017) para 2,14 Mt/ano (ou 10,2 kg por habitante) (FORTI et al., 2020). Apesar desses números, a disponibilidade de dados qualitativos e quantitativos sobre o lixo eletrônico ainda é limitada no Brasil.

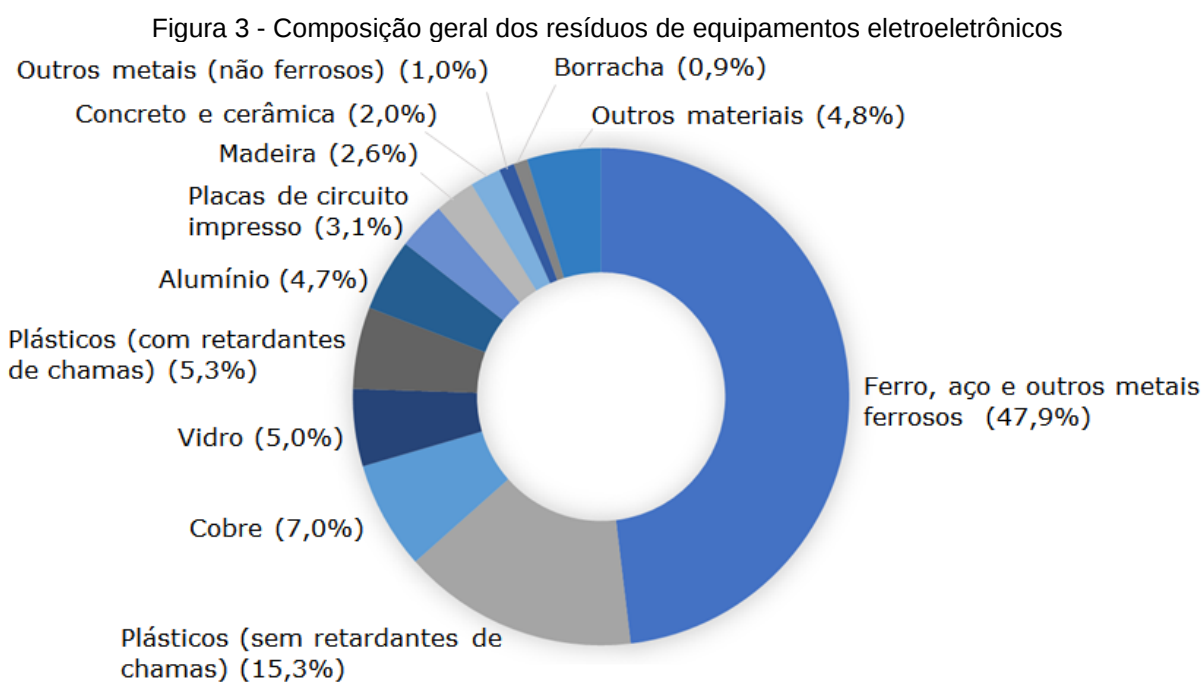
A Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica (ABINEE), publica anualmente o documento denominado “Panorama Econômico e Desempenho do Setor” (ABINEE, 2020). Este documento fornece indicadores de desempenho para a indústria elétrica e eletrônica, considerando os mercados de vendas e importação e exportação de equipamentos eletrônicos por área (automação industrial, componentes elétricos e eletrônicos, equipamentos industriais, produtos de TI, telecomunicações, eletrodomésticos, material elétrico para instalações e geração e transmissão e distribuição de energia elétrica). O último “Panorama Econômico e Desempenho do Setor” (ABINEE, 2020) mostrou que, de 2012 a 2019, houve queda de 62,53% nas vendas de desktops/laptops e aumento de 3,12% e 177,46% nas vendas de tablets e smartphones, respectivamente. Devido às suas múltiplas funções, a preferência pelos smartphones é crescente.

Entretanto, a velocidade de produção de REEE no Brasil não é acompanhada por um aumento na eficiência da gestão ou pela produção de dados técnico-científicos. Ainda existe uma limitação dos dados nacionais sobre a produção, comercialização e vida útil de EEE e, conseqüentemente, existem poucos estudos estimando a produção de REEE no Brasil. A maioria dos poucos estudos que estimam a produção de lixo eletrônico no Brasil usou dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) para coletar informações sobre os EEE presentes nas residências. Essas informações se limitam a determinar a existência de EEE, não a quantidade de equipamento presente em cada residência. Exemplos desses estudos incluem (i) Araújo et al. (2012), mostrando uma estimativa de geração de lixo eletrônico para todo o Brasil, e (ii) Franco e Lange (2011) e Rodrigues, Gunther e Boscov (2015), que estimou a geração para Belo Horizonte e São Paulo, duas capitais de estados altamente desenvolvidos da região Sudeste do Brasil. Cabral Neto, Silva

e Santos (2016) estimaram a geração de sucata de bateria de chumbo-ácido no Brasil a partir de dados da Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores. Por fim, Araujo et al. (2017) estimaram a produção de lixo eletrônico para Fernando de Noronha, um ambiente insular classificado como área de preservação ambiental no litoral do Brasil, por meio de coleta de dados in situ.

4.3 CARACTERÍSTICAS DOS REEE: DO RISCO AO RECURSO

Na perspectiva de *design* material, os EEE apresentam uma composição bastante complexa (ver Figura 3). Os EEE podem conter até 69 elementos da tabela periódica (Forti, 2020), incluindo tanto elementos perigosos quanto elementos de interesse econômico.



Fonte: Adaptado de Widmer et al. (2005).

Entre as substâncias perigosas presentes nos REEE, destacam-se: alumínio, arsênio, cádmio, bário, cobre, chumbo, mercúrio, cromo, PBB (bifenila polibromada), PBDE (difênil éter polibromado), PCB (bifenila policlorada), gases CFC (clorofluorcarbono), BFR (retardantes de chamas à base de brometos), TBBPA (tetrabromobisfenol), PVC (policloreto de vinila), entre outras (ABDI, 2013; BALDÉ et al., 2017; EEA, 2003; KIDDEE; NAIDU; WONG, 2013b; UNEP, 2009). Em contrapartida, os REEE também são compostos por metais preciosos (incluindo ouro,

prata, platina, paládio), matérias-primas críticas (como cobalto, índio, paládio, germânio, bismuto e antimônio) e metais não-críticos, como alumínio e ferro (BALDÉ et al., 2017; CESARO et al., 2018; FORTI et al., 2020).

Cesaro et al. (2018) destacam que a presença de metais valiosos e matéria-prima crítica (*critical raw materials* - CRM) torna a reciclagem dos REEE uma atividade de interesse econômico. Em países desenvolvidos, a reciclagem de REEE é realizada de forma legal e segura, até o estágio final de refino e recuperação de materiais raros e preciosos (PERKINS et al., 2014). Entretanto, nos países em desenvolvimento, o setor informal é o que mais contribui para a reciclagem de lixo eletrônico, por meio de práticas rudimentares e inseguras (OLIVEIRA; BERNARDES; GERBASE, 2012; ONGONDO; WILLIAMS; CHERRETT, 2011; TSYDENOVA; BENGTSSON, 2011).

Diversos estudos, incluindo Awasthi et al. (2018); Awasthi, Zeng e Li (2016); Umair e Björklund Petersen (2015), apontam que os materiais presentes no lixo eletrônico têm grande demanda em mercados de reciclagem ilegal em países em desenvolvimento. Com isso, países em desenvolvimento (especialmente da Ásia, África e América Latina) têm demonstrado preocupação quanto a composição dos REEE e seu gerenciamento adequado (BORTHAKUR, 2020; PUANGPRASERT; PRUEKSASIT, 2019).

Na sua maioria, são países signatários da Convenção da Basileia, que controla o movimento transfronteiriço de resíduos perigosos e seu depósito, de modo a manter esses resíduos nos países produtores ou permitir seu envio para aqueles que possam processá-los com segurança. Entretanto, muitos desses países ainda enfrentam graves problemas ambientais e de saúde pública provocados pelas atividades de reciclagem clandestina de REEE (AWASTHI; ZENG; LI, 2016; GUPT, 2014; KIDDEE; NAIDU; WONG, 2013). Além de precisar gerenciar o REEE gerado dentro do seu território, muitos desses países em desenvolvimento são destino do REEE gerado em países desenvolvidos e que acabam sendo exportados para reforma, reuso ou reciclagem (BALDÉ et al., 2017; PARAJULY et al., 2020).

Entre os diversos impactos negativos provocados pelo gerenciamento inadequados dos REEE, pode-se destacar: a disposição inadequada em aterros sanitários (BARBA-GUTIÉRREZ; ADENSO-DÍAZ; HOPP, 2008; ONGONDO; WILLIAMS, 2011; RODRIGUES, 2007; SIGRIST et al., 2015); e a contaminação de solo e águas subterrâneas e superficiais em locais de processamento de REEE

(DENG et al., 2007; FU et al., 2008; LI, J., DUAN, H., SHI, 2011; SIGRIST et al., 2015; WONG et al., 2007; ZHENG et al., 2016).

Diante desses fatos, é de extrema urgência e importância que os REEE tenham tratamento ambientalmente adequado. Dessa forma, o gerenciamento dos REEE deve considerar o uso de recursos naturais e a geração de novos poluentes (GÖK; TULUN; GÜRBÜZ, 2017), assim como permitir a recuperação do valor agregado de materiais, especialmente os metais e as matérias-primas críticas (BALDÉ et al., 2017; IŞILDAR et al., 2018). Nos últimos anos, países desenvolvidos e em desenvolvimento têm buscando planejar e regulamentar o gerenciamento dos seus REEE com base nesses dois aspectos.

Em 2012, a *WEEE Directive* (principal instrumento de gestão dos REEE na Europa) foi atualizada. A “nova” diretiva reconceitua o lixo eletrônico como “recursos valiosos” a serem comunicados e implantados conjuntamente na União Europeia, dadas as circunstâncias aparentes de restrições de fornecimento e insegurança no uso de materiais não energéticos (KAMA, 2015).

Em 2015, a Comunidade Europeia adotou uma agenda para o crescimento sustentável (*green growth*) através da aprovação do *Circular Economy Action Plan* (COM, 2015). O plano estabelece ações com medidas que vão da produção e consumo, à gestão dos resíduos e mercado de matérias-primas secundárias (EU, 2015). Em 2017, as Nações Unidas e todos os estados membros adotaram a ambiciosa Agenda 2030, onde foram definidos 17 Objetivos para o Desenvolvimento Sustentável (ODS) (ONU, 2020). Em 2019, a União Europeia comunica a adoção do Acordo Verde (*The EU Green Deal*), onde aborda a segurança e desafio de sustentabilidade e apela para um plano de ação sobre matérias-primas críticas e para alianças de matérias-primas impulsionadas pela indústria (UE, 2020).

As matérias-primas são cruciais para o desenvolvimento econômico de qualquer país, pois formam uma forte base para o setor industrial produzir uma variedade de produtos e aplicações usados na vida cotidiana e em tecnologias modernas. Entretanto, a esgotabilidade e o uso descontrolado de certas matérias-primas são preocupações crescentes em todo o mundo.

Para enfrentar este desafio, a Comissão Europeia criou uma lista de matérias-primas críticas, a qual é sujeita a revisões e atualização regulares. As matérias-primas críticas combinam matérias-primas de grande importância econômica e de alto risco associado ao seu fornecimento (UE, 2020). De acordo com a atualização mais recente

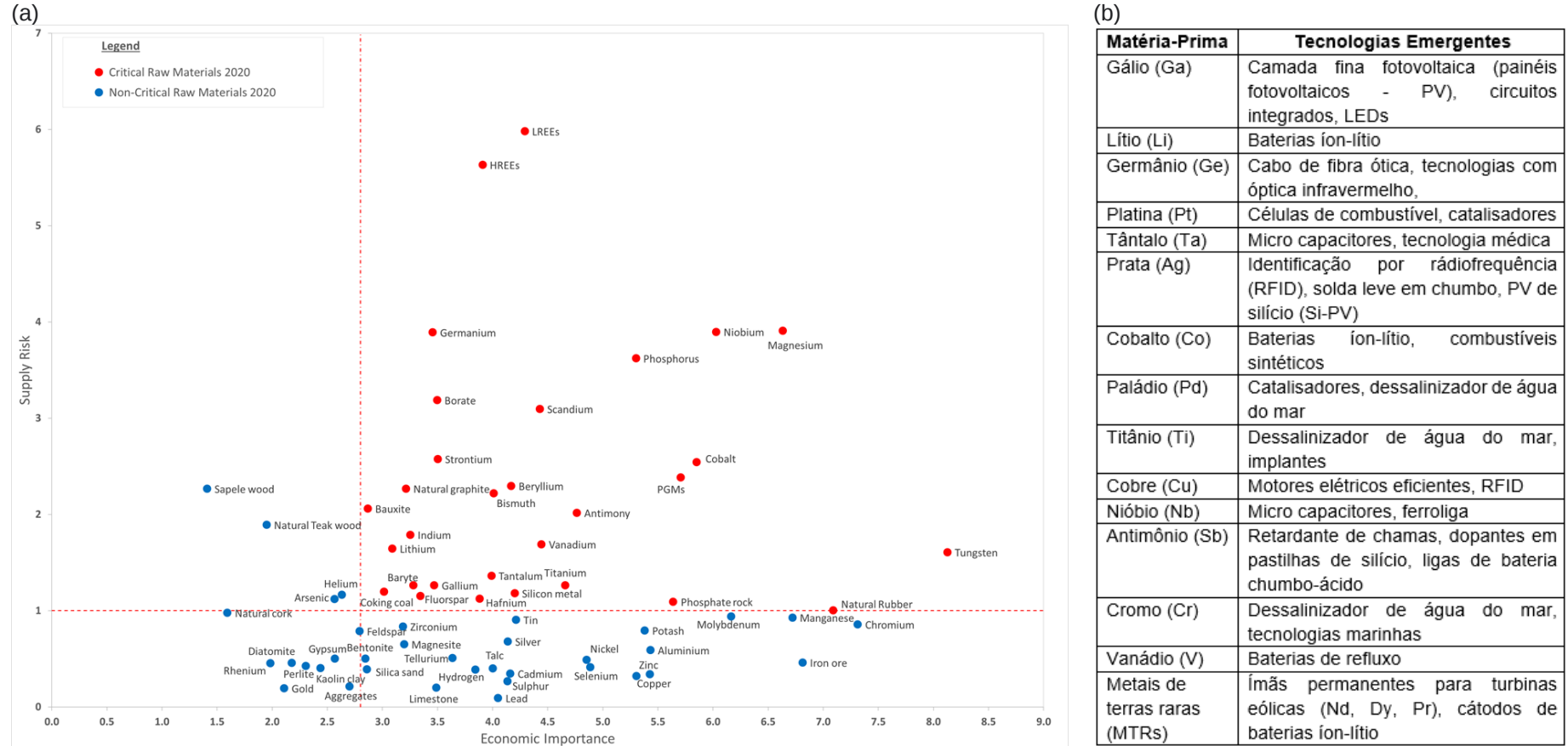
(em 2020), a lista de matérias-primas críticas contempla 83 materiais individuais, divididos em 6 grupos (incluindo metais preciosos, terras raras e metais não ferrosos) (Ver Figura 4) (UE, 2020).

De acordo com Forti et al. (2020), aproximadamente 46% (ou 25 Mt) da massa total de REEE produzida em 2019 é composta de matéria-prima crítica. Se toda a matéria-prima presente nos lixo eletrônico fosse reciclada, o valor potencial recuperado seria de 57 bilhões de dólares. No entanto, nas atuais condições de coleta e taxa de reciclagem (17,4%), o valor potencial da matéria-prima recuperada dos REEE é de 10 bilhões de dólares (FORTI et al., 2020).

Esse cenário só reforça a importância e necessidade da mudança de paradigma do lixo eletrônico de resíduo para recurso. Parajuly e Wenzel (2017) destacam que os REEE deve ocorrer tanto nas políticas quanto pelos stakeholders (incluindo produtores, gestores de REEE e autoridades) e com nos sistemas de gerenciamento, poderão ser mais bem projetados para recuperar os materiais valiosos e aumentar a geração de receita através da reciclagem.

Nos últimos anos, tem aumentado o número de publicações com abordagem da importância da recuperação de matéria-prima (crítica ou não) a partir do processamento de REEE, incluindo os trabalhos de Tuccio et al. (2017), Andrae (2018), Charles et al. (2020) e Olofsson e Mali (2019).

Figura 4 - Matérias-primas críticas e não-críticas de acordo com a União Europeia (a); Metais tecnológicos e suas aplicações (b).



Fonte: Adaptado de UE (2020) (lista de matérias-primas críticas) Charles et al. (2018) (aplicações de matérias-primas críticas em tecnologias emergentes).

Além do mais, diversas técnicas de reciclagem foram desenvolvidas para recuperar metais valiosos presentes nos REEE, especificamente em placas de circuito impresso. De acordo com Awasthi et al. (2017), essas técnicas envolvem os seguintes processos: físicos (desmontagem manual, trituração física ou processos mecânicos), químicos (geralmente usando ácido nítrico, ácido sulfúrico e peróxido de hidrogênio como agente de pré-tratamento químico), separação por lixiviação hidrometalúrgica (cianeto, tioureia, tiosulfato, halogeneto e lixiviação biológica) e separação pirometalúrgica (pirólise, pirólise a vácuo e fundição direta). De acordo com os autores, os três primeiros processos são mais sustentáveis e ecológicos. Por sua vez, Kaya (2019) destacam que os métodos de tratamento pirometalúrgico são usados mais comumente do que os métodos hidrometalúrgicos, e os métodos de recuperação aquosa estão ganhando destaque na reciclagem de lixo eletrônico.

4.4 MODELOS DE GESTÃO E TENDÊNCIAS

Ao longo dos anos, governos em todo o mundo têm buscado desenvolver políticas e legislações (regionais, nacionais ou locais) para lidar com a problemática da geração de resíduos sólidos e do seu gerenciamento. Com os REEE não tem sido diferentes. Um dos primeiros marcos legais foi a conclusão da Convenção da Basiléia, em março de 1989, que estabeleceu os mecanismos sobre o controle de movimentos transfronteiriços de resíduos perigosos e seus depósitos. Recentemente, foi publicado no Brasil o decreto Nº 10.240 de 2020 (BRASIL, 2020), que estabelece normas para a implementação de sistemas de logística reversa para REEE no país. A Figura 5 apresenta uma evolução temporal das principais políticas e legislações com impacto (direto ou indireto) na gestão dos REEE pelo mundo.

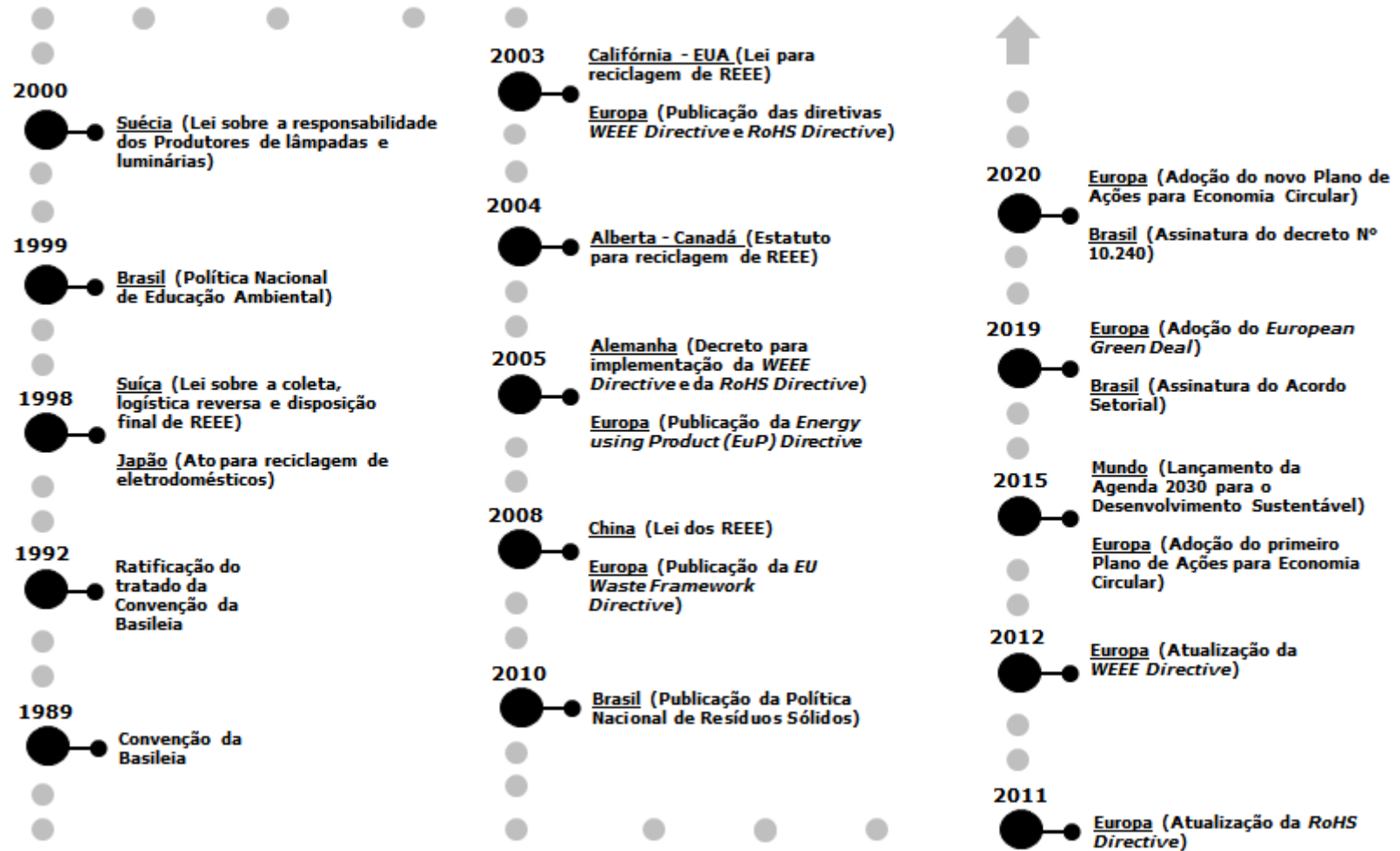
Os instrumentos legais são essenciais para direcionar as possibilidades de gerenciamento dos REEE e facilitar a criação de infraestrutura para recuperação dos materiais mais valiosos, mitigando seu potencial poluidor (BALDÉ et al., 2017). Em 2019, 78 países (71% da população mundial) já dispunham de leis nacionais para a gestão de REEE (FORTI et al., 2020). Na sua maioria, são os países desenvolvidos os que têm suas convenções, diretivas e leis para regular o descarte adequado de seus resíduos (inclusive os de REEE), principalmente baseado no princípio da responsabilidade estendida do produtor (*Extended Producer Responsibility* - EPR). A EPR cobra do produtor a responsabilidade pelo seu produto até a fase pós-consumo,

incentivando o investimento na modificação dos processos de produção e no *design* do produto para minimizar o uso de recursos naturais e a geração de poluentes (Garlapati, 2016). No entanto, Cesaro et al. (2018) acreditam que a EPR está longe de ser um instrumento autossuficiente para promover um gerenciamento adequado dos REEE na perspectiva de circularidade, sendo necessário identificar os desafios específicos de cada país/região para que se possa abranger tais demandas. Entre os desafios a serem enfrentados para a circularidade dos materiais dentro do gerenciamento de REEE, pode-se citar: (i) a forte informalidade da atividade (principalmente nos países de baixa renda); (ii) a variação de volumes coletados devido às condições econômicas dos países; (iii) a exportação ilegal de REEE (especialmente para países Asiáticos); e (iv) as práticas ilegais de gerenciamento de REEE devido a falta de legislação integrada (CESARO et al., 2018; KUNZ; MAYERS; VAN WASSENHOVE, 2018).

O modelo econômico linear comumente praticado nos países, também conhecido como “*take-make-dispose*”, é baseado no princípio de que os recursos naturais são ilimitados e que há espaço ilimitado para o descarte dos resíduos gerados (GRDIC; NIZIC; RUDAN, 2020). No contexto atual, esse modelo é insustentável e precisa de mudanças que considerem a reutilização, a recuperação e a recirculação de materiais/produtos como aspectos importantes para a sustentabilidade da produção, sendo estas as bases do conceito da economia circular. Desse modo, a economia circular surge como um modelo inovador e com potencial de promover benefícios, incluindo a redução na demanda por matéria-prima e no consumo de recursos básicos, a geração de emprego e a prevenção dos impactos negativos decorrentes da exploração e processamento de recursos naturais (XAVIER et al., 2019).

Devido à presença de metais preciosos e terras raras na composição dos EEE, o WEEE é considerado um estoque urbano de metais. Desse modo, a mineração urbana surge como uma alternativa atraente para o gerenciamento de REEE, ao possibilitar a exploração sustentável de recursos minerais oriundos dos resíduos, reduzindo assim a ingestão de materiais e estimulando a circularidade na cadeia de suprimentos (XAVIER et al., 2019).

Figura 5 - Evolução temporal das políticas e legislações para gestão de REEE



Fonte: O Autor (2024).

No entanto, para que o retorno desses materiais ocorra de forma mais eficiente, é necessário um sistema de gestão que permita a recuperação desses materiais, através de um sistema formal de devolução (*take-back system*), impedindo que esse resíduo seja descartado inadequadamente. Nesse sentido, a logística reversa pode atuar como um instrumento facilitador da reutilização, reparo, redistribuição e reciclagem, ações cruciais para a transição do modelo linear para o modelo circular. Porém, essa transição não pode se resumir apenas a uma questão de infraestrutura e avanço tecnológico, são requeridas mudanças sistemáticas nos diversos setores da economia (indústria, energia, transporte, agricultura, componentes sociais entre outros) (GRDIC; NIZIC; RUDAN, 2020).

Nas últimas duas décadas, surgiu uma tendência para a disseminação do conceito e desenvolvimento de modelos de economia circular, em consequência dos desafios para se alcançar um desenvolvimento econômico e sustentável, considerando a erradicação da pobreza em todas as suas formas e dimensões, a redução das desigualdades sociais, as mudanças climáticas, a escassez hídrica, o esgotamento dos recursos naturais, as perdas de biodiversidade, entre outros. Nesse sentido, “*the EU Waste Framework Directive*” (EU, 2008) estabelece a hierarquia a ser aplicada pelos estados membros da União Europeia na gestão dos resíduos (prevenção da geração, preparo para o reuso, reciclagem, recuperação e disposição), tendo como objetivos principais a prevenção e redução dos impactos da geração, o gerenciamento adequado dos resíduos e a eficiência no uso dos recursos.

Em 2015, a Comunidade Europeia adotou uma agenda para o crescimento sustentável através da aprovação do *Circular Economy Action Plan*. O plano de ações tem a finalidade de aumentar o valor dos produtos, materiais e recursos, promovendo seu uso pelo maior tempo possível, minimizando a geração de resíduos (EU, 2015). Para sua implementação, em 2017, foram apresentados um conjunto de medidas (EU, 2017), onde o ecodesign de produtos, a capacitação do consumidor e a circularidade são destacadas como estratégias essenciais para uma economia circular. Ainda em 2017, as Nações Unidas e todos os estados membros adotaram a ambiciosa Agenda 2030, onde foram definidos 17 Objetivos para o Desenvolvimento Sustentável (ODS) e 169 metas para erradicar a pobreza, alcançar a igualdade de gênero e o empoderamento de mulheres e meninas, proteger o planeta e garantir a prosperidade para todos, ao longo dos 15 anos seguintes (ONU, 2020). De acordo Schroeder, Anggraeni e Weber (2019), com as práticas e os modelos de economia circular podem

ajudar a atingir objetivos e metas do desenvolvimento sustentável e, nesse contexto, a gestão adequada dos REEE também pode contribuir para o alcance de alguns dos ODS.

A gestão dos REEE está diretamente relacionada a alguns dos objetivos do desenvolvimento sustentável (ODS), como por exemplo: ODS 3 (saúde e bem-estar), ODS 6 (água potável e saneamento), ODS 8 (trabalho decente e crescimento econômico) e ODS 14 (proteção da biodiversidade nos oceanos) (BALDÉ et al., 2017). Ainda, devido à elevada demanda por matéria-prima para a produção dos EEE, a recuperação de materiais dos REEE está fortemente ligada às metas relacionadas à pegada de material (ODS 8.4.1 e 12.1.1) e consumo de material doméstico (ODS 8.4.2 e 12.2.2).

Em 2010, o governo brasileiro instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) (BRASIL, 2010), com metas de curto, médio e longo prazo a serem cumpridas pelo governo, iniciativa privada e sociedade civil. Em seu artigo 33, a PNRS estabelece como obrigação dos fabricantes, importadores, distribuidores e comercializadores de produtos eletrônicos e seus componentes, de estruturar e implantar sistemas de logística reversa, mediante a devolução dos produtos após a utilização pelo consumidor independente da gestão pública da resíduos sólido.

Para cumprir a atual política de resíduos sólidos, a Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica (ABINEE), sociedade civil sem fins lucrativos que representa os setores elétrico e eletrônico em todo o Brasil, fundou em 2016 a Green Electron (gerente de logística de equipamentos eletrônicos) e criou o Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico do Complexo Elétrico e Eletrônico (IPD Eletron) (ABINEE, 2020). Em 31 de outubro de 2019, um importante passo para a implantação do PNRS foi dado com a assinatura do acordo setorial de logística reversa de produtos eletroeletrônicos e seus componentes.

O acordo setorial foi firmado entre o governo brasileiro, representado pelo Ministério do Meio Ambiente, e representantes de entidades vinculadas ao setor de equipamentos eletrônicos como ABINEE, Green Eletron, Associação Brasileira de Distribuição de Tecnologia da Informação (ABRADISTI) e Federação dos Associações das Empresas Brasileiras de Tecnologia da Informação (ASSESPRO). O acordo setorial visa estruturar, implantar e operacionalizar o sistema de logística reversa de produtos eletroeletrônicos para uso doméstico, colocado no mercado nacional (BRASIL, 2019).

Após a assinatura do acordo setorial, o Decreto nº 10.240, de 12 de fevereiro de 2020, estabeleceu regras para a implantação de um sistema de logística reversa obrigatório para produtos elétricos e eletrônicos domésticos e seus componentes (BRASIL, 2020). O Decreto nº 10.240 exige que os fabricantes e importadores reciclem ou descartem adequadamente todos os resíduos eletrônicos recebidos pelo sistema de logística reversa. Assim, um novo modelo de gestão de lixo eletrônico baseado em um sistema de logística reversa deve ser desenvolvido para implantação em todo o país.

5 GERENCIAMENTO DE RESÍDUOS DE EQUIPAMENTOS ELETROELETRÔNICOS NA PERSPECTIVA DE UMA ECONOMIA CIRCULAR: UMA REVISÃO

Este capítulo da tese resultou na publicação do artigo científico intitulado “***Waste of electrical and electronic equipment management from the perspective of a circular economy: A Review***” no jornal acadêmico *Waste Management & Research*. Os autores são: José Francisco De Oliveira Neto, Laíse Alves Candido, Anísio Brasileiro De Freitas Dourado, Simone Machado Santos e Lourdinha Florencio.

RESUMO

Além das dificuldades envolvidas na gestão dos resíduos sólidos convencionais, a gestão dos resíduos de equipamentos eletroeletrônicos (REEE) é significativamente mais complexa devido à sua composição química incomum e rápida geração. Tanto os países desenvolvidos como os países em desenvolvimento têm procurado soluções para lidar com os problemas causados pelo crescente fluxo de REEE, especialmente no que diz respeito a soluções sustentáveis baseadas na redução da exploração de recursos através da recuperação de materiais provenientes deste tipo de resíduos. Neste contexto, este trabalho apresenta uma revisão bibliográfica qualitativa e abrangente das publicações sobre a gestão de REEE, na perspectiva de uma economia circular. Os resultados mostraram que as primeiras publicações sobre o tema surgem em 2006, com um aumento significativo a partir de 2015, ano em que foi instituído o Plano de Ação para a Economia Circular na Comunidade Europeia. Os autores de maior destaque têm dado ênfase às pesquisas sobre reciclagem, reutilização e tecnologias para recuperação de materiais/energia a partir de REEE. No entanto, poucos estudos foram encontrados com foco na prevenção/redução da geração de REEE, ações prioritárias da hierarquia de gestão de REEE. Os trabalhos analisados mostram que a atual gestão dos REEE, apesar de considerar a circularidade dos materiais, prioriza o desenvolvimento de soluções tecnológicas do tipo fim de tubo, grandemente representadas pela recuperação de materiais, em vez de evitar a geração, que pode ser prejudicial à sustentabilidade a longo prazo. O trabalho finaliza com a apresentação de uma análise SWOT-TOWS destinada a definir as principais estratégias para a melhoria da gestão de REEE numa perspectiva de economia circular.

Palavras-chave: prevenção; reuso; reciclagem; recuperação de materiais; economia circular; sustentabilidade.

INTRODUÇÃO

O desenvolvimento tecnológico e o surgimento de dispositivos “inteligentes” aumentaram o número de equipamentos eletroeletrônicos (EEE) produzidos, consumidos e rapidamente descartados como resíduos (Kiddee et al., 2013; Ongondo et al., 2011). A geração mundial estimada de REEE aumentou cerca de 20% (crescimento médio de 6,7% ao ano), entre 2016 (44,7 Mt / 6,1 kg per capita) (Baldé et al., 2017) e 2019 (53,6 Mt / 7,3 kg per capita) (Forti et al., 2020).

Os resíduos de equipamentos eletroeletrônicos (REEE), ou *e-waste* (resíduos eletrônicos), são divididos em dez categorias, de acordo com a Diretiva REEE (2012/19/UE): Grandes eletrodomésticos; Pequenos eletrodomésticos; Equipamentos de TI e telecomunicações; Equipamentos de consumo e painéis fotovoltaicos; Equipamento de iluminação; Ferramentas elétricas e eletrônicas; Brinquedos, equipamentos de lazer e esportes; Dispositivos médicos (com exceção de todos os produtos implantados e infectados); Instrumentos de monitoramento e controle; e Dispensadores automáticos (UE, 2012). Dentre todas as categorias, os resíduos de equipamentos de TI e telecomunicações estão entre os mais gerados (Ongondo et al., 2011), pois são os dispositivos que apresentam substituição mais rápida e menor vida útil (Betts, 2008; Cobbing, 2008).

Os REEE apresentam uma composição heterogênea, podendo conter substâncias perigosas (incluindo cádmio, bário, mercúrio, PBB (bifenilo polibromado), PCB (bifenilo policlorado), BFR (retardadores de chama à base de brometo)), o que prejudica a sua gestão, especialmente no ambiente doméstico. Ainda assim, a presença de metais valiosos (ouro, prata, cobre, platina, paládio, entre outros) e matérias-primas críticas (*critical raw materials* - CRM) tornam a reciclagem de REEE uma atividade de interesse económico (Cesaro et al., 2018). Portanto, a escolha do sistema de gestão mais adequado deve considerar o uso de recursos naturais e a geração de novos poluentes (Gök et al., 2017), bem como permitir a recuperação do valor agregado dos materiais, especialmente os metais e CRM presente nos REEE (Baldé et al., 2017; Işildar et al., 2018).

Nos países desenvolvidos, a reciclagem de REEE é realizada de forma legal e segura, até a fase final de refino e recuperação de materiais raros e preciosos (Perkins et al., 2014). No entanto, nos países em desenvolvimento, o setor informal é o que

mais contribui para a reciclagem de REEE, adotando práticas rudimentares e inseguras (Ongondo et al., 2011; Oliveira et al., 2012; Tsydenova e Bengtsson, 2011). Muitos destes países têm enfrentado graves problemas ambientais e de saúde pública causados por atividades ilegais de reciclagem de REEE, especialmente devido à presença de metais pesados (Awasthi et al., 2016; Gupt, 2014; Kiddee et al., 2013). Além da necessidade de gestão dos REEE gerados em seu território, muitos desses países em desenvolvimento são destino dos REEE gerados nos países desenvolvidos, sendo eventualmente exportados para reforma, reutilização ou reciclagem (Parajuly e Fitzpatrick, 2020; Baldé e outros, 2017).

Os instrumentos legais são essenciais para direcionar as possibilidades de gestão dos REEE e facilitar a criação de uma infraestrutura para a recuperação dos materiais mais valiosos, mitigando o seu potencial poluidor (Baldé et al., 2017). Em 2019, 78 países (71% da população mundial) já possuíam leis nacionais para a gestão de REEE (Forti et al., 2020). Na sua maioria, são os países desenvolvidos que têm as suas convenções, directivas e leis para regular a destinação adequada dos seus resíduos (incluindo REEE), especialmente com base no princípio da responsabilidade estendida do produtor (*extended producer responsibility* - EPR). A EPR institui ao produtor a responsabilidade pelo seu produto até a fase pós-consumo, incentivando o investimento na modificação dos processos produtivos e no design dos produtos para minimizar o uso de recursos naturais e a geração de poluentes (Garlapati, 2016).

No entanto, Cesaro et al. (2018) acreditam que o EPR está longe de ser um instrumento autossuficiente para promover a gestão adequada dos REEE na perspectiva da circularidade, sendo necessário identificar os desafios específicos de cada país/região para que tais demandas possam ser atendidas. Desafios como a forte informalidade da actividade (especialmente nos países de baixos rendimentos), a variação nos volumes recolhidos devido às condições económicas, a exportação ilegal de REEE (especialmente para países asiáticos), as práticas ilegais de gestão de REEE e a falta de legislação integrada são alguns dos desafios a serem enfrentados para a circularidade dos materiais na gestão de REEE (Cesaro et al., 2018; Kunz et al., 2018; Olofsson e Mali, 2019).

O modelo económico linear comumente praticado nos países, também conhecido como “*take-make-dispose*”, baseia-se no princípio de que os recursos

naturais são ilimitados e há espaço ilimitado para o descarte dos resíduos gerados (Grdic et al., 2020). No contexto atual, este modelo é insustentável e necessita de mudanças que considerem a reutilização, a recuperação e a recirculação de materiais/produtos como aspectos importantes para a sustentabilidade da produção, sendo estas as bases do conceito de economia circular. A economia circular surge como um modelo inovador e com potencial para promover benefícios, incluindo a redução da procura de matérias-primas e do consumo de recursos básicos, a geração de emprego e a prevenção de impactos negativos decorrentes da exploração e processamento de recursos naturais (Xavier et al., 2019). Portanto, a economia circular pressupõe uma gestão adequada dos resíduos sólidos (Di Foggia e Beccarello, 2021), sendo uma estratégia de produção sustentável (Camana et al., 2021) e circularidade de materiais.

A Fundação Ellen MacArthur (2019) define a economia circular como uma economia industrial regenerativa por design ou propósitos. Para Webster (2017), o objetivo de uma economia circular é criar produtos, componentes e materiais com o maior valor de serviço ao longo do tempo. O conceito mais amplo de economia circular baseia-se no princípio 6R (reutilizar, reciclar, redesenhar, refabricar, reduzir, recuperar) (Jawahir e Bradley, 2016). Os primeiros relatos de publicações que utilizam o termo “economia circular” são da década de 1970 (Boulding, 1966; Stahel e Reday, 1976; Pearce e Turner, 1989). Desde então, vários estudos sobre economia circular foram publicados em todo o mundo (Ghisellini et al., 2016; Lieder e Rashid, 2016), inclusive sobre a perspectiva da gestão de resíduos sólidos (Mancini et al., 2021; Tsai et al., 2020; Cesaro et al., 2018). A Figura 5.1 apresenta algumas concepções que contribuíram para a formação do conceito de economia circular.

Dada a presença de metais preciosos e terras raras na composição dos EEE, os REEE são considerados um estoque urbano de metais. Assim, a mineração urbana surge como uma alternativa atrativa para a gestão de REEE, permitindo a exploração sustentável dos recursos minerais derivados dos resíduos, reduzindo assim a ingestão de materiais e estimulando a circularidade na cadeia de abastecimento (Xavier et al., 2019; Van Eygen et al., 2016; Kuong et al., 2019). Contudo, para que a devolução destes materiais ocorra de forma mais eficiente, é importante que exista um sistema de gestão que permita a recuperação destes materiais, através de um sistema formal de devolução (sistema *take-back*), evitando que estes resíduos sejam eliminados de

forma inadequada. Nesse sentido, a logística reversa pode atuar como instrumento facilitador do reaproveitamento, reparo, redistribuição e reciclagem, ações cruciais para a transição do modelo linear para o circular. No entanto, esta transição não pode ser resumida apenas a uma questão de infraestruturas e de avanço tecnológico, sendo também necessárias mudanças sistemáticas nos vários setores da economia (indústria, energia, transportes, agricultura, componentes sociais, entre outros) (Grdic et al., 2020).

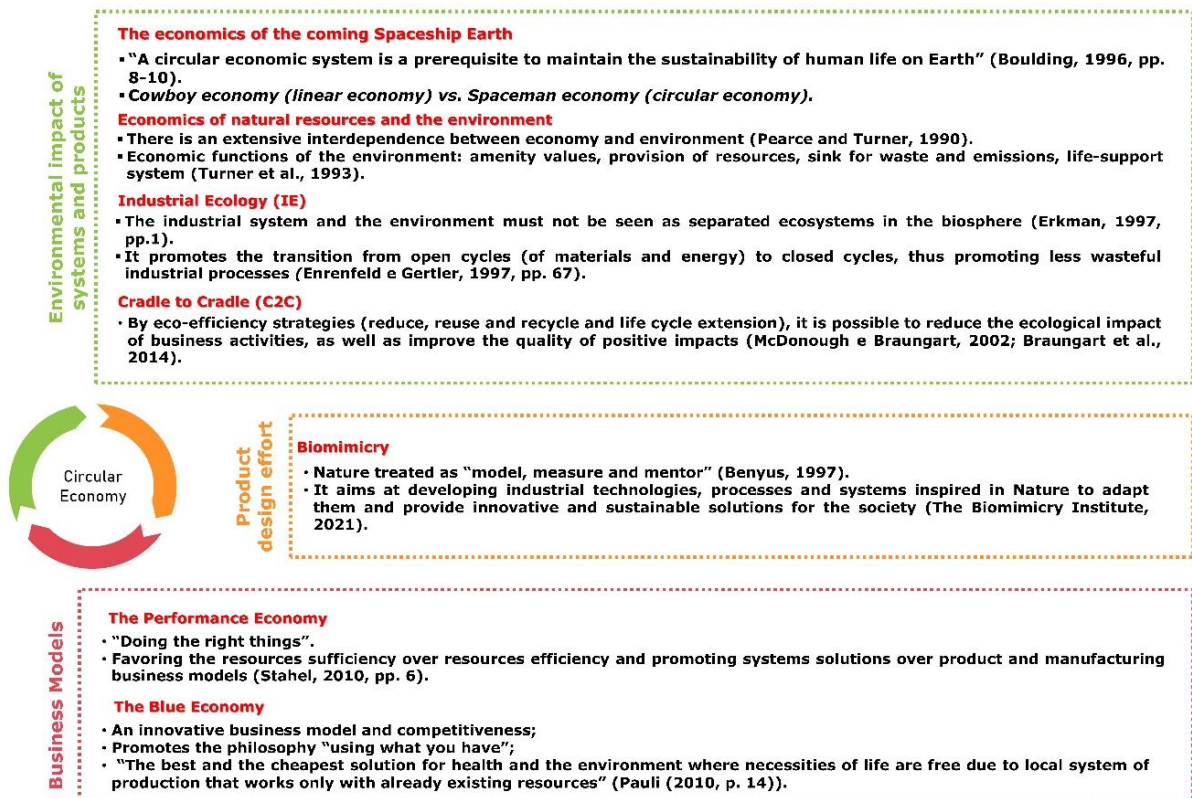
Nas últimas duas décadas, surgiu uma tendência para a disseminação do conceito e desenvolvimento de modelos de economia circular, como consequência dos desafios para alcançar um desenvolvimento económico e sustentável, considerando a erradicação da pobreza em todas as suas formas e dimensões, a redução nas diferenças sociais, nas alterações climáticas, na escassez de água, no esgotamento dos recursos naturais, nas perdas de biodiversidade, entre outros. Neste sentido, a Diretiva Quadro de Resíduos da União Europeia (Diretiva 2008/98/CE) (UE, 2008) estabelece uma hierarquia a ser aplicada pelos estados membros da União Europeia na gestão de resíduos, apresentando como principais objetivos a prevenção e redução dos impactos de geração, gestão adequada dos resíduos e eficiência no uso dos recursos. Em 2015, a Comunidade Europeia adotou um calendário para o crescimento sustentável (crescimento verde) através da aprovação do Plano de Ação para Economia Circular (UE, 2015). O plano de ação visa aumentar o valor dos produtos, materiais e recursos, promovendo a sua utilização durante o maior tempo possível, minimizando a geração de resíduos. Para a sua implementação, em 2017, foi apresentado um conjunto de medidas (UE, 2017), onde o ecodesign dos produtos, o empoderamento dos consumidores e a circularidade são enfatizados como estratégias essenciais para uma economia circular.

Ainda em 2017, as Nações Unidas e todos os estados membros adoptaram a ambiciosa Agenda 2030, onde foram definidos 17 Objectivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) e 169 metas para erradicar a pobreza, alcançar a igualdade de género e empoderar mulheres e raparigas, proteger o planeta e garantir a prosperidade para tudo, ao longo dos 15 anos seguintes (ONU, 2020). As práticas e modelos de economia circular podem auxiliar no alcance dos objetivos e metas do desenvolvimento sustentável (Schroeder et al., 2019) e, neste contexto, a gestão adequada dos REEE também pode contribuir para o alcance de alguns desses

objetivos. A gestão de REEE está diretamente relacionada com alguns dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), por exemplo: ODS 3 (saúde e bem-estar), ODS 6 (água potável e saneamento), ODS 8 (trabalho digno e crescimento económico) e ODS 14 (proteção da biodiversidade nos oceanos) (Baldé et al., 2017). Adicionalmente, dada a elevada procura de matéria-prima para a produção de EEE, a recuperação dos materiais provenientes de REEE está fortemente ligada aos objetivos relacionados com a pegada material (ODS 8.4.1 e 12.1.1) e o consumo de material nacional (ODS 8.4.2 e 12.2.2).

Diante do exposto, este trabalho tem como objetivo mostrar um panorama dos trabalhos de pesquisa científica sobre práticas de gestão de REEE, na perspectiva de uma economia circular, identificando padrões temáticos, o impacto de autores e referências de destaque, tendências e lacunas para direcionar pesquisas futuras.

Figura 6 - Concepções que contribuíram para a formação do conceito de Economia Circular.



ESQUEMA DE REVISÃO

Moher et al. (2009) definem uma revisão sistemática como uma revisão sobre uma questão claramente formulada. Na revisão sistemática, são utilizados métodos sistemáticos e explícitos para identificar, selecionar e avaliar criticamente trabalhos de pesquisa relevantes. Nesta revisão sistemática foi empregado o método PRISMA (preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses). PRISMA é um conjunto mínimo de itens baseado em evidências para relato em revisões sistemáticas e meta-análises, que apresenta um diagrama de fluxo para descrever o fluxo de informações nas diferentes fases de uma revisão sistemática (incluindo o número de registros identificados, incluídos e excluídos) (PRISMA, 2021). A revisão foi realizada em 5 etapas, descritas a seguir e detalhadas na Figura 5.2.

Etapa 1 - Identificação: o levantamento bibliográfico foi realizado utilizando a ferramenta de "busca avançada" nas bases de dados *Scopus* e *Web of Science*. Termos como "e-waste", "WEEE", "electronic waste", "electrical and electronic waste", "circular economy" e outros termos importantes para a implementação da economia circular ("closed-loop", "reverse supply chain", "reverse logistic", "prevention", "reuse",

"remanufacturing", "refurbishment", "disassembly", "repair", "ecodesign", "recycling", "recovery", "urban mining") foram usados (ver Figura 7). Como critérios de inclusão (nas bases de dados), foram considerados apenas "artigos" escritos em "inglês", e publicados no período de 1945 a dezembro de 2020.

Etapa 2 - Seleção: Como resultado da etapa anterior, foram identificadas 510 publicações na base de dados *Scopus* e 172 publicações na base de dados *Web of Science*. Adicionalmente, foi realizada busca e identificação de duplicatas (o mesmo artigo presente nas duas bases de dados). As duplicatas foram identificadas (136 publicações) e eliminadas de uma das bases de dados. Como resultado, foram selecionadas 546 publicações para a etapa subsequente.

Etapa 3 – Elegibilidade: etapa em que os artigos foram analisados de acordo com sua relevância e aderência ao tema proposto (REEE e economia circular). Nesta etapa, foram considerados apenas os estudos que abordaram: (i) estratégias e práticas de economia circular para eliminar, reduzir ou controlar a poluição de REEE; e (ii) sistema de gestão de REEE (restrito a grandes e pequenos electrodomésticos, equipamentos de TI e telecomunicações, equipamentos de consumo e equipamentos de iluminação) que proporciona implicações para as partes interessadas ou para as cadeias de abastecimento. Estudos com foco em águas residuais e/ou em outros tipos de resíduos diferentes de REEE foram excluídos da revisão. Foram analisados títulos, resumo e palavras-chave e, ao final desta etapa, 415 artigos não atenderam aos critérios de elegibilidade e foram excluídos da pesquisa.

Etapa 4 - Inclusão: foram selecionadas 131 publicações e incluídas na análise qualitativa considerando características e dados da pesquisa (ano de publicação, local do estudo, padrão temático do artigo).

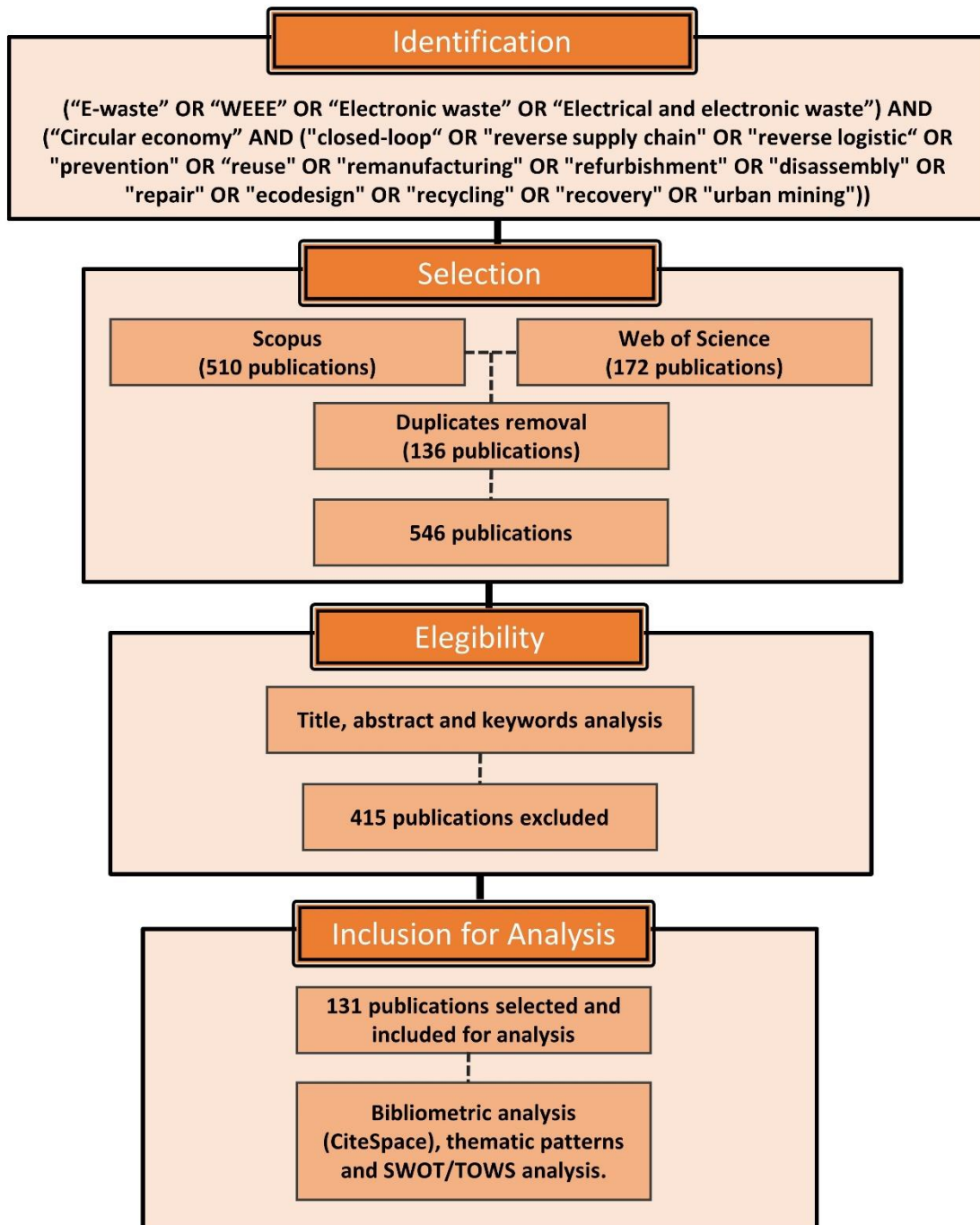
Etapa 5 – Análise: inicialmente, os artigos incluídos para análise foram divididos segundo padrões temáticos. A definição destes padrões temáticos baseou-se na hierarquia de gestão de resíduos estabelecida pela Diretiva-Quadro Resíduos da UE (Diretiva 2008/98/CE): prevenção, preparação para reutilização, reciclagem e valorização (excluindo eliminação). Além disso, temas relevantes para a gestão de REEE na economia circular, como design de produtos e políticas, também foram considerados padrões temáticos. Posteriormente, os 131 artigos foram submetidos à

análise bibliométrica por meio do software CiteSpace. O CiteSpace é uma ferramenta que permite o mapeamento e a visualização de novas tendências na literatura científica, pelos indicadores de frequência de citação e centralidade. Partindo da premissa de que os autores citam os trabalhos que consideram importantes para suas pesquisas, a análise do indicador de frequência de citação visa identificar os atores (isto é, autores, referências, palavras-chave etc.) que influenciam o desenvolvimento de um campo de pesquisa. A frequência de citações dos artigos foi contabilizada dentro da amostra de artigos selecionados para análise, neste caso, entre os 131 artigos. O tamanho dos nós indica a frequência de citação de cada autor, de modo que os nós maiores indicam os atores mais citados. O indicador de centralidade permite identificar os atores que estão conectando dois ou mais grandes grupos de nós, ou seja, os atores centrais. Chen (2006) enfatiza que pela centralidade também é possível identificar pontos de inflexão intelectual, ou seja, quando o conhecimento abre caminho para novidades científicas. O anel rosa que envolve o nó evidencia a centralidade de intermediação, cujos valores variam entre 0 e 1 (Chen, 2014). Isso significa que anéis rosa mais grossos representam um maior grau de centralidade (valor mais próximo de 1). E finalmente, cada linha ligada a nós representa o caminho percorrido para compartilhar a informação, e a disposição das cores ajuda na identificação das partes mais antigas e mais recentes da rede.

Para finalizar o trabalho, foi realizada uma análise SWOT-TOWS para identificar os fatores positivos (pontos fortes e oportunidades) e negativos (pontos fracos e ameaças) relativos à gestão de REEE, na perspectiva da economia circular. Srivastava et al. (2005) destacam a importância da análise SWOT-TOWS como ferramenta para explorar as possibilidades e meios de alavancar sistemas de gestão de resíduos sólidos. Além disso, a ferramenta tem sido amplamente aplicada para a tomada de decisões em diversos setores, incluindo gestão de resíduos (Gomes et al., 2020; Yuan, 2013) e avaliação ambiental (Grošelj e Zadnik Stirn, 2015; Rachid e El Fadel, 2013).

A análise SWOT-TOWS permitiu a composição de um panorama das estratégias de atuação necessárias à sustentabilidade da gestão dos REEE, com base nos principais artigos selecionados nesta revisão, considerando as tendências e lacunas para direcionar pesquisas futuras.

Figura 7 - Esquema da metodologia adotada (protocolo de pesquisa).



RESULTADOS E DISCUSSÃO

Distribuição temporal e geográfica dos artigos

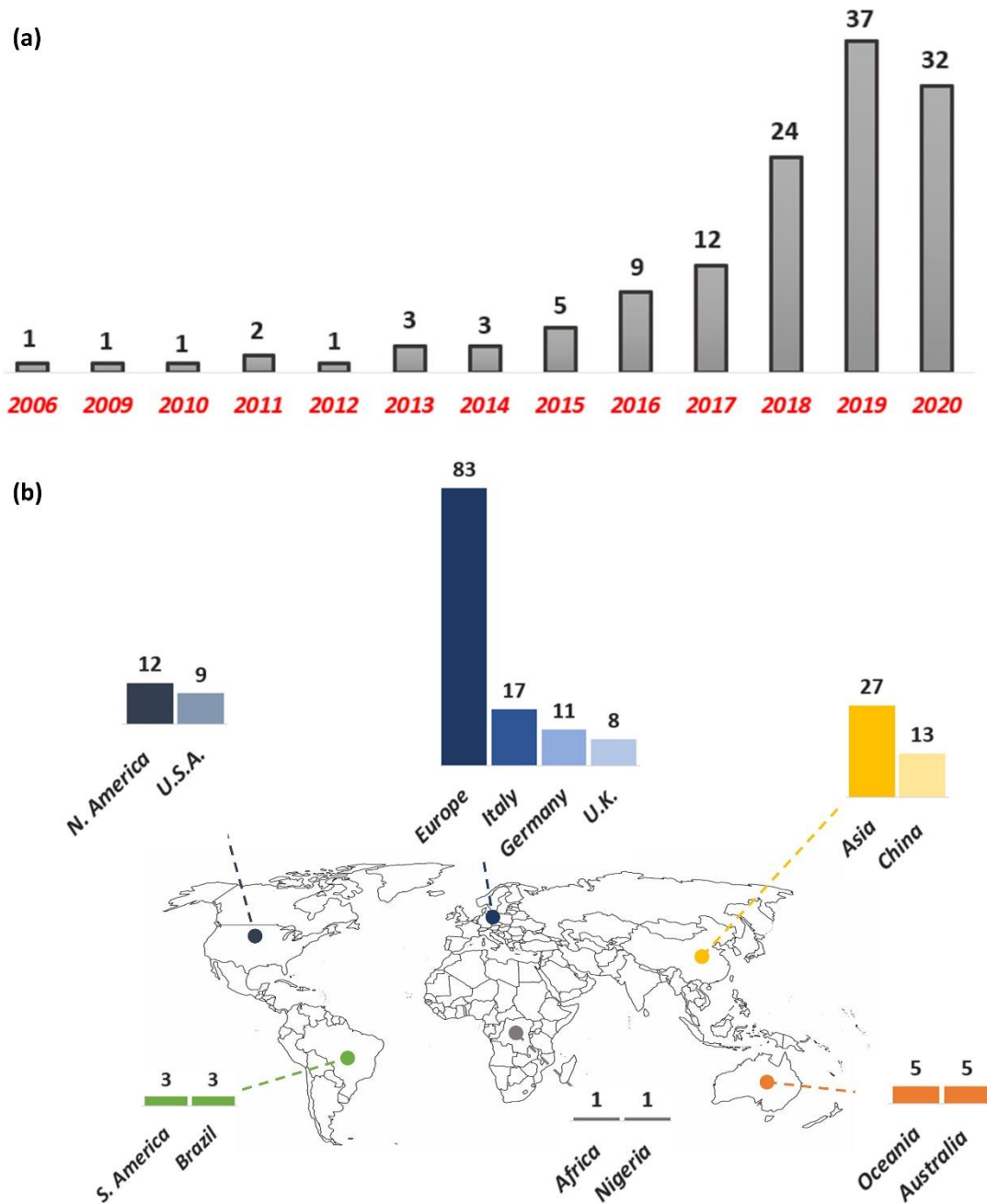
A Figura 8 apresenta as distribuições temporais e geográficas das publicações, no período de 2006 a 2020. A partir de 2015, com a aprovação do Plano de Ação para a Economia Circular e a divulgação do ODS (UE, 2015), há um aumento no interesse científico sobre o tema da economia circular na gestão de REEE, também por parte

de países que não são membros da União Europeia. Apesar disso, em 2020, a trajetória crescente de publicações foi interrompida, possivelmente por causa da pandemia da COVID-19. Os trabalhos de Xu (2020) e Kibbe (2020) mostraram que a pandemia trouxe impacto na pesquisa global, especialmente em trabalhos de pesquisa que não estão relacionados à pandemia de COVID-19 (Aviv-Reuven e Rosenfeld, 2021), como é o caso desta pesquisa.

A distribuição geográfica dos 131 artigos (Figura 8b) foi organizada de acordo com a filiação do primeiro autor. Os resultados mostram que os seguintes continentes concentram mais de 90% dos artigos publicados: Europa com 83 artigos (63%), Ásia com 23 artigos (17%) e Américas com 15 artigos (11%).

No continente europeu, os países em que houve maior número de publicações foram: Itália, com 17 artigos, com destaque para Cucchiella et al. (2015) (498 citações), Ardente e Mathieux (2014) (92 citações), Marra et al. (2018) (53 citações) e Cucchiella et al. (2016) (49 citações); Alemanha, com 11 artigos, com destaque para Sommerhuber et al. (2017) (78 citações), Manhart (2011) (69 citações), Sommerhuber et al. (2016) (60 citações) e Hagelüken et al. (2016) (53 citações); o Reino Unido, com 9 artigos, com destaque para Kama (2015) (62 citações), Ongondo et al. (2015) (60 citações) e Ongondo et al. (2013) (50 citações); No caso da União Europeia, além do maior número de países associados, a região possui legislação para REEE desde a década de 1990, com destaque para: (i) Diretiva REEE (2002/96/EC) (EU, 2003a) e sua revisão versão, Diretiva REEE (2012/19/UE) (UE, 2012); (ii) Diretiva de Restrição de Substâncias Perigosas (RoHS), (UE, 2003b); (iii) A Diretiva-Quadro Resíduos da UE (Diretiva 2008/98/CE) (UE, 2008); (iv) Diretiva da UE sobre Produtos que Utilizam Energia (EuP) (Diretiva 2009/125/CE) (UE, 2009). Destaca-se a importância e o impacto no aumento de publicações após a aprovação do Plano de Ação para a Economia Circular (aprovado em 2015 e implementado em 2017) (UE, 2015).

Figura 8 - Distribuição temporal (a) e geográfica (b) dos artigos avaliados nesta revisão.



No continente asiático, a China liderou o ranking de publicações sobre REEE na perspectiva da economia circular com 13 artigos, com destaque para Zeng et al. (2018) (128 citações), Mo et al. (2009) (105 citações), Awasthi et al. (2018) (91 citações), Han et al. (2018) (86 citações), Veenstra et al. (2010) (63 citações), Gu et al. (2017) (51 citações) e Tong et al. (2018) (43 citações). Hoje em dia, a China é o

maior produtor e consumidor de produtos eletrônicos (Tong et al., 2017), o que deve ter levado a uma procura de melhorias na gestão dos seus REEE, com foco na promoção de uma economia circular. Adicionalmente, com base na experiência internacional (Convenção de Basileia e legislação da UE), em 1 de janeiro de 2009, entrou em vigor a “Lei de Promoção da Economia Circular da República Popular da China”, que tem como conceito central a EPR (Veenstra et al., 2010).

Nas Américas, dos 15 artigos sobre o tema, 9 foram publicados nos Estados Unidos e 3 no Brasil. Dentre as publicações produzidas por autores norte-americanos, os artigos publicados por O'Connor et al. (2016) (50 citações) e Kunz et al. (2018) (48 citações) são as publicações mais citadas. Nos Estados Unidos, alguns estudos possuem regulamentações próprias para REEE, em geral baseadas em ERP. Muitas das iniciativas de reciclagem de REEE são apoiadas pela EPA (Agência de Proteção Ambiental), por parcerias com fabricantes e varejistas de produtos eletrônicos (Baldé et al., 2017). Das publicações produzidas por autores brasileiros, Nascimento et al. (2019) (178 citações), Xavier et al. (2019) (30 citações) e Ottoni et al. (2020) (12 citações) são destacados pelo número de citações. No Brasil, a Lei 12.305/2010, que estabelece a Política Nacional de Resíduos Sólidos, indica a necessidade de responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida do produto e logística reversa para todos os resíduos sólidos. Em 2019, foi assinado o “Acordo Setorial para Implantação de Sistemas de Logística Reversa de Produtos Elétricos e Eletrônicos” entre o Governo Federal e as entidades representativas do setor. Em 12 de fevereiro de 2020, o Decreto nº 10.240 estabeleceu regras para implantação de sistema obrigatório de logística reversa para EEE domiciliares (Brasil, 2020).

A Austrália foi o único país da Oceania com publicações sobre o tema (5 artigos). Implementada em 2011, a lei australiana para gestão de REEE, “*The National Television and Computer Recycling Scheme*”, baseia-se no EPR e define metas a serem alcançadas pela indústria (Baldé et al., 2017). As publicações que mais se destacam quanto ao número de citações são: Golev e Corder (2017) (37 citações) e Islam e Huda (2019) (20 citações).

A Nigéria foi o único país africano a ter um artigo publicado (1 artigo), entre os pesquisados nesta revisão. No país, a EPR permitiu a formação da EPRON (*E-Waste Producer Responsibility Organization of Nigeria*), uma organização sem fins lucrativos

em parceria com os produtores de produtos eletrônicos (HP, Dell, Phillips, Microsoft e Deloitte) (Forti et al. , 2020). Ezeudu e Ezeudu (2019) (12 citações) foi a única publicação presente nesta revisão.

Redes de referência e autores

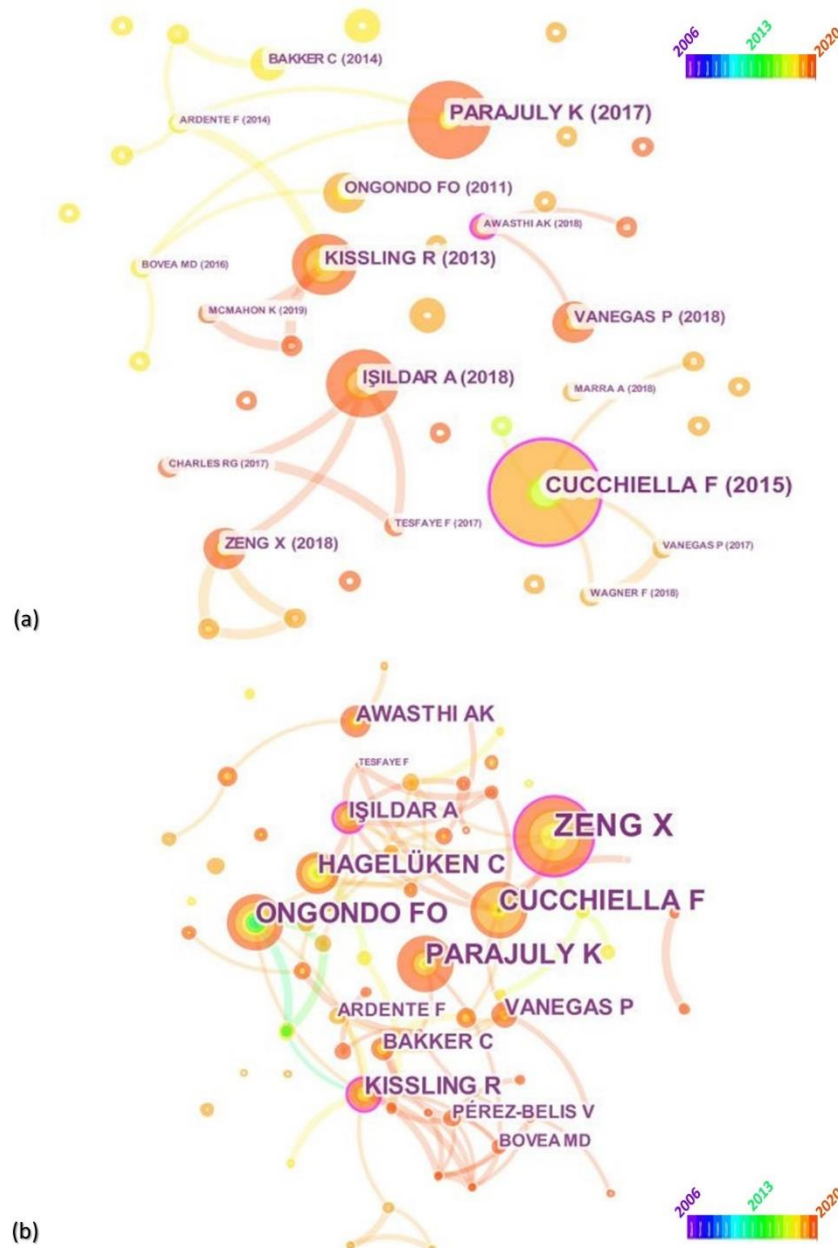
A Figura 9 mostra as redes de referências e autores dos 131 artigos selecionados. A identificação das referências/autores mais citados pode ser realizada pela visualização do tamanho dos nós (●). Da mesma forma, a indicação das referências/autores mais centrais ocorre pela espessura do anel rosa que envolve os nós (●) ou pelos valores de centralidade.

Pela análise da rede de referências (Figura 9a), foi possível identificar as obras mais citadas e mais centrais. O número de citações está relacionado à importância que o trabalho apresenta para determinada área do conhecimento. Por exemplo, os trabalhos de Cucchiella et al. (2015) e Parajuly e Wenzel (2017) são, respectivamente, os artigos, dentre os selecionados, mais citados pelos outros artigos da revisão. A centralidade de intermediação está associada ao caminho percorrido pelas informações entre grandes grupos. Os trabalhos com maior centralidade de intermediação são Cucchiella et al. (2015), Zeng et al. (2018) e Awasthi et al. (2018), os quais discutem sobre os aspectos econômicos relacionados à geração de REEE e à reciclagem/recuperação de seus materiais/componentes. O destaque de Cucchiella et al. (2015) no domínio da gestão de REEE, na perspectiva da economia circular, pode ser explicado porque a publicação apresenta uma avaliação econômica profunda das receitas potenciais provenientes da reciclagem de REEE, com uma proposição de índices unitários e globais. A partir de dados de custos reais de processadores de REEE, Zeng et al. (2018) demonstraram que os custos de recuperação de metais (ouro e cobre) de TVs recicladas estão no mesmo patamar dos custos de mineração primária. Awasthi et al. (2018) demonstram a existência de um forte brilho entre o produto interno bruto (PIB) e a paridade do poder de compra (PPC) do PIB com a geração global, a coleta e a reciclagem de REEE.

A rede de autores demonstra a força e a influência que um autor pode exercer sobre um campo de pesquisa e seus participantes. De forma análoga à análise da rede de referências, os resultados da rede de autores reforçam a importância dos nomes que também estão presentes nas referências de maior destaque. A Figura 9b

mostra os autores mais citados (Zeng X., Cucchiella F.) e mais centrais (İşildar A., Kissling R., Zeng X. e Cucchiella F.). Zeng X. é o autor mais citado, sendo autor principal de dois artigos (Zeng et al., 2018; Zeng et al., 2020) e colaborador em um (Awasthi et al., 2018). İşildar A. é o autor mais central, sendo o autor principal do artigo (İşildar et al., 2018). Esses resultados também reforçam o destaque de Cucchiella F., que, entre os 131 artigos selecionados, aparece como autora principal em 2 (Cucchiella et al. (2015) e Cucchiella et al. (2016)) e como colaboradora em outros 2 (Awasthi e outros (2018) e Condemi e outros (2019)).

Figura 9 - As referências e autores de maior destaque segundo os resultados do CiteSpace: (a) rede de referência e (b) rede de autores.



Classificação das obras segundo a hierarquia de gestão de resíduos sólidos

Os 131 artigos selecionados nesta revisão (Tabela 1) foram analisados e divididos em 6 padrões temáticos: prevenção da geração de resíduos, reutilização de resíduos, reciclagem de materiais, recuperação, design de produtos e políticas de gestão. Devido ao grande número de artigos incluídos nesta revisão, os critérios adotados para a escolha dos artigos discutidos nas próximas seções foram o número de citações (de acordo com o *Scholar Google*; ver Tabela 1) e a análise no *CiteSpace* (o mais proeminente referências e autores conforme Figura 9). Se por um lado o número de citações pode favorecer a escolha por publicações mais antigas, o indicador de centralidade (anel rosa que envolve o nó; ver Figura 9) pode mostrar a relevância das publicações mais recentes.

a) Prevenção da geração de REEE

A prevenção da geração de resíduos aparece como ação prioritária na hierarquia da gestão de resíduos sólidos. Como o design de produtos e reutilização de equipamentos têm como objetivo final reduzir a geração de resíduos, os trabalhos com estes focos estão incluídos nesta seção, além daqueles com foco na prevenção da geração de REEE.

Focando em estratégias para prevenir a geração de REEE: (i) Kasulaitis et al. (2019) propuseram a abordagem da desmaterialização (redução no consumo de materiais e, conseqüentemente, na geração de resíduos) para alcançar uma economia circular. Pela Análise de Fluxo de Materiais (*material flow analysis* - MFA), os autores destacam que a redução do consumo de materiais promovida pela desmaterialização pela inovação tecnológica é compensada pelo aumento do consumo de novos produtos; e (ii) Ho et al. (2019) afirmam que a eficiência dos materiais é uma estratégia essencial para promover a economia circular, uma vez que minimiza o consumo de recursos e promove o retorno de produtos obsoletos à cadeia de materiais. O trabalho resultou em uma lista de estratégias para eficiência de materiais adotadas em empresas de produtos eletroeletrônicos, que incluem aspectos relacionados ao design do produto, substituição por componentes com múltiplas funções e menos poluentes, e maior vida útil.

O design de produto (*product design* - PD) é um dos principais instrumentos para promover a circularidade dos REEE, uma vez que definirá a facilidade (ou não) de desmontagem e reparação dos equipamentos para reutilização, bem como o grau de qualidade para a reciclagem destes produtos. Alguns estudos abordaram a eficiência de EEE: (i) Bakker et al. (2014) apontam que o aumento da eficiência energética ao longo do tempo é uma boa estratégia para a extensão da vida útil dos EEE. Entretanto, os designers carecem de conhecimentos especializados para projetar a extensão da vida útil do produto (através de maior vida útil do produto, renovação, refabricação) e reciclagem do produto; (ii) Ardente e Mathieux (2014) propuseram um método original para avaliação da durabilidade de produtos consumidores de energia considerando fatores importantes como a vida útil do produto, consumos de energia, impactos da extensão da vida útil e características do produto de substituição. Como resultado, foram propostos dois índices de durabilidade, um relacionado aos benefícios ambientais e aos impactos do ciclo de vida do produto (índice geral) e outro que considera uma categoria de impacto específica (índice simplificado).

Alguns estudos propuseram metodologias ou modelos com potencial de melhorar o reuso ou a reciclabilidade dos EEE, através do PD: (i) Bovea e Pérez-Belis (2018) apresentaram uma metodologia para a avaliação do design de um produto existente na perspectiva de economia circular. De acordo com os resultados, a expansão da vida útil e a reutilização de produtos e/ou componentes são as necessidades mais urgentes a serem incorporadas nas diretrizes de design circular. Como principal contribuição, os autores apresentaram dois indicadores para a circularidade dos produtos: margem de melhoria (relacionada ao produto específico) e relevância (relacionada às características da categoria à qual o produto pertence); (ii) Laurenti et al. (2015) apresentaram os três principais desafios da sustentabilidade relacionados ao design de produtos eletrônicos, incluindo: redundâncias de produtos e consumo, impactos ambientais e sociais incorporados que ocorrem distantes no tempo e no espaço do ponto de consumo, e dinâmicas de produção e consumo. Os autores afirmam que a abordagem das consequências ambientais é o maior desafio, pois requer soluções multidisciplinares que vão além dos aspectos ambientais e da criatividade das pessoas envolvidas no planejamento do produto; (iii) Vanegas et al. (2018) propuseram uma metodologia para medir a facilidade de desmontagem (eDiM

– *Easy of Disassembly Metric*) e o tempo necessário para isso, a fim de fornecer subsídios para a formulação de políticas e direcionamentos para a melhoria do produto neste aspecto. A metodologia foi inovadora ao propor a categorização das etapas de desmontagem: troca de ferramentas, identificação de conectores, manipulação, posicionamento e desconexão. Sua aplicabilidade foi demonstrada por meio de um estudo de caso com monitor LCD. Os resultados destacam os principais recursos do eDiM, além da potencial contribuição nas políticas existentes de ecodesign de produtos.

A reutilização é uma estratégia que visa ampliar a vida útil dos produtos e contribuir para a redução do consumo e descarte de produtos obsoletos. Durante muito tempo, os estudos publicados centraram-se nas taxas de recolha e reciclagem de resíduos, sem dar grande importância ao potencial de reutilização. Entre os estudos que mostram os fatores determinantes para o aproveitamento de um EEE, destacam-se: (i) Truttmann e Rechberger (2006) mostram que a extensão da vida útil de um EEE através do reuso é uma estratégia eficaz para a conservação de recursos (materiais e energia). Embora os produtos novos consumam menos energia durante a fase de uso, o maior consumo de energia dos EEE mais antigos e que são reutilizados é mais do que compensado pelo menor consumo de energia nas fases de produção e fabricação, em relação a um novo; (ii) Kissling et al. (2013) apontaram a falta de legislação, concorrência de exportadores ilegais, designs de produtos não compatíveis com reformas como barreiras ao reuso de EEE; (iii) Parajuly e Wenzel (2017) destacaram que a necessidade de uma mudança na perspectiva dos REEE como recursos, em vez de apenas resíduos, é necessária tanto nas políticas de REEE como para as partes interessadas (incluindo produtores, gestores de REEE e autoridades); (iv) Ongondo et al. (2013) consideraram a confiança do consumidor em equipamentos recondicionados e na segurança de dados como importantes barreiras ao reuso; e (v) Boldoczki et al. (2020) apresentam recomendações para embasar decisões de consumidores ambientalmente conscientes sobre a aquisição de um EEE novo versus um usado.

As atividades que compõem o serviço de coleta também podem afetar o potencial de reutilização de EEE, como mostram os estudos de: (i) Messmann et al. (2019) que destacam que mudanças no modo de coleta, armazenamento e tratamento podem destravar um potencial adicional de produtos encaminhados para preparação

para reutilização; e (ii) Johnson et al. (2020) que mostram que a falha funcional durante a fase de utilização dos EEE e os danos ocorridos durante a fase de coleta dos REEE estão entre os fatores que mais favorecem a não adequação dos EEE ao reuso.

O comportamento do usuário também é um fator determinante para o aproveitamento de EEE, como mostram os estudos de: (i) Poppelaars et al. (2020) que traz uma abordagem sobre “desinvestimento”, que é o processo em que o usuário experimenta ao se separar de um produto; (ii) Sabbaghi e Behdad (2018) que mostram que a disposição a pagar dos consumidores por serviços de reparo diminui anualmente; e (iii) Kuah e Wang (2020) que mostram uma insegurança dos usuários quanto ao uso de plataformas compartilhadas, além de uma baixa acessibilidade de produtos reciclados e remanufaturados.

b) Tratamento de REEE

Com foco na reciclagem, destacam-se os trabalhos de: (i) Cucchiella et al. (2015) propuseram uma série de índices econômicos para medir o desempenho do centro de reciclagem destacando que materiais com baixo valor econômico podem oferecer contribuições relevantes se disponíveis em grandes quantidades e o grau de pureza dos materiais recuperados é um requisito necessário para obter um preço qual é o mais próximo possível do preço de mercado do material puro; (ii) Nascimento et al. (2019) exploraram os meios pelos quais a Indústria 4.0 e as suas tecnologias podem integrar-se às práticas da economia circular para estabelecer um modelo de negócio sustentável, através da reutilização e reciclagem de REEE. Como resultado, o estudo propõe um modelo de negócio circular para reciclagem de resíduos e entrega de novos produtos; (iii) Krikke (2011) propôs uma estrutura de modelagem para otimização de configurações de redes em malha fechada, contribuindo para redução da pegada de carbono e recuperação de materiais; (iv) Com ênfase na extração e reciclagem do cobre e ouro presentes nos EEE, Zeng et al. (2018) mostraram que o custo da mineração primária é 13 vezes maior do que a mineração da reciclagem de televisores CRT e 7 vezes maior do que a mineração da reciclagem de placas de circuito impresso; (v) Mo et al. (2009) apontaram que o valor de recuperação e a escala de geração de resíduos são “os fatores-chave” que impactam diretamente os padrões de reciclagem e as partes interessadas dos sistemas de reciclagem; (vi) Nelen et al.

(2014) desenvolveram um conjunto de indicadores baseados na gestão sustentável de materiais e discutem como aspectos relacionados ao processo de PD e/ou reciclagem podem afetar seus valores; e (vii) Awasthi et al. (2018) relataram um aumento de 1000 no PIB com base na paridade do poder de compra (PIB PPC), o que significa 0,27 kg adicionais de resíduos recolhidos e 0,22 kg de resíduos reutilizados/reciclados.

De acordo com a legislação (UE, 2008), a valorização (de materiais ou de energia) deve ser a opção adotada quando não for possível evitar a geração de resíduos, a reutilização ou a reciclagem dos produtos ou dos seus componentes. Entre os estudos que abordaram processos tecnológicos (físicos e/ou (bio)químicos) para a recuperação de materiais valiosos presentes em REEE, destacam-se: (i) Işildar et al. (2018) explorou os mais recentes desenvolvimentos tecnológicos para a recuperação de metais de diversos fluxos de REEE mostrando que a hidrometalurgia e a biohidrometalurgia são as tecnologias mais sustentáveis e promissoras de processamento final para a recuperação de metais, alcançando um alto grau de seletividade metálica e melhor custo -beneficiar; (ii) Ongondo et al. (2015) introduziram e ilustraram uma nova abordagem de mineração urbana para otimizar a recuperação de recursos; (iii) Tesfaye et al. (2017) demonstraram rotas de processos pirometalúrgicos são considerados processos mais ecoeficientes e econômicos para a recuperação de metais preciosos; (iv) Marra et al. (2018) aplicaram o processo de biolixiviação para recuperação de metais e elementos de terras raras presentes na poeira proveniente da britagem de EEE mostrando que o tratamento biohidrometalúrgico é uma alternativa promissora para a recuperação de metais críticos derivados da britagem de resíduos eletrônicos; e (v) Li e Huang (2015) utilizaram uma técnica combinada de classificação e agitação (crushscreen-shake), demonstrando que o processo crushscreen-shake é capaz de recuperar eficientemente o cobre em placas de fiação impressa.

c) Políticas de gestão

As políticas de gestão de REEE têm um papel importante na definição dos objetivos e estratégias para manter a circularidade dos produtos elétricos e eletrônicos. Esses artigos abordaram/descreveram políticas públicas para conformar a gestão de REEE: (i) Um dos primeiros artigos a discutir os caminhos que levaram à

reinvenção dos REEE como recursos, Kama (2015) realizou uma análise articulada entre as principais normas e legislações que sustentam a Política da União Europeia para REEE; (ii) Hagelüken et al. (2016) Consideramos que a qualidade das operações de tratamento é uma das principais barreiras à economia circular, indicando que um esquema de certificação obrigatório para recicladores de REEE é um instrumento capaz de promover um tratamento de materiais altamente eficaz; (iii) Gu et al. (2017) apresentaram uma reconfiguração do sistema EPR, baseada em um fundo para gestão de REEE; (iv) Richter e Koppejan (2016) avaliaram sistemas EPR para coleta e reciclagem de lâmpadas de descarga de gás, e indicaram base de regras, infraestrutura e operações como os fatores que mais contribuem para o alto desempenho; (v) Kunz et al. (2018) analisaram opiniões de uma ampla gama de partes interessadas, a fim de fornecer informações sobre o papel que a EPR pode desempenhar nas futuras políticas de Economia Circular; e (vi) Mazahir et al. (2019) mostram a necessidade de implementação de políticas específicas para cada tipo de EEE e o estabelecimento de metas de reutilização de produtos.

Tabela 1 - Citações, padrões temáticos e termos chave dos artigos incluídos na revisão.

ID	Referência	Nº de citações*	Padrão temático					Políticas (●)	Termos chave
			Prevenção (□)	Design de produto (Δ)	Reuso (■)	Reciclagem (▲)	Recuperação (♦) (material/energia)		
1	Truttmann and Rechberger (2006)	147			■				Conservação de recursos
	Mo et al. (2009)	105				▲			Reciclagem de recursos
3	Veenstra et al. (2010)	63				▲			Modelo de cadeia reversa
4	Krikke (2011)	165				▲			Rede de circuito fechado
5	Manhart (2011)	69				▲			Reciclagem de metais
6	Kissling et al. (2012)	70			■				Modelos operacionais
7	Kissling et al. (2013)	108			■				Sucesso e barreiras
8	Achillas et al. (2013)	54				▲			Desmontagem manual
9	Ongondo et al. (2013)	50			■				Empresas socioeconômicas
10	Bakker et al. (2014)	612		Δ					Extensão de vida
11	Nelen et al. (2014)	94				▲			Indicadores de reciclagem
12	Ardente and Mathieux (2014)	92		Δ					Durabilidade
13	Cucchiella et al. (2015)	498				▲			Avaliação económica
14	Kama (2015)	62						●	Recurso e mercado
15	Ongondo et al. (2015)	60					♦		Mineração urbana
16	Laurenti et al. (2015)	23		Δ					Desafios para a sustentabilidade

17	Li and Huang (2015)	1			◆	Recuperação de Cooper
18	O'Connor et al. (2016)	50		▲		Engenharia Verde
19	Sommerhuber et al. (2016)	60		▲		Plásticos reciclados
20	Hagelüken et al. (2016)	53		▲	●	Reciclagem de metais
21	Richter and Koppejan (2016)	50		▲	●	Sistema EPR
22	Cucchiella et al. (2016)	49		▲		Análise econômica
23	Favot et al. (2016)	21			●	Sistema EPR
24	Steuer (2016)	12	■			Análise institucional
25	Tsiliyannis (2016)	8	■			Estoque e descarte
26	Mishima et al. (2016)	5	■	▲		Conservação de recursos
27	Parajuly and Wenzel (2017)	98	■	▲		Fluxo doméstico
28	Sommerhuber et al. (2017)	78		▲		ACV
29	Atlason et al. (2017)	67	Δ			Percepção dos usuários
30	Tesfaye et al. (2017)	59		▲	◆	Mineração urbana
31	Gu et al. (2017)	51			●	Operação de fundo EPR
32	Golev and Corder (2017)	37		▲		Quantificação de metais
33	Alvarez-de-los-Mozos and Renteria (2017)	25		▲		Robôs Colaborativos
34	Unger et al. (2017)	21		▲		ACV
35	Favot and Grassetti (2017)	17	■			Coleção
36	Klemettinen et al. (2017)	15			◆	Fundição de REEE

37	Steuer (2017)	10				•	Coleção
38	Tuccio et al. (2017)	2		■			Balanço de Massa
39	Zeng et al. (2018)	128			▲		Mineração Urbana
40	Işildar et al. (2018)	124				◆	Metais críticos
41	Awasthi et al. (2018)	91			▲		Coleção
42	Han et al. (2018)	86			▲		Avaliação de risco
43	Marra et al. (2018)	53				◆	Processos hidrometalúrgicos
44	Kunz et al. (2018)	48				•	EPR
45	Tong et al. (2018)	43			▲		Transporte (setor informal)
46	Bovea and Pérez-Belis (2018)	39	Δ				Diretrizes de projeto
47	Sabbaghi and Behdad (2018)	33		■		•	Decisões do consumidor
48	Gåvertsson et al. (2018)	33		■			Rotulagem de qualidade
49	Nowakowski and Mrówczyńska (2018)	31		■			Coleta e transporte
50	Coughlan et al. (2018)	25		■			Reaproveitando EEE
51	Stamminger et al. (2018)	24	Δ				Durabilidade
52	Levänen et al. (2018)	24			▲		Modelo de negócios CE
53	Ryen et al. (2018)	22			▲		Sistema de circuito fechado
54	Gallego-Schmid et al. (2018)	16				•	ACV
55	Diehl et al. (2018)	14			▲		Reciclagem de material para material
56	Vanegas et al. (2018)	6		■			Desmontagem
57	Andrae (2018)	6		■			Coleta e ACV

58	Steuer et al. (2018)	5		▲		Setor informal
59	Wieczorek and Kwaśniewska (2018)	5			◆	Aspectos econômicos
60	Friege et al. (2018)	2		▲		Materiais perigosos
61	Stowell and Brigham (2018)	2			◆	Mineração e extração
62	Bonoli et al. (2018)	0	■		◆	Mineração urbana
63	Nascimento et al. (2019)	178		▲		Tecnologias da Indústria 4.0
64	Blomsma et al. (2019)	107	■	▲	◆	Sistema de circuito fechado
65	Mazahir et al. (2019)	46				● Retoma do produto
66	Garrido-Hidalgo et al. (2019)	40	Δ	■		Cadeia de suprimentos reversa
67	Fiore et al. (2019)	36		▲		MFA e LCA
68	Bridgens et al. (2019)	33			◆	Circuito fechado
69	Tecchio et al. (2019)	31	■			Modos de vida e de falha
70	Cole et al. (2019)	30	■			● Diretiva REEE
71	Xavier et al. (2019)	30		▲		Mineração urbana
72	Singhal et al. (2019)	27	■			Remanufatura
73	Cordova-Pizarro et al. (2019)	25	■	▲		Geração e MFA
74	D'Adamo et al. (2019)	24		▲	◆	Oportunidades econômicas
75	Tan and Guo (2019)	23		▲		● Qualidade de reciclagem
76	Swain and Lee (2019)	22		▲		Recuperação do índio
77	Althaf et al. (2019)	21	Δ	■	▲	Previsão do fluxo de materiais
78	Favot and Massarutto (2019)	21		▲		Elementos de terras raras
79	Islam and Huda (2019)	20	■	▲		Geração
80	André et al. (2019)	20	■			ACV

81	Klemettinen et al. (2019)	19				◆	Recuperação de cobre
82	Ameli et al. (2019)	19	Δ			●	Modelo de otimização e EPR
83	Cocchiara et al. (2019)	18				◆	Desmontagem e recuperação de cobre
84	Peng et al. (2019)	18				◆	Elementos de impurezas metálicas
85	Nowakowski (2019)	18		■	▲		Coleção
86	Messmann et al. (2019)	16		■			Coleção
87	Kasulaitis et al. (2019)	13	□				Desmaterialização
88	McMahon et al. (2019)	12		■			Fatores de sucesso
89	Ezeudu and Ezeudu (2019)	12				●	Desafios e oportunidades
90	Wagner et al. (2019)	11			▲		Análise SWOT
91	Chen et al. (2019)	10	Δ	■	▲		Sistemas de devolução
92	Wagner et al. (2019b)	8			▲		Plásticos REEE
93	Li et al. (2019)	6			▲		Níveis de exposição humana
94	Turaga et al. (2019)	5				●	Questões e Estratégias
95	Ho et al. (2019)	5	□				Eficiência de recursos
96	Condemi et al. (2019)	4			▲	●	Identificação de rádio frequência
97	Marra et al. (2019)	4				◆	Biolixiviação de metais
98	Bella et al. (2019)	2				◆	Termovalorização
99	Lisinska et al. (2019)	0				◆	Problemas de processamento e separação
100	Boldoczki et al. (2020)	46		■			Impactos ambientais

101	Leclerc and Badami (2020)	37				•	RPE
102	Priyadarshini and Abhilash (2020)	29				•	ODS
103	Safdar et al. (2020)	27	■	▲			Rede de logística reversa
104	Duberg et al. (2020)	26	■				Remanufatura
105	Tozanli et al. (2020)	25	■				Desmontagem
106	Sharma et al. (2020)	24	Δ			•	MCDM
107	Ahn et al. (2020)	23	■	▲			Metal de terras raras crítico
108	Jin et al. (2020)	22	■		◆		ACV
109	Garrido-Hidalgo et al. (2020)	21		▲	◆		Internet das Coisas (IoT)
110	Kuah and Wang (2020)	18		▲			Comportamento do consumidor
111	Rocca et al. (2020)	17	■	▲		•	Indústria 4.0
112	Sadrnia et al. (2020)	16	■				Projeto de rede logística
113	Zeng et al. (2020)	16		▲	◆		Mineração urbana
114	Chaudhary and Vrat (2020)	14			◆		Recuperação de ouro
115	Coughlan and Fitzpatrick (2020)	12	■				Preparação para reutilização
116	Ottoni et al. (2020)	12		▲			Mineração urbana
117	Brusselaers et al. (2020)	11	■				Estratégias de reparo
118	Islam and Huda (2020)	11		▲			Delphi-AHP
119	Johnson et al. (2020)	8	■				Preparação para reutilização
120	Sanito et al. (2020)	7			◆		Avaliação económica e ambiental

121	Charles et al. (2020)	6		▲	◆	Recuperação de CRM
122	Nowakowski et al. (2020)	6	■	▲		Coleta móvel
123	Fizaine (2020)	6		▲		Aspectos econômicos
124	Poppelaars et al. (2020)	6	■	▲		Projeto para desinvestimento
125	Arcos et al. (2020)	5	■			Diagnóstico de erro
126	Cotta (2020)	5		▲		Problemas de acesso e alocação
127	Kim and Kim (2020)	4	■			(Re)fabricação
128	Buchmann et al. (2020)	4		▲		Avaliação de reciclabilidade
129	Talens Peiró et al. (2020)	4		▲	◆	Mineração urbana
130	Singh et al. (2020)	3		▲		Facilitadores e barreiras de coleta
131	Wala and Nowakowski (2020)	0	■	▲	◆	Coleta e transporte

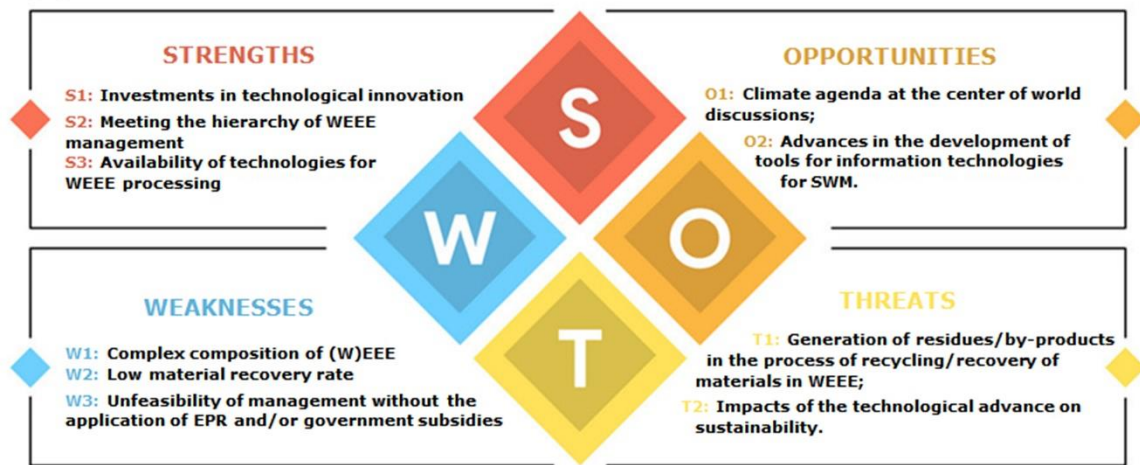
Nota: *De acordo com o *Scholar Google*.

Análise SWOT-TOWS

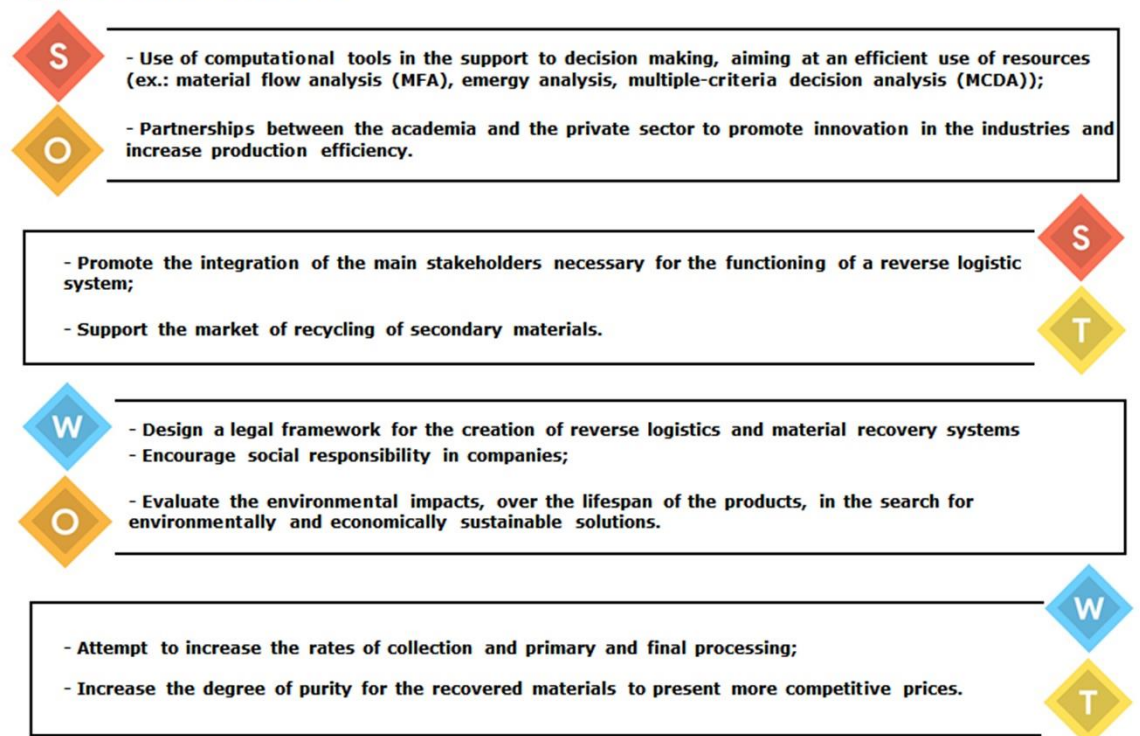
A Figura 10 mostra a análise SWOT-TOWS para a gestão de REEE numa perspectiva de economia circular. Os parâmetros internos estão relacionados aos pontos fortes (*strengths*) e fracos (*weaknesses*) e os parâmetros externos referem-se às oportunidades (*opportunities*) e ameaças (*threats*).

Figura 10 - (a) Análise SWOT e (b) TOWS: estratégias para a melhoria da gestão de REEE numa perspectiva de economia circular.

(a) SWOT ANALYSIS



(b) TOWS ANALYSIS



a) Parâmetros internos

Pontos fortes (*Strengths* - S)

S1 - Disponibilidade de tecnologias e crescente inovação tecnológica para processamento de REEE: Coleta e transporte de REEE (Nowakowski e Mrówczyńska, 2018; Nowakowski et al., 2020); reutilização de produtos/materiais (Nascimento et al., 2019; Jin et al., 2020); reciclagem e recuperação de materiais através de processos físicos (Li e Huang, 2015; Işildar et al., 2018; Jin et al., 2020), pirometalúrgicos e/ou (bio)hidrometalúrgicos (Işildar et al., 2018; Tesfaye et al., 2017; Marra et al., 2018; D'Adamo et al., 2019; Jin et al., 2020).

S2 - Cumprindo a hierarquia de gestão de REEE: Prevenção da geração de REEE através do uso eficiente de materiais nas fases de design e produção dos EEE (Bovea e Pérez-Belis, 2018; Coughlan et al., 2018; Vanegas et al., 2018 ; Kasulaitis et al., 2019; Ho et al., 2019); estratégias para reuso (Kissling et al., 2013; Ongondo et al., 2013; Ardente e Mathieux, 2014; Messmann et al., 2019; Coughlan e Fitzpatrick, 2020); tratamento (reciclagem e/ou recuperação) (Li e Huang, 2015; Zeng et al., 2018; Awasthi et al., 2018; Işildar et al., 2018; Marra et al., 2018); descarte (Blomsma et al., 2019; Mazahir et al., 2019; Safdar et al., 2020).

Fraquezas (*Weaknesses* - W)

W1 - Composição e design complexos de EEE: fatores que dificultam a expansão/durabilidade da vida útil, a reutilização ou tratamento de produtos e/ou componentes (Kissling et al., 2013; Bakker et al., 2014; Ardente e Mathieux, 2014; Laurenti et al., 2015; Atlason et al., 2017; Bovea e Pérez-Belis, 2018; Ho et al., 2019; Arcos et al., 2020; Boldoczki et al., 2020; Johnson et al., 2020).

W2 - Baixa taxa de coleta e/ou recuperação de produto/material: incompatibilidade do design de produto com o reaproveitamento/remodelação (Kissling et al., 2013; Ho et al., 2019; Cole et al., 2019); método de disposição (Ongondo et al., 2015; Parajuly e Wenzel, 2017; Tsiliyannis, 2016; Mishima et al., 2016); competição com o setor informal de reciclagem (Steuer et al., 2018; Tong et al., 2018; Cole et al., 2019).

W3 - Inviabilidade da gestão de REEE sem a aplicação de EPR e/ou subsídios governamentais: impacto direto na visão econômica dos processos de

reciclagem/recuperação de materiais (Veenstra et al., 2010; Kissling et al., 2013; Richter e Koppejan, 2016 ; Gu et al., 2017; Zeng et al., 2018; Mazahir et al., 2019).

b) Parâmetros externos

Oportunidades (*Opportunities* - O)

O1 - Agenda climática no centro da discussão mundial: gestão adequada de REEE contribuindo para reduzir os impactos ambientais negativos (Truttmann e Rechberger, 2006; Messmann et al., 2019; Boldoczki et al., 2020; Johnson et al., 2020; Safdar e outros, 2020); oportunidades econômicas (Cucchiella et al., 2015; Zeng et al., 2018; Awasthi et al., 2018; Safdar et al., 2020).

O2 - Avanços no desenvolvimento de ferramentas de tecnologias de informação para GRS: Avaliação do ciclo de vida (Unger et al., 2017; Sommerhuber et al., 2017; Jin et al., 2020); análise de fluxo de materiais (Fiore et al., 2019; Althaf et al., 2019; Cordova-Pizarro et al., 2019); análise de decisão multicritério (Sharma et al., 2020; Islam e Huda, 2020).

Ameaças (*Threats* - T)

T1 - Impactos da inovação tecnológica na sustentabilidade: aumento da produção e rápida obsolescência de EEE (Bonoli et al., 2018; Wieczorek e Kwaśniewska, 2018; Nascimento et al., 2019; Ho et al., 2019; Kim e Kim, 2020); geração de resíduos/subprodutos no processo de reciclagem/recuperação de materiais (Bella et al., 2019; Marra et al., 2019).

T2 - Comportamento do consumidor: aumento na demanda por novos EEE (Sabbaghi e Behdad, 2018; Kasulaitis et al., 2019; Nascimento et al., 2019; Kim e Kim, 2020); confiança relativamente à qualidade dos equipamentos reconicionados/usados (Ongondo et al., 2013; Coughlan et al., 2018; Kuah e Wang, 2020) e relativamente à segurança dos dados (Ongondo et al., 2013; Poppelaars et al., 2020; Singh et al., 2020; Singh et al., 2013; Poppelaars et al., 2020; al., 2020); método de disposição adotada (Mishima et al., 2016; Favot e Grassetti, 2017; Sabbaghi e Behdad, 2018).

A Figura 10a mostra os pontos fortes, fracos, oportunidades e ameaças (SWOT) para a gestão de REEE.

c) Estratégias para a melhoria da gestão dos REEE

A Figura 10b mostra os cruzamentos da análise SWOT que poderiam ser realizados com a matriz TOWS, demonstrando como as oportunidades e ameaças externas podem ser ajustadas com os pontos fortes e fracos internos, para que seja possível desenvolver estratégias para enfrentar os principais obstáculos aos REEE gerenciamento. A análise SWOT-TOWS resultou nas estratégias descritas abaixo e elaboradas na forma de ações, conforme Figura 10b.

Estratégias ofensivas (*Offensive strategies* - OS): consistem em maximizar os pontos fortes para otimizar as oportunidades. Para eles, há o cruzamento de 2 fatores de força com 2 elementos de oportunidades relativos à gestão de REEE. As estratégias ofensivas indicam que o avanço na pesquisa e desenvolvimento de novas tecnologias permitirá a gestão adequada, pela utilização dos materiais presentes nos REEE como recursos, na fabricação de novos produtos.

OS1: Utilização de ferramentas computacionais no apoio à tomada de decisão, visando uma utilização eficiente dos recursos.

OS2: Parcerias entre a academia e o setor privado para promover a inovação nas indústrias e aumentar a eficiência produtiva.

Estratégias de reforço (*Reinforcement strategies* - WO): permitem a minimização dos pontos fracos para otimizar as oportunidades. Para esta estratégia, existem 2 factores de oportunidade correlacionados com 3 elementos de fraqueza para a gestão de REEE. Neste sentido, a melhoria contínua da legislação e a monitorização da vida útil dos novos materiais e componentes dos EEE serão fatores condicionantes para o avanço de uma gestão sustentável dos REEE.

WO1: (Re)desenhar um marco legal para a criação de sistemas de logística reversa e recuperação de materiais.

WO2: Incentivar a responsabilidade social nas empresas.

WO3: Avaliar os impactos ambientais, ao longo dos produtos, na busca de soluções ambiental e economicamente sustentáveis.

Estratégias de confronto (*Confrontation strategies* - ST): visam maximizar os pontos fortes para reduzir o impacto das ameaças. Para isso foram cruzados 2 fatores de força com 2 elementos de ameaça para a gestão de REEE. Assim, o envolvimento e a mobilização de todos os intervenientes (consumidores, produtores e afins, poder público e mercado de valorização/reciclagem) serão necessários para a construção e operação do sistema de gestão de REEE.

ST1: Promover a integração dos principais stakeholders necessários ao funcionamento de um sistema de logística reversa.

ST2: Apoio à indústria de recuperação de materiais e ao mercado de EEE reutilizados/recondicionados

Estratégias de defesa (*Defense strategies* - WT): buscam a resolução dos pontos fracos que podem tornar as ameaças uma realidade. Foram cruzados 3 fatores de fraqueza com 2 ameaças potenciais. Para que o sistema seja económica e ambientalmente sustentável, as taxas de recolha e eficiência de recuperação de materiais devem ser continuamente melhoradas ao longo do tempo.

WT1: Tentativa de aumentar as taxas de arrecadação e processamento primário e final por meio de campanhas para todos os stakeholders envolvidos (consumidores, indústria e poder público).

WT2: Aumentar o grau de pureza dos materiais recuperados para apresentar preços mais competitivos.

CONCLUSÕES

A partir da década de 1970, o conceito de economia circular tem sido abordado e desenvolvido segundo diferentes concepções e necessidades para equacionar e resolver os desafios de integração entre o meio ambiente, o setor industrial e a sociedade. Desde então, diversos estudos sobre economia circular foram desenvolvidos em todo o mundo. A produção científica sobre a gestão de REEE na perspectiva da economia circular, iniciada em 2006, teve um aumento significativo a partir do ano de 2015 com o surgimento de novas políticas direcionadas para a circularidade dos EEE ou dos seus componentes, a nível mundial.

Os atores de maior destaque, segundo as redes de referências e autores, têm enfatizado em seus artigos temas de reciclagem, reutilização e recuperação dos materiais presentes nos REEE. Os estudos destacam que as tecnologias existentes já são capazes de alcançar bons índices de recuperação de materiais (uns mais que outros) e energia a partir de REEE. As previsões indicam que os próximos anos devem focar em novas tecnologias para a recuperação de materiais específicos (principalmente os metais e matérias-primas críticas), especialmente a partir da combinação de tecnologias já existentes. O aumento nas publicações com foco na extensão de vida útil de EEE (produtos mais resistentes e de fácil reutilização) mostra uma perspectiva futura de maior sustentabilidade, especialmente para pequenos eletrodomésticos.

O baixo índice de REEE coletados e sua composição complexa, em relação aos demais resíduos sólidos urbanos, são características desfavoráveis para a correta gestão dos REEE. Se, por um lado, a inovação tecnológica pode agravar este cenário, pelo surgimento de produtos de composição complexa e que prejudicam a reutilização ou reciclagem, por outro lado, faz parte da solução, uma vez que o desenvolvimento de tecnologias mais limpas para o processamento dos REEE e o uso da tecnologia da informação para auxiliar no cumprimento da hierarquia de gestão dos resíduos sólidos são estratégias que podem auxiliar no diagnóstico e, posteriormente, no controle da poluição causada pelos REEE.

A gestão adequada dos REEE é ainda um tema complexo e requer a participação de diversas partes interessadas, bem como a integração de diferentes instrumentos jurídicos, económicos e sociais. Assim, os decisores terão como desafio

futuro a procura da aplicação da circularidade dos materiais na hierarquia da gestão dos REEE, onde os resíduos passem a ser encarados como um recurso valorizável e com importante valor acrescentado económico. Portanto, trabalhos futuros devem focar na redução e controle da poluição derivada da gestão inadequada de REEE, na busca de estratégias de não geração e reaproveitamento.

Como possíveis limitações deste estudo, destacam-se: (i) o uso de apenas duas bases de dados, a *Scopus* e a *Web of Science*, em função do programa usado para a análise bibliométrica (*CiteSpace*); e (ii) a ausência de artigos em língua diferente do inglês e de outros documentos (capítulos de livros, teses, artigos de conferências e relatórios técnicos).

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer à Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco (FACEPE) e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

REFERÊNCIAS

- Achillas C, Aidonis D, Vlachokostas C, Karagiannidis A, Moussiopoulos N, Loulos V (2013) Depth of manual dismantling analysis: A cost–benefit approach. **Waste Management** 33, 948–956. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2012.12.024>
- Ahn N-K, Shim H-W, Kim D-W, Swain B (2020) Valorization of waste NiMH battery through recovery of critical rare earth metal: A simple recycling process for the circular economy. **Waste Management** 104, 254–261. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.01.014>
- Althaf S, Babbitt CW and Chen R (2019) Forecasting electronic waste flows for effective circular economy planning. **Resources, Conservation and Recycling** 151. DOI: 10.1016/j.resconrec.2019.05.038.
- Alvarez-de-los-Mozos E and Renteria A (2017) Collaborative Robots in e-waste Management. **Procedia Manufacturing** 11: 55–62. DOI: 10.1016/j.promfg.2017.07.133.
- Ameli M, Mansour S and Ahmadi-Javid A (2019) A simulation-optimization model for sustainable product design and efficient end-of-life management based on individual producer responsibility. **Resources, Conservation and Recycling** 140. Elsevier B.V.: 246–258. DOI: 10.1016/j.resconrec.2018.02.031.
- Andrae ASG (2018) Collection rate and reliability are the main sustainability determinants of current fast-paced, small, and short-lived ICT products. **WSEAS Transactions on Environment and Development** 14: 531–540.
- André H, Ljunggren Söderman M and Nordelöf A (2019) Resource and environmental impacts of using second-hand laptop computers: A case study of commercial reuse. **Waste Management** 88: 268–279. DOI: 10.1016/j.wasman.2019.03.050.
- Arcos BP, Bakker C, Flipsen B, Balkenende R (2020) Practices of fault diagnosis in household appliances: Insights for design. **Journal of Cleaner Production** 265. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121812>
- Ardente F, Mathieux F (2014) Environmental assessment of the durability of energy-using products: method and application. **Journal of Cleaner Production** 74, 62–73. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.03.049>
- Atlason RS, Giacalone D, Parajuly K (2017) Product design in the circular economy: Users' perception of end-of-life scenarios for electrical and electronic appliances. **Journal of Cleaner Production** 168, 1059–1069. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.09.082>
- Aviv-Reuven S, Rosenfeld A (2021) Publication patterns' changes due to the COVID-19 pandemic: a longitudinal and short-term scientometric analysis. **Scientometrics** 126, 6761–6784. DOI: <https://doi.org/s11192-021-04059-x>
- Awasthi AK, Cucchiella F, D'Adamo I, Li J, Rosa P, Terzi S, Wei G, Zeng X (2018) Modelling the correlations of e-waste quantity with economic increase. **Science of the Total Environment** 613–614: 46–53. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.08.288.
- Baldé CP, Forti V, Gray V, Kuehr R, Stegmann P (2017) The Global E-waste Monitor – 2017. **United Nations University (UNU), International Telecommunication Union (ITU) & International Solid Waste Association (ISWA)**. Bonn/Geneva/Vienna.

Bakker C, Wang F, Huisman J, den Hollander M (2014) Products that go round: exploring product life extension through design. **Journal of Cleaner Production** 69, 10–16. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.01.028>

Bella AD, Cannavò A, Giaquinta G, Liardo R, Giuffrida V (2019) Exploitation and energy recovery of fluff: Smart solutions in a prospective of circular economy. **Procedia Environmental Science, Engineering and Management** 6(1): 95–102.

Benyus J M (1997) Biomimicry: Innovation inspired by nature. New York, Morrow.

Betts K., 2008. Producing usable materials from e-waste. **Environmental Science and Technology** 42, 6782–6783. DOI: <https://doi.org/10.1021/es801954d>

Blomsma F, Pieroni M, Kravchenko M, Pigosso DCA, Hildenbrand J, Kristinsdottir AR, Kristoffersen E, Shahbazi S, Nielsen KD, Jönbrink A-K, Li J, Wiik C, McAloone TC (2019) Developing a circular strategies framework for manufacturing companies to support circular economy-oriented innovation. **Journal of Cleaner Production** 241, 118271. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118271>

Boldoczki S, Thorenz A, Tuma A (2020) The environmental impacts of preparation for reuse: A case study of WEEE reuse in Germany. **Journal of Cleaner Production** 252. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119736>

Bonoli A, Dolci N, Foschi E, Lalli F, Prandstraller D, Zanni S (2018) End of service scenario for universities' informatic equipment: Recovery and repair as educational and research tool for circular economy and urban mining. **Detritus** 4(December): 90–97. DOI: 10.31025/2611-4135/2018.13747.

Boulding KE (1966) The Economics of the Coming Spaceship Earth. In Jarrett, H. (ed) **Environmental quality in a growing economy: Essays from the sixth RFF forum**, New York, RFF Press, pp. 3–14.

Bovea MD and Pérez-Belis V (2018) Identifying design guidelines to meet the circular economy principles: A case study on electric and electronic equipment. **Journal of Environmental Management** 228: 483–494. DOI: 10.1016/j.jenvman.2018.08.014.

Brasil (2020) DECRETO Nº 10.240, DE 12 DE FEVEREIRO DE 2020 - Regulamenta o inciso VI do caput do art. 33 e o art. 56 da Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, e complementa o Decreto nº 9.177, de 23 de outubro de 2017, quanto à implementação de sistema de logística reversa.

Braungart M, McDonough W, Clinton PB (2014) The upcycle: Beyond sustainability designing for abundance. New York, Farrar, Straus and Giroux.

Bridgens B, Hobson K, Lilley D, et al. (2019) Closing the Loop on E-waste: A Multidisciplinary Perspective. **Journal of Industrial Ecology** 23(1): 169–181. DOI: 10.1111/jiec.12645.

Brusselaers J, Bracquene E, Peeters J, Dams Y (2020) Economic consequences of consumer repair strategies for electrical household devices. **Journal of Enterprise Information Management** 33, 747–767. <https://doi.org/10.1108/JEIM-12-2018-0283>

Buchmann M, Borowski N, Leißner T, Heinig T, Reuter MA, Friedrich B, Peuker UA (2020) Evaluation of recyclability of a WEEE slag by means of integrative x-ray computer tomography and sem-based image analysis. **Minerals** 10(4). MDPI AG. DOI:

10.3390/min10040309.

Cesaro A, Marra A, Kuchta K, Belgiorno V, Van Hullebusch ED (2018) WEEE management in a circular economy perspective: An overview. **Global Nest Journal** 20, 743–750. DOI: <https://doi.org/10.30955/GNJ.002623>

Charles RG, Douglas P, Dowling M, Liversage G, Davies ML (2020) Towards Increased Recovery of Critical Raw Materials from WEEE– evaluation of CRMs at a component level and pre-processing methods for interface optimisation with recovery processes. **Resources, Conservation and Recycling** 161. DOI: 10.1016/j.resconrec.2020.104923.

Chaudhary K and Vrat P (2020) Circular economy model of gold recovery from cell phones using system dynamics approach: a case study of India. **Environment, Development and Sustainability** 22(1). Springer: 173–200. DOI: 10.1007/s10668-018-0189-9.

Chen C (2014) The CiteSpace Manual. Drexel University. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11192-015-1576-8>

Chen C (2006) CiteSpace II: Detecting and visualizing emerging trends and transient patterns in scientific literature. **Journal of the American Society for Information Science and Technology** 57, 359–377. <https://doi.org/10.1002/asi.20317>

Chen W, Kucukyazici B and Saenz MJ (2019) On the joint dynamics of the economic and environmental performances for collective take-back systems. **International Journal of Production Economics** 218: 228–244. DOI: 10.1016/j.ijpe.2019.04.028.

Cocchiara C, Dorneanu S-A, Inguanta R, Sunseri C, Ilea P (2019) Dismantling and electrochemical copper recovery from Waste Printed Circuit Boards in $\text{H}_2\text{SO}_4\text{--CuSO}_4\text{--NaCl}$ solutions. **Journal of Cleaner Production** 230: 170–179. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.05.112.

Cole C, Gnanapragasam A, Cooper T, Singh J (2019) An assessment of achievements of the WEEE Directive in promoting movement up the waste hierarchy: experiences in the UK. **Waste Management** 87: 417–427. DOI: 10.1016/j.wasman.2019.01.046.

Condemi A, Cucchiella F and Schettini D (2019) Circular economy and e-waste: An opportunity from RFID TAGs. **Applied Sciences (Switzerland)** 9(16). MDPI AG. DOI: 10.3390/app9163422.

Cordova-Pizarro D, Aguilar-Barajas I, Romero D, Rodriguez CA (2019) Circular economy in the electronic products sector: Material flow analysis and economic impact of cellphone e-waste in Mexico. **Sustainability (Switzerland)** 11(5). MDPI AG. DOI: 10.3390/su11051361.

Cotta B (2020) What goes around, comes around? Access and allocation problems in Global North–South waste trade. **International Environmental Agreements: Politics, Law and Economics** 20(2). Springer: 255–269. DOI: 10.1007/s10784-020-09479-3.

Coughlan D, Fitzpatrick C (2020) Trialling the preparation for reuse of consumer ICT WEEE in Ireland. **Journal of Cleaner Production** 256. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120512>

Coughlan D, Fitzpatrick C and McMahon M (2018) Repurposing end of life notebook

computers from consumer WEEE as thin client computers – A hybrid end of life strategy for the Circular Economy in electronics. **Journal of Cleaner Production** 192: 809–820. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.05.029.

Cucchiella F, D'Adamo I, Lenny Koh SC, Rosa P (2015) Recycling of WEEEs: An economic assessment of present and future e-waste streams. **Renewable and Sustainable Energy Reviews** 51. Elsevier: 263–272. DOI: 10.1016/j.rser.2015.06.010.

Cucchiella F, D'Adamo I, Rosa P, Terzi S (2016) Automotive printed circuit boards recycling: An economic analysis. **Journal of Cleaner Production** 121: 130–141. DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.09.122.

D'Adamo I, Ferella F, Gastaldi M, et al. (2019) Towards sustainable recycling processes: Wasted printed circuit boards as a source of economic opportunities. **Resources, Conservation and Recycling** 149. Elsevier B.V.: 455–467. DOI: 10.1016/j.resconrec.2019.06.012.

Diehl O, Schönfeldt M, Brouwer E, et al. (2018) Towards an Alloy Recycling of Nd–Fe–B Permanent Magnets in a Circular Economy. **Journal of Sustainable Metallurgy** 4(2). Springer: 163–175. DOI: 10.1007/s40831-018-0171-7.

Duberg JV, Johansson G, Sundin E, Kurilova-Palisaitiene J (2020) Prerequisite factors for original equipment manufacturer remanufacturing. **Journal of Cleaner Production** 270. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122309>

EC (2017) The role of waste-to-energy in the circular economy. Available at: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:52017DC0034&from=EN> (accessed 21 September 2020)

Ehrenfeld J, Gertler N (1997) Industrial Ecology in Practice: The Evolution of Interdependence at Kalundborg. **Journal of Industrial Ecology** 1, no. 1, pp. 67–79. DOI: <https://doi.org/10.1162/jiec.1997.1.1.67>

Ellen MacArthur Foundation (2019) Completing the Picture How the Circular Economy Trackless Climate Change. pp. 1–65. Available at: https://www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/COMPLETING_THE_PICTURE_HOW_THE_CIRCULAR_ECONOMY-TACKLES_CLIMATE_CHANGE_V2_23_September.pdf (accessed on 15 September 2021).

Erkman S (1997) Industrial ecology: An historical view. **Journal of Cleaner Production** 5, 1-2, pp. 1–10. [https://doi.org/10.1016/S0959-6526\(97\)00003-6](https://doi.org/10.1016/S0959-6526(97)00003-6)

EU (2008) The Waste Framework Directive - DIRECTIVE 2008/98/EC OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 19 November 2008 on waste and repealing certain Directives. Available at: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A02008L0098-20180705>

EU (2009) DIRECTIVE 2009/125/EC OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 21 October 2009 establishing a framework for the setting of ecodesign requirements for energy-related products.

EU (2012) Directive 2012/19/EU of the European Parliament and of the Council of 4 July 2012 on waste electrical and electronic equipment, WEEE. *Official Journal of European Union*. Available at: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A32012L0019> (accessed 21 September 2020).

EU (2015) Closing the loop - An EU action plan for the Circular Economy. *Official Journal of European Union*. Available at: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52015DC0614> (accessed 21 September 2020).

EU (2017) On the implementation of the Circular Economy Action Plan. *Official Journal of European Union*. Available at: https://ec.europa.eu/environment/circular-economy/implementation_report.pdf (accessed 21 September 2020).

Ezeudu OB and Ezeudu TS (2019) Implementation of Circular Economy Principles in Industrial Solid Waste Management: Case Studies from a Developing Economy (Nigeria). **Recycling** 4(4): 42. DOI: 10.3390/recycling4040042.

Favot M and Grassetti L (2017) E-waste collection in Italy: Results from an exploratory analysis. **Waste Management** 67: 222–231. DOI: 10.1016/j.wasman.2017.05.026.

Favot M and Massarutto A (2019) Rare-earth elements in the circular economy: The case of yttrium. **Journal of Environmental Management** 240: 504–510. DOI: 10.1016/j.jenvman.2019.04.002.

Favot M, Veit R and Massarutto A (2016) The evolution of the Italian EPR system for the management of household Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE). Technical and economic performance in the spotlight. **Waste Management** 56: 431–437. DOI: 10.1016/j.wasman.2016.06.005.

Fiore S, Ibanescu D, Teodosiu C, Ronco A (2019) Improving waste electric and electronic equipment management at full-scale by using material flow analysis and life cycle assessment. **Science of the Total Environment** 659, 928–939. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.417>

Fizaine F (2020) The economics of recycling rate: New insights from waste electrical and electronic equipment. **Resources Policy** 67. DOI: 10.1016/j.resourpol.2020.101675.

Forti V, Baldé CP, Kuehr R, Be G (2020) The Global E-waste Monitor 2020 - Quantities, flows, and circular economy potencial. *United Nations University (UNU)/United Nations Institute for Training and Research (UNITAR) – co-hosted SCYCLE Programme, International Telecommunication Union (ITU) & International Solid Waste Association (ISWA)*, Bonn/Geneva/Rotterdam.

Friege H, Zeschmar-Lahl B and Borgmann A (2018) Managing Cd Containing Waste—Caught by the Past, the Circular Economy Needs New Answers. **Recycling** 3(2): 18. DOI: 10.3390/recycling3020018.

Gallego-Schmid A, Mendoza JMF and Azapagic A (2018) Environmental assessment of microwaves and the effect of European energy efficiency and waste management legislation. **Science of the Total Environment** 618: 487–499. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.11.064.

Garlapati VK (2016) E-waste in India and developed countries: Management , recycling , business and biotechnological initiatives. **Renewable and Sustainable**

Energy Reviews 54, 874–881. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.106>

Garrido-Hidalgo C, Olivares T, Ramirez FJ, Roda-Sanchez L (2019) An end-to-end Internet of Things solution for Reverse Supply Chain Management in Industry 4.0. **Computers in Industry** 112. DOI: 10.1016/j.compind.2019.103127.

Garrido-Hidalgo C, Ramirez FJ, Olivares T, Roda-Sanchez L (2020) The adoption of Internet of Things in a Circular Supply Chain framework for the recovery of WEEE: The case of Lithium-ion electric vehicle battery packs. **Waste Management** 103: 32–44. DOI: 10.1016/j.wasman.2019.09.045

Gavertsson I, Milios L, Dalhammar C, Gavertsson I, Milios L, Dalhammar C (2020) Quality Labelling for Re-used ICT Equipment to Support Consumer Choice in the Circular Economy. **Journal of Consumer Policy** 43, 353–377. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10603-018-9397-9>

Ghisellini P, Cialani C, Ulgiati S (2016) A review on circular economy: The expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems. **J. Clean. Prod.** 114, 11–32. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.007>

Gök G, Tulun Ş, Gürbüz OA (2017) Consumer Behavior and Policy About E-Waste in Aksaray and Niğde Cities, Turkey. **Clean - Soil, Air, Water** 45. DOI: <https://doi.org/10.1002/clen.201500733>

Golev A and Corder GD (2017) Quantifying metal values in e-waste in Australia: The value chain perspective. **Minerals Engineering** 107: 81–87. DOI: 10.1016/j.mineng.2016.10.021

Grdic ZS, Nizic MK, Rudan E (2020) Circular economy concept in the context of economic development in EU countries. **Sustainability** 12. DOI: <https://doi.org/10.3390/su12073060>

Grošelj P, Zadnik Stirn L (2015) The environmental management problem of Pohorje, Slovenia: A new group approach within ANP – SWOT framework. **Journal of Environmental Management** 161, 106–112. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.06.038>

Gu Y, Wu Y, Xu M, Wang H, Zuo T (2017) To realize better extended producer responsibility: Redesign of WEEE fund mode in China. **Journal of Cleaner Production** 164. Elsevier Ltd: 347–356. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.06.168.

Gupt Y (2014) Economic instruments and the efficient recycling of batteries in Delhi and the National Capital Region of India. **Environment and Development Economics** 20, 236–258. DOI: <https://doi.org/10.1017/S1355770X14000382>

Hagelüken C, Lee-Shin JU, Carpentier A, Heron C (2016) The EU circular economy and its relevance to metal recycling. **Recycling** 1(2): 242–253. DOI: 10.3390/recycling1020242.

Han W, Gao G, Geng J, Li Y, Wang Y (2018) Ecological and health risks assessment and spatial distribution of residual heavy metals in the soil of an e-waste circular economy park in Tianjin, China. **Chemosphere** 197. Elsevier Ltd: 325–335. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2018.01.043.

Ho FH, Abdul-Rashid SH, Ghazilla RAR, Woo YL (2019) Resources sustainability

through material efficiency strategies: An insight study of electrical and electronic companies. **Resources** 8(2). MDPI AG. DOI: 10.3390/resources8020117.

Işıldar A, Rene ER, van Hullebusch ED, Lens PNL (2018) Electronic waste as a secondary source of critical metals: Management and recovery technologies. **Resources, Conservation and Recycling** 135. Elsevier B.V.: 296–312. DOI: 10.1016/j.resconrec.2017.07.031.

Islam MT and Huda N (2019) E-waste in Australia: Generation estimation and untapped material recovery and revenue potential. **Journal of Cleaner Production** 237. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.117787.

Islam MT and Huda N (2020) Reshaping WEEE management in Australia: An investigation on the untapped WEEE products. **Journal of Cleaner Production** 250. Elsevier Ltd. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.119496.

Jawahir IS, Bradley R (2016) Technological Elements of Circular Economy and the Principles of 6R-Based Closed-Loop Material Flow in Sustainable Manufacturing. **Procedia Cirp**, 40, 103–108. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.01.067>

Jin H, Frost K, Sousa I, Ghaderi H, Bevan A, Zakotnik M, Handwerker C (2020) Life cycle assessment of emerging technologies on value recovery from hard disk drives. **Resources, Conservation and Recycling** 157. DOI: 10.1016/j.resconrec.2020.104781.

Johnson M, McMahon K, Fitzpatrick C (2020) A preparation for reuse trial of washing machines in Ireland. **Sustainability** 12. DOI: <https://doi.org/10.3390/su12031175>

Kama K (2015) Circling the economy: Resource-making and marketization in EU electronic waste policy. **Area** 47(1). Blackwell Publishing Ltd: 16–23. DOI: 10.1111/area.12143.

Kasulaitis B V., Babbitt CW and Krock AK (2019) Dematerialization and the Circular Economy: Comparing Strategies to Reduce Material Impacts of the Consumer Electronic Product Ecosystem. **Journal of Industrial Ecology** 23(1). Blackwell Publishing: 119–132. DOI: 10.1111/jiec.12756.

Kibbe MR (2020) Consequences of the COVID-19 Pandemic on Manuscript Submissions by Women. **JAMA Surgery** 155, 803. DOI: <https://doi.org/10.1001/jamasurg.2020.3917>

Kiddee P, Naidu R, Wong MH (2013) Electronic waste management approaches: An overview. **Waste Management** 33, 1237–1250. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2013.01.006>

Kim J, Kim HM (2020) Impact of generational commonality of short life cycle products in manufacturing and remanufacturing processes. **Journal of Mechanical Design Transaction of the ASME** 142. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.4047092>

Kissling R, Coughlan D, Fitzpatrick C, Boeni H, Luepschen C, Andrew S, Dickenson J (2013) Success factors and barriers in re-use of electrical and electronic equipment. **Resources, Conservation and Recycling** 80, 21–31. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2013.07.009>

Kissling R, Fitzpatrick C, Boeni H, Luepschen C, Andrew S, Dickenson J (2012)

Definition of generic re-use operating models for electrical and electronic equipment. **Resources, Conservation and Recycling** 65, 85–99. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2012.04.003>

Klemettinen L, Avarmaa K and Taskinen P (2017) Slag Chemistry of High-Alumina Iron Silicate Slags at 1300 °C in WEEE Smelting. **Journal of Sustainable Metallurgy** 3(4): 772–781. DOI: 10.1007/s40831-017-0141-5.

Klemettinen L, Avarmaa K, O'brien H, Taskinen P, Jokilaakso A (2019) Behavior of tin and antimony in secondary copper smelting process. **Minerals** 9(1). MDPI AG. DOI: 10.3390/min9010039.

Krikke H (2011) Impact of closed-loop network configurations on carbon footprints: A case study in copiers. **Resources, Conservation and Recycling** 55, 1196–1205. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.07.001>

Kuah ATH and Wang P (2020) Circular economy and consumer acceptance: An exploratory study in East and Southeast Asia. **Journal of Cleaner Production** 247. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.119097.

Kunz N, Mayers K and Van Wassenhove LN (2018) Stakeholder Views on Extended Producer Responsibility and the Circular Economy. **California Management Review** 60(3): 45–70. DOI: 10.1177/0008125617752694.

Kuong IH, Li J, Zhang J, Zeng X (2019) Estimating the Evolution of Urban Mining Resources in Hong Kong, Up to the Year 2050. **Environmental Science and Technology** 53, 1394–1403. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b04063>

Laurenti R, Sinha R, Singh J, Frostell B (2015) Some pervasive challenges to sustainability by design of electronic products - A conceptual discussion. **Journal of Cleaner Production** 108: 281–288. DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.08.041.

Leclerc SH, Badami MG (2020) Extended producer responsibility for E-waste management: Policy drivers and challenges. **Journal of Cleaner Production** 251. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119657>

Levänen J, Lyytinen T and Gatica S (2018) Modelling the Interplay Between Institutions and Circular Economy Business Models: A Case Study of Battery Recycling in Finland and Chile. **Ecological Economics** 154. Elsevier B.V.: 373–382. DOI: 10.1016/j.ecolecon.2018.08.018.

Li X, Huang W (2015) Process for copper recovery from e-waste: printed wiring boards in obsolete computers. **Nature Environment and Pollution Technology** 14(1): 145–148.

Li X, Duan Y, Sun H, Zhang P, Xu J, Hua X, Jin L, Li M (2019) Human exposure levels of PAEs in an e-waste recycling area: Get insight into impacts of spatial variation and manipulation mode. **Environment International** 133. Elsevier Ltd. DOI: 10.1016/j.envint.2019.105143.

Lieder M, Rashid A (2016) Towards circular economy implementation: a comprehensive review in context of manufacturing industry. **Journal of Cleaner Production** 115, 36–51. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.12.042>

Lisinska M, Fornalczyk A and Willner J (2019) Problems of processing and separation of multi-material electronic waste in terms of circular economy. **Archives of**

Metallurgy and Materials 64(4). Polish Academy of Sciences: 1639–1643. DOI: 10.24425/amm.2019.130138.

Mancini SD, de Medeiros GA, Paes MX, de Oliveira BOS, Antunes MLP, de Souza RG, Ferraz JL, Bortoleto AP, de Oliveira JAP (2021) Circular Economy and Solid Waste Management: Challenges and Opportunities in Brazil. **Circular Economy and Sustainability** 1, 261–282. DOI: <https://doi.org/10.1007/s43615-021-00031-2>

Manhart A (2011) International Cooperation for Metal Recycling From Waste Electrical and Electronic Equipment. **Journal of Industrial Ecology** 15, 13–30. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1530-9290.2010.00307.x>

Marra A, Cesaro A, Rene ER, Belgiorno V, Lens PNL (2018) Bioleaching of metals from WEEE shredding dust. **Journal of Environmental Management** 210: 180–190. DOI: 10.1016/j.jenvman.2017.12.066.

Marra A, Cesaro A and Belgiorno V (2019) Recovery opportunities of valuable and critical elements from WEEE treatment residues by hydrometallurgical processes. **Environmental Science and Pollution Research** 26(19). Springer Verlag: 19897–19905. DOI: 10.1007/s11356-019-05406-5.

Mazahir S, Verter V, Boyaci T, Van Wassenhove LN (2019) Did Europe Move in the Right Direction on E-waste Legislation? **Production and Operations Management** 28(1): 121–139. DOI: 10.1111/poms.12894.

McDonough W, Braungart M (2002) Cradle to cradle: Remaking the way we make things. New York, North Point Press.

McMahon K, Johnson M and Fitzpatrick C (2019) Enabling preparation for re-use of waste electrical and electronic equipment in Ireland: Lessons from other EU member states. **Journal of Cleaner Production** 232. Elsevier Ltd: 1005–1017. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.05.339.

Messmann L, Boldoczki S, Thorenz A, Tuma A (2019) Potentials of preparation for reuse: A case study at collection points in the German state of Bavaria. **Journal of Cleaner Production** 211. Elsevier Ltd: 1534–1546. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.11.264.

Mishima K, Rosano M, Mishima N, Nishimura H (2016) End-of-life strategies for used mobile phones using material flow modeling. **Recycling** 1(1). DOI: 10.3390/recycling1010122.

Mo H, Wen Z and Chen J (2009) China's recyclable resources recycling system and policy: A case study in Suzhou. **Resources, Conservation and Recycling** 53(7): 409–419. DOI: 10.1016/j.resconrec.2009.03.002.

Moher D, Liberati A, Tetzlaff J, Altman DG (2009) Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses: The PRISMA Statement. **PLoS Medicine** 6, e1000097. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pmed.1000097>

Nascimento DLM, Alencastro V, Quelhas OLG, Caiado RGG, Garza-Reyes JA, Lona LR, Tortorella G (2019) Exploring Industry 4.0 technologies to enable circular economy practices in a manufacturing context: A business model proposal. **Journal of Manufacturing Technology Management**. Emerald Group Publishing Ltd. DOI: 10.1108/JMTM-03-2018-0071.

Nelen D, Manshoven S, Peeters JR, Vanegas P, D'Haese N, Vrancken K (2014) A multidimensional indicator set to assess the benefits of WEEE material recycling. **Journal of Cleaner Production** 83, 305–316. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.06.094>

Nowakowski P (2019) Investigating the reasons for storage of WEEE by residents – A potential for removal from households. **Waste Management** 87. Elsevier Ltd: 192–203. DOI: 10.1016/j.wasman.2019.02.008.

Nowakowski P and Mrówczyńska B (2018) Towards sustainable WEEE collection and transportation methods in circular economy - Comparative study for rural and urban settlements. **Resources, Conservation and Recycling** 135. Elsevier B.V.: 93–107. DOI: 10.1016/j.resconrec.2017.12.016.

Nowakowski P, Szwarc K and Boryczka U (2020) Combining an artificial intelligence algorithm and a novel vehicle for sustainable e-waste collection. **The Science of the total environment** 730. NLM (Medline): 138726. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.138726.

O'Connor MP, Zimmerman JB, Anastas PT, Plata DL (2016) A strategy for material supply chain sustainability: Enabling a circular economy in the electronics industry through green engineering. **ACS Sustainable Chemistry and Engineering** 4(11). American Chemical Society: 5879–5888. DOI: 10.1021/acssuschemeng.6b01954.

Oliveira CR de, Bernardes AM, Gerbase AE (2012) Collection and recycling of electronic scrap: A worldwide overview and comparison with the Brazilian situation. **Waste Management** 32, 1592–1610. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2012.04.003>

Olofsson JK and Mali F (2019) From Risk To Resource? E-Waste Management and the Concept of Circular Economy. **Teorija in Praksa** 56(3): 836–852.

Ongondo FO, Williams ID, Cherrett TJ (2011) How are WEEE doing ? A global review of the management of electrical and electronic wastes. **Waste Management** 31, 714–730. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2010.10.023>

Ongondo FO, Williams ID, Dietrich J, Carroll C (2013) ICT reuse in socio-economic enterprises. **Waste Management** 33(12): 2600–2606. DOI: 10.1016/j.wasman.2013.08.020.

Ongondo FO, Williams ID and Whitlock G (2015) Distinct Urban Mines: Exploiting secondary resources in unique anthropogenic spaces. **Waste Management** 45: 4–9. DOI: 10.1016/j.wasman.2015.05.026.

Otoni M, Dias P and Xavier LH (2020) A circular approach to the e-waste valorization through urban mining in Rio de Janeiro, Brazil. **Journal of Cleaner Production** 261. Elsevier Ltd. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.120990.

Parajuly K and Wenzel H (2017) Potential for circular economy in household WEEE management. **Journal of Cleaner Production** 151: 272–285. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.03.045.

Pauli GA (2010) The blue economy: 10 years, 100 innovations, 100 million jobs. Taos NM, *Paradigm Publications*.

Pearce DW, Turner RK (1990) Economics of natural resources and the environment. New York, London, Harvester Wheatsheaf.

Peng C, Liu F, Aji AT, Wilson BP, Lundström M (2019) Extraction of Li and Co from industrially produced Li-ion battery waste – Using the reductive power of waste itself. **Waste Management** 95: 604–611. DOI: 10.1016/j.wasman.2019.06.048.

Perkins DN, Drisse MB, Nxele T, Sly PD (2014) E-Waste : A Global Hazard. *Annals of Global Health* 80, 286–295. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aogh.2014.10.001>

Poppelaars F, Bakker C and van Engelen J (2020) Design for divestment in a circular economy: Stimulating voluntary return of smartphones through design. **Sustainability (Switzerland)** 12(4). MDPI AG. DOI: 10.3390/su12041488.

PRISMA (2021) PRISMA TRANSPARENT REPORTING of SYSTEMATIC REVIEWS AND META-ANALYSES. Available at: <http://www.prisma-statement.org/> (accessed 15 August 2021)

Priyadarshini P and Abhilash PC (2020) Circular economy practices within energy and waste management sectors of India: A meta-analysis. **Bioresource Technology** 304. Elsevier Ltd. DOI: 10.1016/j.biortech.2020.123018.

Rachid G, El Fadel M (2013) Comparative SWOT analysis of strategic environmental assessment systems in the Middle East and North Africa region. **Journal of Environmental Management** 125, 85–93. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.03.053>

Richter JL and Koppejan R (2016) Extended producer responsibility for lamps in Nordic countries: Best practices and challenges in closing material loops. **Journal of Cleaner Production** 123. Elsevier Ltd: 167–179. DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.06.131.

Rocca R, Rosa P, Sassanelli C, Fumagalli L, Terzi S (2020) Integrating virtual reality and digital twin in circular economy practices: A laboratory application case. **Sustainability (Switzerland)** 12(6). MDPI AG. DOI: 10.3390/su12062286.

Ryen EG, Gaustad G, Babbitt CW, Babbitt G (2018) Ecological foraging models as inspiration for optimized recycling systems in the circular economy. **Resources, Conservation and Recycling** 135: 48–57. DOI: 10.1016/j.resconrec.2017.08.006.

Sabbaghi M and Behdad S (2018) Consumer decisions to repair mobile phones and manufacturer pricing policies: The concept of value leakage. **Resources, Conservation and Recycling** 133. Elsevier B.V.: 101–111. DOI: 10.1016/j.resconrec.2018.01.015.

Sadrnia A, Langarudi NR, Sani AP (2020) Logistics network design to reuse second-hand household appliances for charities. **Journal of Cleaner Production** 244. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118717>

Safdar N, Khalid R, Ahmed W, Imran M (2020) Reverse logistics network design of e-waste management under the triple bottom line approach. **Journal of Cleaner Production** 272. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122662>

Sanito RC, You S-J, Chang T-J, Wang Y-F (2020) Economic and environmental evaluation of flux agents in the vitrification of resin waste: A SWOT analysis. **Journal of Environmental Management** 270. DOI: 10.1016/j.jenvman.2020.110910.

Schroeder P, Anggraeni K, Weber U (2019) The Relevance of Circular Economy Practices to the Sustainable Development Goals. **Journal of Industrial Ecology** 23, 77–95. DOI: <https://doi.org/10.1111/jiec.12732>

Sharma M, Joshi S and Kumar A (2020) Assessing enablers of e-waste management in circular economy using DEMATEL method: An Indian perspective. **Environmental Science and Pollution Research** 27(12). Springer: 13325–13338. DOI: 10.1007/s11356-020-07765-w.

Singh A, Panchal R and Naik M (2020) Circular economy potential of e-waste collectors, dismantlers, and recyclers of Maharashtra: a case study. **Environmental Science and Pollution Research** 27(17). Springer: 22081–22099. DOI: 10.1007/s11356-020-08320-3.

Singhal D, Tripathy S, Jena SK (2019) Sustainability through remanufacturing of e-waste: Examination of critical factors in the Indian context. **Sustainable Production and Consumption** 20, 128–139. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2019.06.001>

Sommerhuber PF, Wang T and Krause A (2016) Wood-plastic composites as potential applications of recycled plastics of electronic waste and recycled particleboard. **Journal of Cleaner Production** 121. Elsevier Ltd: 176–185. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.02.036.

Sommerhuber PF, Wenker JL, Rüter S, Krause A (2017) Life cycle assessment of wood-plastic composites: Analysing alternative materials and identifying an environmental sound end-of-life option. **Resources, Conservation and Recycling** 117. Elsevier B.V.: 235–248. DOI: 10.1016/j.resconrec.2016.10.012.

Srivastava PK, Kulshreshtha K, Mohanty CS, Pushpangadan P, Singh A (2005) Stakeholder-based SWOT analysis for successful municipal solid waste management in Lucknow, India. **Waste Management** 25, 531–537. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2004.08.010>

Stahel WR (2010) The performance economy. 2nd ed, Basingstoke, Palgrave Macmillan.

Stamminger R, Tecchio P, Ardente F, Mathieux F, Niestrath P (2018) Towards a durability test for washing-machines. **Resources, Conservation and Recycling** 131, 206–215. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.11.014>

Steuer B (2016) What Institutional Dynamics Guide Waste Electrical and Electronic Equipment Refurbishment and Reuse in Urban China? **Recycling** 1(2): 286–310. DOI: 10.3390/recycling1020286

Steuer B (2017) Is China's regulatory system on urban household waste collection effective? An evidence-based analysis on the evolution of formal rules and contravening informal practices. **Journal of Chinese Governance** 2(4): 411–436. DOI: 10.1080/23812346.2017.1379166

Steuer B, Ramusch R and Salhofer S (2018) Is there a future for the informal recycling sector in urban China? **Detritus** 4(December): 189–200. DOI: 10.31025/2611-4135/2018.13725.

Stowell AF and Brigham M (2018) Extractivism, value and waste. Organizational mining of e-waste in the United Kingdom. **Etnografia e Ricerca Qualitativa** 1: 75–96.

DOI: 10.3240/89695

Swain B and Lee CG (2019) Commercial indium recovery processes development from various e-(industry) waste through the insightful integration of valorization processes: A perspective. **Waste Management**. Elsevier Ltd. DOI: 10.1016/j.wasman.2019.02.042

Talens Peiró L, Castro Girón A and Gabarrell i Durany X (2020) Examining the feasibility of the urban mining of hard disk drives. **Journal of Cleaner Production** 248. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.119216

Tan Y, Guo C (2019) Research on two-way logistics operation with uncertain recycling quality in government multi-policy environment. **Sustainability** 11. DOI: <https://doi.org/10.3390/su11030882>

Tecchio P, Ardente F, Mathieux F (2019) Understanding lifetimes and failure modes of defective washing machines and dishwashers. **Journal of Cleaner Production** 215, 1112–1122. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.044>

Tesfaye F, Lindberg D, Hamuyuni J, Taskinen P, Hupa L (2017) Improving urban mining practices for optimal recovery of resources from e-waste. **Minerals Engineering** 111. Elsevier Ltd: 209–221. DOI: 10.1016/j.mineng.2017.06.018

Tong X, Wang T, Chen Y, Wang Y (2018) Towards an inclusive circular economy: Quantifying the spatial flows of e-waste through the informal sector in China. **Resources, Conservation and Recycling** 135. Elsevier B.V.: 163–171. DOI: 10.1016/j.resconrec.2017.10.039

Tozanli O, Kongar E, Gupta SM (2020) Evaluation of waste electronic product trade-in strategies in predictive twin disassembly systems in the era of blockchain. **Sustainability** 12. DOI: <https://doi.org/10.3390/su12135416>

Truttmann N, Rechberger H (2006) Contribution to resource conservation by reuse of electrical and electronic household appliances. **Resources, Conservation and Recycling** 48: 249–262. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2006.02.003>

Tsai FM, Bui T-D, Tseng M-L, Lim MK, Hu J (2020) Municipal solid waste management in a circular economy: A data-driven bibliometric analysis. **Journal of Cleaner Production** 275, 124132. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124132>

Tsiliyannis CA (2016) A fundamental law relating stock and end-of-life flow in cyclic manufacturing. **Journal of Cleaner Production** 127. Elsevier Ltd: 461–474. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.03.054.

Tsydenova O, Bengtsson M (2011) Chemical hazards associated with treatment of waste electrical and electronic equipment. **Waste Management** 31, 45–58. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2010.08.014>

Tuccio G, Bua P, Teodoro G, Failla F, Giuffrida VA (2017) Mass balance as economic and sustainable strategy in WEEE sector. **Procedia Environmental Science, Engineering and Management** 4(3): 191–197.

Turaga RMR, Bhaskar K, Sinha S, Hinchliffe D, Hemkhaus M, Arora R, Chatterjee S, Khetriwal DS, Radulovic V, Singhal P, Singhal P, Sharma H (2019) E-Waste Management in India: Issues and Strategies. **Vikalpa** 44(3): 127–162. DOI: 10.1177/0256090919880655.

UN (2020) The 2030 Agenda for Sustainable Development. Available at: <https://sdgs.un.org/goals> (accessed 20 July 2021)

Unger N, Beigl P, Höggerl G, Salhofer S (2017) The greenhouse gas benefit of recycling waste electrical and electronic equipment above the legal minimum requirement: An Austrian LCA case study. **Journal of Cleaner Production** 164. Elsevier Ltd: 1635–1644. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.06.225.

Van Eygen E, De Meester S, Tran HP, Dewulf J (2016) Resource savings by urban mining: The case of desktop and laptop computers in Belgium. **Resource, Conservation and Recycling** 107, 53–64. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.10.032>

Vanegas P, Peeters JR, Cattrysse D, Tecchio P, Ardente F, Mathieux F, Dewulf W, Duflou JR (2018) Ease of disassembly of products to support circular economy strategies. **Resources, Conservation and Recycling** 135. Elsevier B.V.: 323–334. DOI: 10.1016/j.resconrec.2017.06.022.

Veenstra A, Wang C, Fan W, Ru Y (2010) An analysis of E-waste flows in China. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology** 47(5–8): 449–459. DOI: 10.1007/s00170-009-2356-5.

Wagner F, Peeters JR, De Keyzer J, Janssens K, Duflou JR, Dewulf W (2019a) Towards a more circular economy for WEEE plastics – Part A: Development of innovative recycling strategies. **Waste Management** 100: 269–277. DOI: 10.1016/j.wasman.2019.09.026.

Wagner F, Peeters JR, De Keyzer J, Janssens K, Duflou JR, Dewulf W (2019b) Towards a more circular economy for WEEE plastics – Part B: Assessment of the technical feasibility of recycling strategies. **Waste Management** 96: 206–214. DOI: 10.1016/j.wasman.2019.07.035.

WALA M and NOWAKOWSKI P (2020) INVESTIGATING THE ECONOMIC EFFICIENCY OF WASTE COLLECTION AND TRANSPORTATION - CASE STUDY FOR URBAN AND RURAL MUNICIPALITIES IN POLAND. **Transport Problems** 15(2). Exeley, Inc.: 93–105. DOI: 10.21307/tp-2020-023.

Webster K (2017) The Circular Economy: A Wealth of Flows. 2nd ed., *Ellen MacArthur Foundation Publishing: Cowes, UK*, pp. 5–25.

Wieczorek D and Kwaśniewska D (2018) Economic aspects of metals recover. **Physical Sciences Reviews** 3(4). De Gruyter. DOI: 10.1515/psr-2018-0027.

Xavier LH, Giese EC, Ribeiro-Duthie AC, Lins FAF (2019) Sustainability and the circular economy: A theoretical approach focused on e-waste urban mining. **Resources Policy**. DOI: 10.1016/j.resourpol.2019.101467.

Xu X (2020) The Impact of the COVID-19 Pandemic on Global Research. **International Higher Education** 2. <https://doi.org/10.36197/IHE.2020.104.09>

Zeng X, Mathews JA and Li J (2018) Urban Mining of E-Waste is Becoming More Cost-Effective Than Virgin Mining. **Environmental Science and Technology** 52(8): 4835–4841. DOI: 10.1021/acs.est.7b04909.

Zeng X, Ali SH, Tian J, et al. (2020) Mapping anthropogenic mineral generation in China and its implications for a circular economy. **Nature Communications** 11(1).

Nature Research. DOI: 10.1038/s41467-020-15246-4.

6 O POTENCIAL DE RECUPERAÇÃO DE METAL DE PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO NO BRASIL

Este capítulo da tese resultou na produção de um artigo científico intitulado “*The potential of metal recovery from printed circuit boards in Brazil*”, o qual está em processo de submissão no jornal acadêmico *Heliyon*. Os autores são: José Francisco de Oliveira Neto, Joyce Nunes Galvão Cavalcante, Maisa Mendonça Silva, Simone Machado Santos, Lourdinha Florencio.

RESUMO

A geração de resíduos de equipamentos eletroeletrônicos (REEE) é uma das informações básicas para o gerenciamento de resíduos sólidos urbanos. Em nosso estudo, a geração de REEE e resíduos de placas de circuito impresso e seu potencial de mineração urbana foi estimado de 2015 a 2030. Com base na presença de EEE nos domicílios brasileiros e na quantidade de EEE apresentada no mercado brasileiro, a posse e os valores de obsolescência de cinco tipos de EEE (incluindo TVs, computador de mesa, celular, notebook e tablet) foram estimados usando séries temporais. Os resultados mostram que TVs e celulares são equipamentos eletrônicos comuns em domicílios brasileiros, independentemente do nível de renda familiar. A quantidade de EEE apresentada no mercado tem diminuído nos últimos anos, principalmente em função da alta do dólar e da falta de contêineres para transporte de insumos. Entre 2015 e 2030, a quantidade de REEE gerados por ano aumentou de 131,87 kt para 195,22 kt. Nesse período, a geração de resíduos de PCI fica em torno de 10% da geração de REEE. Além disso, este estudo avalia o potencial de mineração urbana dos materiais recuperáveis presentes nos resíduos de PCIs e os impactos ambientais e econômicos aumentados pela reciclagem desses materiais. Os resultados deste estudo fornecem uma base quantitativa para ajudar os tomadores de decisão a desenvolver políticas estratégicas para a gestão de REEE considerando a circularidade dos materiais.

Palavras-chave: REEE; análise de fluxo de material; mineração urbana; economia circular.

INTRODUÇÃO

O surgimento de dispositivos smart resultou em um aumento na produção e rápido descarte de equipamentos eletroeletrônicos (EEE). Os resíduos de equipamentos eletroeletrônicos (REEE) são os EEE quebrados ou indesejados. A Diretiva nº 2012/19 da União Europeia (*WEEE Directive 2012/19/EU*) apresenta uma definição abrangente sobre os EEE e suas categorias (UE, 2012). A divisão em categorias está relacionada com a composição material de cada tipo de EEE que um dia se tornará REEE. Assim, a diretiva tem contribuído para o uso eficiente de recursos e a recuperação de matéria-prima secundária, respeitando a hierarquia de gerenciamento de resíduos sólidos (prevenção, minimização, recuperação de recursos e disposição).

A geração mundial de REEE estimada para 2019 foi de 53,6 Mt (7,3 kg per capita) (Forti et al., 2020), o que representa um aumento de cerca de 20% em relação a 2016 (44,7 Mt ou 6,1 kg per capita) (Baldé et al., 2017). Desta, aproximadamente 12,5% correspondeu a categoria telas e monitores e 8,8% a categoria pequenos equipamentos de TI e informação (Forti et al., 2020). Além do crescente fluxo de produção, os REEE apresentam uma composição heterogênea e complexa, o que torna o seu correto gerenciamento uma urgência e um grande desafio ambiental. A produção dos EEE demanda diversos materiais, podendo conter até 69 elementos da tabela periódica (Forti et al., 2020) o que leva ao fortalecimento de um importante processo voltado à circularidade de materiais, a mineração urbana. A mineração urbana consiste na exploração dos recursos minerais presentes no fluxo de REEE através de processos sustentáveis, com grande potencial de reduzir o consumo de recursos naturais, maximizar a recuperação de recursos (*maximising resources recovery*) e estimular a circularidade na cadeia de suprimentos (Ongondo et al., 2015; Tesfaye et al., 2017; Xavier et al., 2019). Nesse sentido, os REEE são um importante estoque urbano de recursos secundários, incluindo metais (como prata, ouro, paládio, ferro, alumínio, cobre) (Chancerel et al., 2009; Heacock et al., 2016), elementos de terras raras (Gwenzi et al., 2018), plásticos, vidros de telas e placas de circuito impresso (PCI) montada com componentes eletrônicas (Li et al., 2015; Turner and Filella, 2017).

Como consequência da presença de metais valiosos e matérias-primas críticas (*critical raw materials* - CRM), a reciclagem dos WEEE já é considerada uma atividade

de interesse econômico (Cesaro et al., 2018). Por outro lado, os REEE também são compostos por substâncias potencialmente perigosas como cádmio, chumbo, cromo, mercúrio, assim como químicos encontrados em plásticos e retardantes de chamas (Abdelbasir et al., 2018; Heacock et al., 2016). Entre os diversos impactos negativos provocados pelo gerenciamento inadequado dos REEE, destacam-se a disposição inadequada em aterros sanitários (Barba-Gutiérrez et al., 2008; Ongondo and Williams, 2011; Awasthi et al., 2016; Marra et al., 2019), a contaminação de solo (Itai et al., 2014; Chakraborty et al., 2018; Amphalop et al., 2020) e águas subterrâneas/superficiais (Awasthi et al., 2016; Li and Achal, 2020) em locais de processamento de REEE.

A PCI é a componente mais importante encontrada nos EEE (Wu et al., 2017), e contém a maioria dos materiais complexos e valiosos presentes nesses produtos (Rankin, 2011). Assim, os REEE que possuem as PCIs como uma componente chave se tornaram a categoria de resíduos sólidos perigosos que mais cresce no mundo (Ogunseitan et al., 2022). A composição geral das PCIs corresponde a 40% de metais, 30% de cerâmicos e 30% de plásticos (Estrada-Ruiz et al., 2016; Kaya, 2019). As PCBs também contêm elementos raros (Ta, Ga, etc.) e metais pesados (incluindo Cr, Hg, Cd) (Hadi et al., 2013; Kaya, 2019; Baniasadi et al., 2021), o que confirma a importância econômica da recuperação de materiais.

Uma caracterização abrangente dos EEE colocados no mercado, bem como o mapeamento do perfil de geração e descarte dos REEE (e seus componentes) são fundamentais para o estabelecimento de mecanismos e instrumentos legais e operacionais que possibilitem minimizar os prejuízos ambientais, econômicos e sociais devido o gerenciamento inadequado. Diante desse contexto, o objetivo deste artigo é estimar o potencial de mineração da fração metálica das PCI contidas nos REEE gerados no Brasil, por meio de análise de séries temporais.

REFERENCIAL TEÓRICO

Placas de Circuito Impresso (PCI)

De forma geral, as PCIs correspondem de 3-5% dos REEE gerados globalmente (Hadi et al., 2013; Kaya, 2019) e são constituídas por componentes eletrônicas (*electronic components* – EC). Dessas, menos de 20% são coletadas para reciclagem (Ogunseitan et al., 2022). As PCIs apresentam variada composição e

concentração de materiais (especialmente metais valiosos) (Ping et al., 2019; Hao et al., 2020). Entre os diversos componentes eletrônicos contidos nas PCIs estão resistores, relés, capacitores, interruptores, processadores, dissipadores de calor e circuitos/chips integrados (Duan et al., 2011; Kaya, 2019).

A estrutura de uma PCI apresenta três partes básicas: (i) um laminado ou substrato não-condutivo, formado por multicamadas de fibra de vidro reforçadas com resina epóxi; (ii) um revestimento condutivo de cobre para o laminado ou substrato; e (iii) os ECs ligados ao substrato, os quais são compostos por vários materiais metálicos, inclusive metais preciosos, como chips (gálio, índio, titânio, silício, germânio, arsênico, antimônio, selênio e telúrio), conectores e contadores (ouro, prata), capacitores cerâmicos multicamadas (tântalo), capacitores de alumínio, circuitos integrados (integrated circuits - ICs) (Ghosh et al., 2015; Kaya, 2019). Segundo LaDou (2006), aspectos físicos (como tamanho físico, montagem de componentes e especificações de design) e a composição material das PCIs podem influenciar o potencial de reciclabilidade, a recuperação de recursos secundários e o potencial de poluição ao longo do seu ciclo de vida. A complexa composição material das PCIs varia de acordo com o tipo de PCI e sua aplicação. De acordo com Gosh et al. (2015), as principais demandas por PCI vêm dos mercados de eletrônicos de consumo, industriais e automotivos, além dos setores de energia e telecomunicações.

Na Tabela 2, é apresentada a fração em peso e composição das PCI em computadores, celulares e televisores. Em termos de composição de metais, o cobre é o material mais presente, seguindo por estanho (para desktop PC e celular) ou ferro (para notebook e tablet) ou alumínio (para monitores), os quais são utilizados nas soldas (Duan et al., 2011). Grande parte dos metais preciosos encontrados nos REEE estão nas PCB (Hadi et al., 2015), com destaque para ouro, prata, paládio e platina, os quais estão presentes em maior concentração nas minas urbanas do que nas suas respectivas minas naturais (Wu et al., 2017; Kaya, 2019).

Tabela 2 - Proporção de PCIs e fração metálica por tipo de EEE.

EEE	Desktop PC (excl. monitor)	Monitor LCD	Notebook	Tablet	Celular	Tv LCD
PCB (wt%)	14	6	15	10	10	8

Composição das PCIs (wt%)

<i>Materiais comercializáveis</i>	Desktop PC (excl. monitor)	Monitor LCD	Notebook PC	Tablet	Celular	Tv LCD
Ferro (Fe)	1,3	6,93	3,7	3,7	1,8	6,93
Cobre (Cu)	20	17,25	19	19	33	17,25
Prata (Ag)	0,1	0,08	0,1	0,1	0,4	0,08
Ouro (Au)	0	0,01	0,1	0,1	0,2	0,01
Paládio (Pd)	0,01	0,002	0,01	0,01	0,01	0,002
Alumínio (Al)	1,8	10,05	1,8	1,8	1,5	10,05
Berílio (Be)	0,002	0	0,002	0,002	0,002	0
Bismuto (Bi)	0,02	0,03	0,02	0,02	0,02	0,03
Cromo (Cr)	0	0,02	0,1	0,1	0,1	0,02
Estanho (Sn)	8,3	0,73	1,6	1,6	3,5	0,73
Zinc o (Zn)	1,7	1,17	1,6	1,6	0,5	1,17
<i>Materiais perigosos</i>						
Antimônio (Sb)	0,3	0,16	0,1	0,1	0,1	0,16
Arsênio (As)	0,0005	0	0,0005	0,0005	0,0005	0
Bromo (Br)	0,82	0,39	0,82	0,82	0,82	0,39
Cádmio (Cd)	0,000001	0	0,000001	0,000001	0,000001	0
Cloro (Cl)	0,01	0,31	0,01	0,01	0,01	0,31
Chumbo (Pb)	2,1	1,09	1	1	1,3	1,09
Níquel (Ni)	1,13	0,26	1,13	1,13	1,13	0,26

Nota: Adaptado de Babbitt et al. (2017) e Cucchiella et al. (2016).

Se por um lado a o fluxo de REEE é considerado um estoque urbano de metais valiosos, por outro, a presença de materiais perigosos (incluindo metais pesados e plásticos) causa grande preocupação e impõe a necessidade de uma gestão sustentável para esses resíduos. Diante disso, a mineração urbana de REEE surge como uma estratégia que pode promover benefícios ambientais e econômicos e que, segundo Zeng et al. (2018) e Zeng et al. (2022), os custos da mineração urbana são significativamente menores que os da mineração virgem. Zeng et al. (2022), por exemplo, reforçaram os benefícios ambientais da mineração urbana de cobre e alumínio através de três parâmetros: redução de resíduos sólidos, quantidade de exploração de recursos naturais evitada e quantidade de processamento de recursos naturais evitada. Kazancoglu et al. (2020) apontam barreiras que dificultam a implementação da mineração urbana como incentivos governamentais, falta de conhecimento técnico (nas dimensões tecnológica e de infraestrutura) e tecnologia necessária/disponível. Cucchiella et al. (2015) sinalizam que as atuais tecnologias e os modelos de negócios adotados por recicladores e centros de tratamento são os

fatores que mais contribuem para a baixa taxa de recuperação de materiais (valiosos) presentes nos REEE.

De acordo com Kumar et al. (2017), a reciclagem de REEE pode ser dividida em duas etapas: (i) pré-processamento (incluindo desmantelamento, trituração, separação mecânica/enriquecimento); e (ii) processamento final (que inclui tratamento piro/hidro/biometalúrgico). As tecnologias de pré-processamento são imprescindíveis para a liberação de metais de interesse econômico presentes nos REEE (principalmente dos metais valiosos e críticos) e para remover os materiais perigosos (Işildar et al., 2018; Sethurajan et al., 2019). Islam and Huda (2019) destacam que, embora a pirometalurgia seja o processo mais aplicado para a recuperação de metais preciosos, neste processo, são liberados gases perigosos de dioxinas para o meio ambiente. Nesse sentido, Awasthi and Li (2017) indicam que uma abordagem híbrida (combinando a reciclagem mecânica com biological approaches) pode ser o caminho para resolver a problemática da reciclagem de REEE e a recuperação dos seus materiais valiosos. De acordo com Işildar et al. (2018), a (bio)hidrometalurgia permite um processo ambientalmente adequado, com alta seletividade de metais e processamento econômico para recuperação de metais de REEE.

Quanto à reciclagem de PCI, Kaya (2016) chama atenção para o processo de (dismantling), o qual se refere como a primeira e mais importante etapa no processo de reciclagem das PCIs, com potencial de promover a conservação de recursos escassos e eliminar materiais perigosos do meio ambiente, bem como tornar possível a reutilização de ECs valiosos. O alto valor de mercado das frações metálicas dos REEE e PCIs (especialmente metais preciosos, metais do grupo platina e cobre) resultaram em mais estudos voltados a sua recuperação (Cucchiella et al., 2015; Azevedo et al., 2017; Zeng et al., 2018). A separação (e aplicação) das frações metálicas e não-metálicas das PCBs tem sido objeto de diversos estudos (Kasper et al., 2011; Wang and Xu, 2014; Hadi et al., 2015; Gosh et al., 2015), principalmente sobre o uso de processos mecânicos de reciclagem (moagem, classificação granulométrica, separação magnética e eletrostática, etc). Para Awasthi et al., (2016) a biolixiviação é um processo sustentável para a extração eficiente e recuperação de cobre nas PCIs. Cayumil et al. (2016) destacam que a pirometalurgia se mostrou um processo viável para a recuperação de metais preciosos nas PCIs (incluindo Ag, Au, Pd e Pt), uma vez que esses metais tendem a formar soluções com os principais

constituintes metálicos das PCBs (Cu, Sn, Pb). Charles et al. (2020) apontam a falta de infraestrutura de recuperação adequada como principal barreira a um aumento na taxa de recuperação das CRM nas PCIs, quando comparado com outras frações metálicas.

Os desenvolvidos estão acobertados por regulamentos para orientar os processos mais favoráveis no gerenciamento dos REEE, geralmente baseado na responsabilidade estendida do produtor (*extended producer responsibility* - EPR) (Sthiannopkao and Wong, 2013; Islam et al., 2020). Entretanto, na maioria dos países em desenvolvimento, o gerenciamento dos REEE caracteriza-se pela ausência ou deficiência nas políticas para direcionar a sua gestão formal, bem como pelo uso de processos rudimentares no tratamento desses resíduos (Chi et al., 2011; Oliveira et al., 2012; Ardi and Leisten, 2016; Ilankoon et al., 2018). Estudos realizados na América Latina (Wagner et al., 2022) e no Brasil (Oliveira Neto et al., 2017; Dias et al., 2018; Lopes dos Santos, 2021) apontam que a falta investimentos em tecnologias adequadas to enable the final stages of recycling faz com que os processos de extração e recuperação de metais e materiais valiosos das PCIs sejam realizadas exclusivamente por empresas estrangeiras, principalmente da Europa, Ásia e América do Norte.

Gerenciamento de REEE/PCI no Brasil

O Brasil é o quinto maior produtor global de REEE, com uma produção anual de 2.14 Mt (ou 10.2 kg per capita) (Forti et al., 2020). A Política Nacional de Resíduos Sólidos (*The Brazilian National Policy of Solid Waste* - NPSW) (Lei 12.305/2010) obriga que os fabricantes, importadores, distribuidores e comerciantes de produtos eletrônicos e seus componentes desenvolvam planos de ação para implementação de sistemas de logística reversa de REEE (Brasil, 2010). Desde a promulgação da NPSW, a produção técnico-científica brasileira na área de gestão de REEE cresceu, com destaque para dois aspectos: o incentivo à expansão da reciclagem de REEE em escala industrial e a integração do setor informal de reciclagem ao oficial solid waste management (Oliveira Neto et al., 2019). Na perspectiva de reciclagem de REEE, os estudos desenvolvidos têm dado mais ênfase na recuperação das frações metálica (Kasper et al., 2011; Rubin et al., 2014; Silva et al., 2018; Martins et al., 2021; Cenci et al., 2022) do que a fração não-metálica (Kasper et al., 2011; Campolina et al., 2017). Quanto à formalização e integração dos catadores ao gerenciamento oficial de

resíduos sólidos e à indústria de reciclagem, Ghisolfi et al. (2017) ressaltam que essa ação pode garantir poder de negociação para esse grupo. Entretanto, Demajorovic et al. (2016) apontam que os conflitos entre as organizações de catadores e a indústria de reciclagem são uma barreira importante para que a integração se concretize.

Após a assinatura de um acordo sectorial entre o governo federal e o EEE sector (Brasil, 2019), o Decreto nº 10.240, de 12 de fevereiro de 2020, estabeleceu regras para a implantação de um sistema de logística reversa obrigatório para produtos elétricos e eletrônicos domésticos e seus componentes (BRASIL, 2020). Para Dias et al. (2022), a assinatura do acordo é mais uma oportunidade de canalizar REEE para rotas formais de gestão (atividades ou processos formais de reciclagem) e implementar melhorias em todo o sistema de reciclagem. Entretanto, para que haja uma integração dos stakeholders em um único processo nos sistemas de logística reversa de REEE, autores como Oliveira Neto et al. (2017) e Santos and Ogunseitan (2022) apontam que a descentralização do setor de reciclagem de REEE ainda é uma das principais barreiras a serem superadas no Brasil.

Apesar dos avanços normativos e na produção científica, o Brasil ainda não possui plantas de reciclagem de REEE, em escala industrial, que realizem todas as etapas de processamento/tratamento desses reíduos (Oliveira Neto et al., 2019; Albuquerque et al., 2020; Alves et al., 2021; Lopes dos Santos, 2021). Enquanto isso, mais de 90% dos WEEE gerados no Brasil ainda são gerenciados de forma inadequada (Albuquerque et al., 2020). Ainda, de acordo com Demajorovic et al., (2016), a quantidade de REEE coletados no Brasil é insuficiente para manter uma usina de reciclagem em funcionamento pleno (algo em torno de 15% da capacidade da usina). Entre outros fatores, esse panorama pode ser um reflexo do baixa/irregular fluxo de lixo eletrônico coletado, onde aproximadamente 2% do que é gerado é coletado (Azevedo et al., 2017; Lopes do Santos, 2020), e da limitação quanto aos tipos de REEE que são de interesse do mercado de reciclagem no país (Souza, 2020).

Com o Decreto nº 10.240, um novo modelo de gestão de REEE domésticos, baseado em um sistema de logística reversa, deverá ser desenvolvido para o país. No entanto, para que este sistema funcione e seja relevante para o gerenciamento de REEE do país, algumas barreiras precisam ser superadas, dentre elas a falta de tecnologia e/ou conhecimento técnico em reciclagem e reutilização de lixo eletrônico

(Oliveira Neto et al., 2017; Santos and Ogunseitan, 2022) e a coleta de REEE fortemente dependente de parcerias do setor privado e da entrega individual do consumidor (Dias et al., 2022).

MATERIAIS E MÉTODOS

Estimativa de geração de REEE

Estimar o potencial de geração dos REEE é um passo indispensável não só para se conhecer melhor o perfil de geração e descarte, como também para planejar um sistema de gerenciamento mais adequado possível. Nesse sentido, estudos têm sido realizados em diversos países para estimar a geração de REEE, utilizando métodos geralmente baseados em estimativas de venda e/ou estoque de EEE, tempo de vida útil, peso médio dos EEE, além de condições do mercado (saturado ou dinâmico). Esses métodos podem ser classificados em modelos de séries temporais, modelos de fatores, análise econométrica e modelos de insumo-produto (detalhes em Li et al. (2015) e Ikhlayel (2016)), sendo os modelos insumo-produto e suas variações amplamente aplicados para prever a geração de REEE pelo mundo.

No Brasil, Oliveira Neto et al. (2019) apontam que ainda há poucos estudos voltados para previsão e/ou projeção de geração de REEE, quando comparado aos demais resíduos sólidos urbanos, especialmente pela dificuldade em se ter acesso a dados confiáveis sobre a produção, importação e vendas de EEE no país. Araújo et al. (2012) e Cabral Neto et al. (2016) realizaram estimativas de REEE a nível nacional. Um maior número de publicações, usando dados regionais ou locais, e que trazem mais detalhes sobre aspectos socioeconômicos necessários para o planejamento e implementação de sistemas de logística reversa, foram identificadas: Franco and Lange (2011), no município de Belo Horizonte; Rodrigues et al. (2015), no município de São Paulo; Souza et al. (2016), na Região Metropolitana do Rio de Janeiro; Araujo et al. (2017), no Arquipélago de Fernando de Noronha; Abbondanza and Souza (2019), em São José dos Campos; e Oliveira Neto et al. (2021), em Caruaru. Grande parte dos estudos mencionados acima levaram em consideração um valor constante para a vida útil dos EEE. Entretanto, a previsão mais adequada da geração de REEE deve considerar a natureza dinâmica do mercado e da vida útil dos EEE, a qual pode sofrer variações ao longo do tempo, seja por fatores tecnológicos (Satyro et al., 2018) ou de comportamento do consumidor (Yamamoto and Murakami, 2022).

Diante disso, para a estimativa da geração de REEE no Brasil, este estudo utilizará os mesmos princípios do quadro internacionalmente harmonizado para interpretar e comparar estatísticas de REEE entre países de todo o mundo, desenvolvido pela Universidade das Nações Unidas (UNU). A primeira edição das diretrizes foi publicada em janeiro de 2015 (Baldé et al., 2015), e que foi descrita nas Diretrizes Estatísticas de Resíduos Eletrônicos sobre Relatórios e Indicadores de Classificação (Forti et al., 2018).

De acordo com “the guidelines on e-waste statistics”, a quantidade de REEE gerado (em kg) é calculada a partir da série temporal dos equipamentos colocados no mercado (*Put-on-Market* - POM) de todos os anos históricos, levando em consideração suas respectivas taxas de obsolescência no ano de avaliação n. O método é representado pela Eq. (6.1).

$$REEE(n) = \sum_{t=t_0}^n POM(t) * L^{(p)}(t, n) \quad \text{Eq. (6.1)}$$

Onde REEE (n) é a quantidade de resíduos de equipamentos eletroeletrônicos gerados no ano de avaliação n; POM (t) é a venda dos EEE em quaisquer anos históricos t anteriores ao ano n; t₀ é o ano inicial em que um produto foi vendido; L(p) (t, n) é o perfil de vida útil de um EEE vendido no ano histórico t, o que reflete sua provável taxa de obsolescência no ano de avaliação n.

Quando um país não tem dados disponíveis sobre os EEE colocados no mercado, pode-se assumir que o POM em um ano histórico t é igual à soma da produção nacional e das importações de EEE no ano t menos o EEE exportados no mesmo ano.

O perfil de tempo de vida com base no descarte de um EEE, L(p)(t, n), pode ser modelado através de funções de probabilidade. Nesse sentido, a função de distribuição de probabilidade *Weibull* é considerada a mais adequada para descrever o comportamento de descarte de EEE e tem sido aplicada em estudos de nível global (Baldé et al., 2015; Baldé et al. 2017; Forti et al., 2020), regional (Wagner et al., 2022), nacional (Zeng et al., 2016; Golev et al., 2016; Parajuly et al., 2017; Islam and Huda,

2019) e local (Abbondanza and Souza, 2019). A função de distribuição *Weibull* é definida por um parâmetro de forma (α) e um parâmetro de escala (β), os quais dependem do EEE avaliado e sua respectiva UNU-KEY. Desenvolvidas pela Universidade das Nações Unidas (UNU), as UNU-KEYs são uma classificação baseada nos EEE que possuem características semelhantes, como vida útil, peso médio, composição do material e perfil de periculosidade. A Tabela 3 lista os cinco tipos de EEE considerados neste estudo, bem como as UNU-KEYs associadas e peso médio. O anexo 3 do guideline apresenta o peso médio de EEE considerando os produtos colocados no mercado Europeu. Portanto, optou-se por utilizar o peso médio adotado no trabalho de Oliveira Neto et al. (2021), o qual reflete melhor a realidade dos EEE nos domicílios brasileiros.

Tabela 3 - Caracterização dos EEE considerados na estimativa de geração de REEE.

UNU-KEYS	Descrição	α^a	β^a	Peso médio (kg/EEE)
0302	Desktop PCs (excl. monitors, acessórios)	1.8	10.33	8.77 ^b
0303	Laptops (incl. tablets)	1,94	8,76	2.9 (laptop) 0.5 (tablet)
0306	Telefones celulares (incl. smartphones, pagers)	1.52	5.62	0.1
0309	Monitores (LCD, LED)	2.30	12.18	5.5 ^b
0408	TVs (LCD, LED, Plasma)	1.88	10.95	12

Nota: ^a Proxy of Weibull life-time distribution used for non EU countries; ^b Peso estabelecido pela UNU para desktop PC e monitor).

De posse das informações necessárias, o perfil de tempo de vida pode ser calculado através da Eq. (6.2).

$$L^{(p)}(t, n) = \frac{\alpha}{\beta^\alpha} (n - t)^{\alpha-1} e^{-[(n-t)/\beta]^\alpha} \quad \text{Eq. (6.2)}$$

A geração de resíduos de PCI será estimada de acordo com a proporção de PCI na composição de cada tipo de EEE (conforme Tabela 6.1).

Finalmente, o estoque de EEE, Estoque (n), pode ser calculado como a soma de todos os EEE colocados no mercado nos anos históricos, menos a soma dos REEE gerados nos anos históricos, conforme descrito na Eq. (6.3).

$$\text{Estoque}(n) = \sum_{t=t_0}^n POM(t) - \sum_{t=t_0}^n REEE(n) \quad \text{Eq. (6.3)}$$

Coleta de dados: EEE colocados no mercado e posse de EEE nos domicílios brasileiros

Cinco tipos de EEE, para os quais os dados de vendas estavam disponíveis no período de 2005 até 2021 foram considerados: computador de mesa, notebook, tablet e telefone celular (Abinee, 2022) e televisores LCD (Eletros, 2022). As informações de vendas da Abinee já contabilizam as importações.

Para avaliação da posse, os dados sobre o percentual de domicílios que possuem diversos tipos de EEE no Brasil foram obtidos das pesquisas do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), disponível em “Pesquisa nacional por amostra de domicílios contínua : acesso à internet e posse de telefone móvel celular para uso pessoal”, e do Centro Regional de Estudos para o Desenvolvimento da Sociedade da Informação (CETIC), disponível em “*Executive Summary - Survey on the Use of Information and Communication Technologies in Brazilian Households*”.

Projeção de REEE

As estimativas para as vendas futuras dos equipamentos considerados nesta pesquisa, para um período de 10 anos, foram realizadas usando técnicas de séries temporais. Os métodos de suavização exponencial – os modelos de *Holt-Winters* – são comumente escolhidos em virtude do seu bom ajustamento para dados de vendas de equipamentos pois possuem sazonalidade e tendência linear. Esses métodos então podem auxiliar na estimação das séries de dados e componentes sazonais, fazendo uso de três técnicas de parâmetros de suavizamento: controlando o nível, a sazonalidade e a tendência (Makridakis et al., 1998).

O Método de Holt-Winters aditivo é utilizado quando as séries contêm um efeito tanto de tendência aditivo quanto sazonal aditivo superposto. Já o modelo de Holt-Winters multiplicativo se ajusta a séries com tendência e sazonalidade de maneira mais adequada, isto é, séries em que a amplitude da variação sazonal aumenta com o acréscimo do nível médio da série temporal (Koehler et al., 2001).

Portanto, nesta pesquisa, foram testados os modelos de Holt-Winters multiplicativo e aditivo, juntamente com as métricas de erros para chegar-se ao melhor método. Para isso, foi utilizado o software RStudio, programa desenvolvido e integrado para a linguagem R, usado para realizar análises estatísticas. Para análise

do melhor método para estimar as vendas futuras, optou-se por utilizar a métrica do Erro Percentual Absoluto Médio (MAPE), pois essa expressa com precisão a porcentagem de erro existente.

Recursos secundário: impactos e benefícios

Com base nas estimativas de geração, o fluxo de substâncias metálicas foi determinado de acordo com sua concentração nas PCBs. A concentração dos metais presentes nas PCBs é baseada na Tabela 1, a qual foi adaptada de Cucchiella et al. (2016). As substâncias metálicas presentes nas PCBs, por tipo de EEE, foram agregadas e os recursos secundários disponíveis foram então calculados para cada ano, a partir da Eq.(6.4):

$$S_{jy} = \sum_{i=1}^5 WPCB_{i(y)} * c_{ij} \quad \text{Eq. (6.4)}$$

Onde, S_{jy} = recurso j disponível nos resíduos de PCI no ano y; $WPCB_{i(y)}$ = quantidade de resíduos de PCI por EEE i no ano y; and c_{ij} = conteúdo do recurso j nos resíduos de PCI por EEE i.

Os potenciais benefícios advindos da mineração urbana das PCIs, tais como a economia na demanda de energia (em terajoule) e a pegada de carbono (emissões de CO₂), foram estimados, com base na metodologia apresentada por Grimes et al. (2008). Finalmente, o valor potencial dos metais selecionados contidos nas PCIs foram calculados, com base nos valores de mercado adotados por Forti et al. (2020).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Posse de produtos eletroeletrônicos nos domicílios brasileiros

A Figura 11 mostra aspectos sobre a posse de EEE nos domicílios brasileiros. Existem EEE que são mais comuns nos domicílios brasileiros, independentemente do nível de renda familiar, como por exemplo, o televisor e o telefone celular.

Em 2021, os televisores estavam presentes em mais de 69 milhões de domicílios no Brasil (em 95% dos domicílios) (CETIC, 2021), com tipos variados, dentre eles: apenas TV de tela fina (cerca de 73%), apenas TV CRT (cerca de 18%)

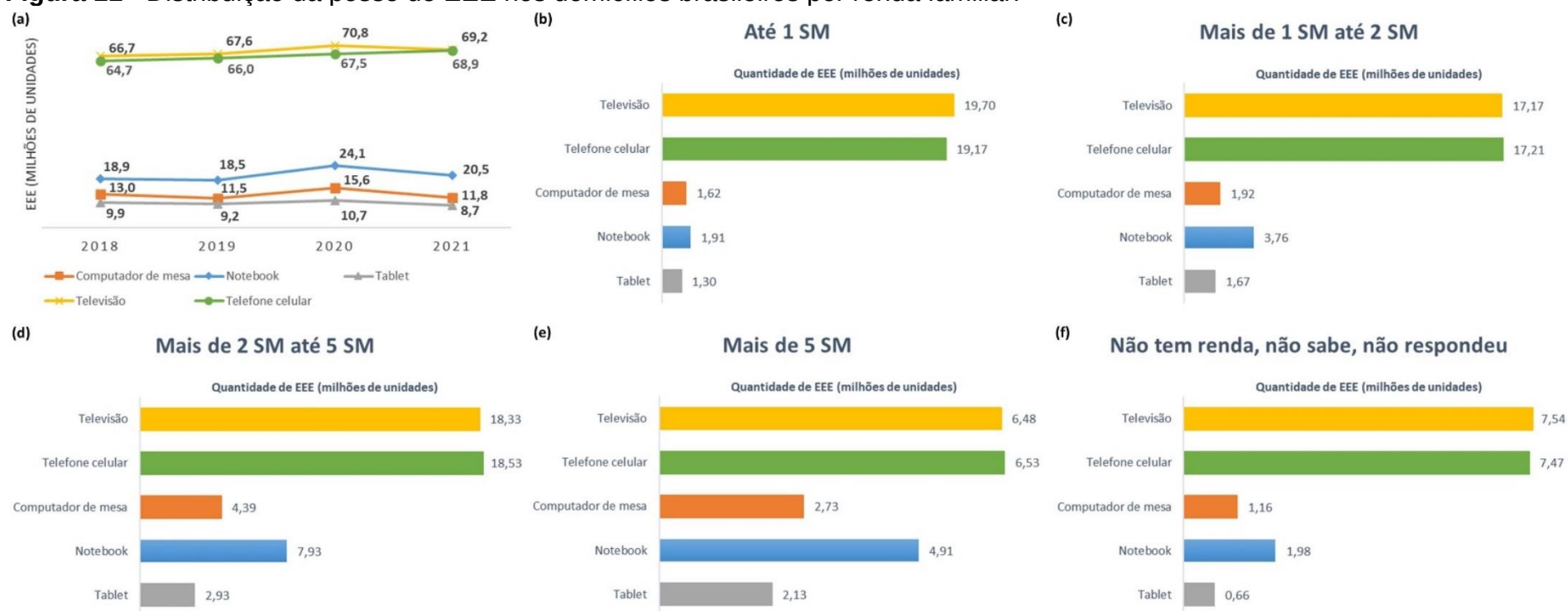
ou os dois tipos (cerca de 7%) (IBGE, 2020). Com o início do desligamento do sinal analógico em alguns municípios brasileiros em 2016, os televisores CRT perderam espaço para os televisores de tela fina de sinal digital. A previsão do Ministério das Comunicações é encerrar a transmissão do sinal analógica até 2023, o que inviabilizará a posse de televisores sem conversor para receber sinal digital, como é o caso dos televisores CRT. Em 2021, aproximadamente 74,5 milhões de usuários de internet acessaram a rede pela televisão, o que representa um patamar superior ao de usuários que acessaram a rede pelo computador de mesa (CETIC, 2021).

O telefone celular, principalmente do tipo smartphone, está cada vez mais popular entre as pessoas. Em 2021, 95% dos domicílios particulares permanentes brasileiros possuíam pelo menos um telefone celular (Figura 11a), o que representa um aumento de cerca de 7% em relação a 2018 (CETIC, 2021). No mesmo ano, o celular foi o principal dispositivo utilizado pela população brasileira para acessar a internet. De acordo com Meireles (2021), em 2020, existiam 238 milhões de smartphones em uso no Brasil, com previsão de aumento para 246 milhões no ano seguinte. Essa popularização dos smartphones se dá pela maior rapidez na comunicação e na obtenção de informações e serviços.

Para muitos outros EEE, a presença nos domicílios varia de acordo com o nível de renda, o qual está associado ao poder de compra. Assim, o rendimento familiar pode afetar tanto a quantidade de EEE, quanto a tipologia dos EEE que a maioria dos domicílios possuem. As Figuras 11b-11e mostram que a presença de computador de mesa, notebook e tablet aumenta de acordo com a renda. Em 2021, cerca de 28,6 milhões de domicílios brasileiros possuíam algum tipo de computador, seja notebook (72% dos domicílios), computador de mesa (41% dos domicílios) ou tablet (30% dos domicílios) (Figura 11). No período de 2018-2020, observa-se um aumento no número de domicílios com posse de computadores, com destaque para os notebooks (↑28%), seguido de computador de mesa (↑20%) e tablet (↑8%). No entanto, há uma diminuição no número de domicílios com computadores no ano de 2021, conforme Figura 11a. Atualmente, os computadores ocupam a terceira posição entre os dispositivos mais utilizados para acessar a internet (CETIC, 2021). Esse cenário se deve ao uso cada vez mais maior de dispositivos móveis para acessar a internet. A presença de tablets, mesmo nos domicílios de menor renda familiar, pode ser explicado pelos programas governamentais de inclusão digital dos estudantes da rede pública

de ensino, no qual estes estudantes recebem um tablet para realizar atividades pedagógicas e pesquisas (BRASIL, 2021).

Figura 11 - Distribuição da posse de EEE nos domicílios brasileiros por renda familiar.



Fonte: Adaptado de CETIC (2021).

Produtos eletroeletrônicos colocados no mercado nacional

A produção de equipamentos e serviços para infraestrutura coloca o setor eletroeletrônico numa posição de destaque na atividade econômica do Brasil. Entretanto, trata-se de setor diretamente impactado pelas condições macroeconômicas do país. Nos últimos anos, dois fatores têm afetado diretamente a produção do setor de eletroeletrônicos no Brasil: a alta do dólar e a falta de contêineres (Eletros, 2022). Grande parte dos insumos do setor são importados de navio, principalmente da Ásia. Assim, com a conversão do custo de transporte para dólar, além do valor dos insumos, que também é em dólar, o preço de venda repassado ao consumidor está aumentando.

De acordo com o relatório *“Impact of the covid19 pandemic on e-waste the first three quarters of 2020”* (Baldé and Kuehr, 2021), houve uma queda no consumo global de EEE, resultando na redução da geração global de REEE (6.4% ou 4.9 Mt) nos anos consecutivos. As categorias de small it and telecommunication equipment e screens and monitors apresentaram redução de 1.4% (ou 0.06 Mt) e 8% (ou 0.5 Mt), respectivamente.

De acordo com o Desempenho Setorial 2021, relatório produzido pela Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica – ABINEE, apesar do impacto da pandemia de Covid-19 na cadeia produtiva global, principalmente em relação a aquisição de matérias-primas e componentes, o setor eletroeletrônico brasileiro apresentou um crescimento nominal de 24% no faturamento em relação a 2020, e de 39% em relação a 2019 (ano anterior a pandemia) (Abinee, 2021). A área de informática registrou a maior taxa de incremento do setor (17%), enquanto a área de telecomunicações apresentou um crescimento nominal de 12% (Abinee, 2022). O relatório ainda aponta que esses resultados se devem ao aquecimento dos mercados de computadores e telefones celulares, devido ao home office e ao ensino a distância, como consequência do isolamento da pandemia de Covid-19.

A Figura 12 mostra as séries históricas e projeções de vendas de EEE no Brasil. Apesar de haver uma estabilidade ou até mesmo queda nas vendas por unidade de EEE, esse aumento no faturamento pode ser atribuído à escolha dos consumidores por produtos mais modernos e que custam mais caro. Nesse sentido, além dos

computadores (computador de mesa, notebook e tablet), destacam-se também os EEE com função smart (incluindo Smartphones e Smart TVs).

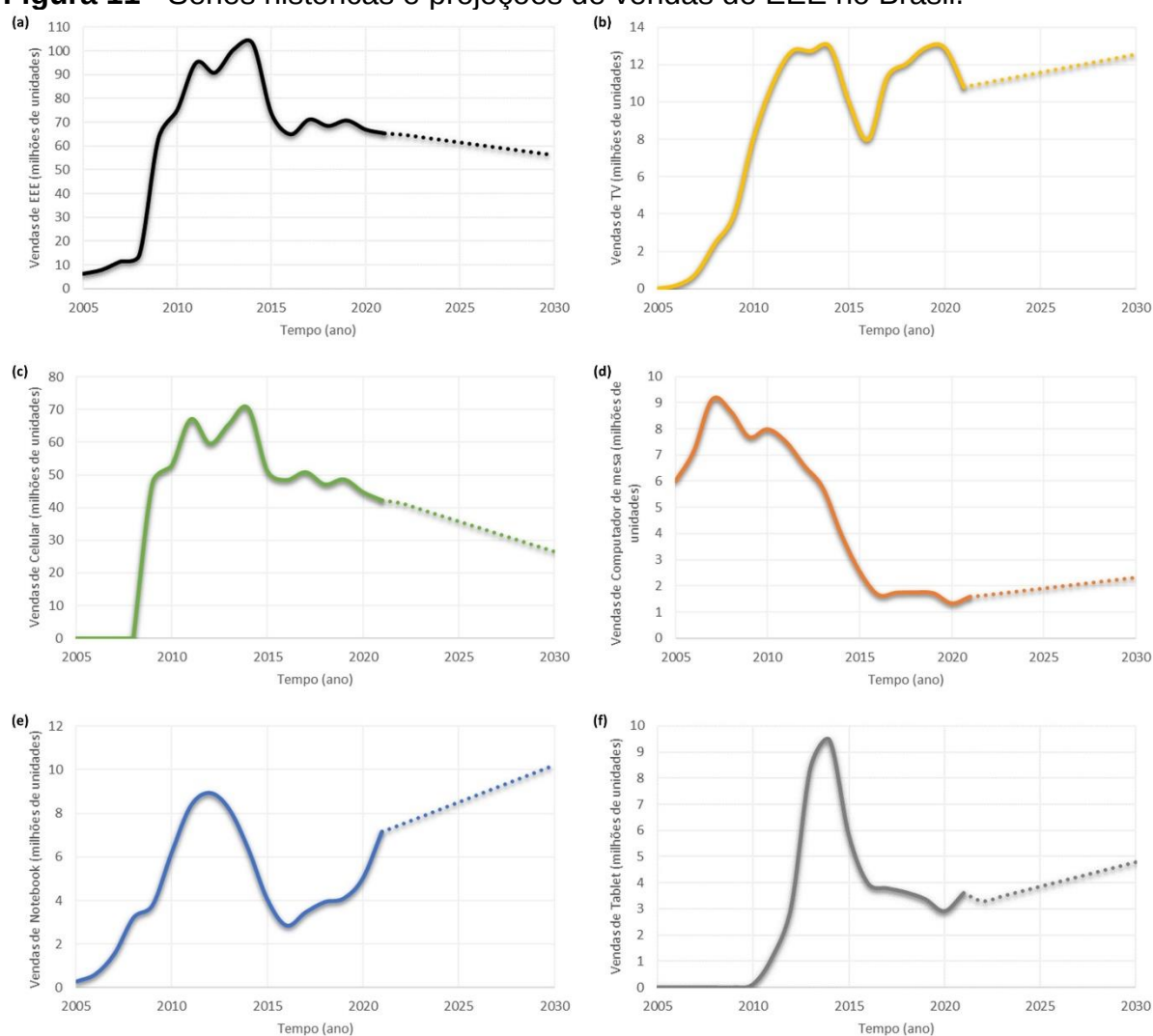
Com as restrições provocadas pelo lockdown, as pessoas passaram a ficar mais tempo em casa. Assim, o televisor deixou de ser exclusivamente um instrumento voltado à informação e entretenimento, passando a também ser utilizada como monitor para os trabalhos remotos. Ainda assim, as vendas de TVs, que estavam em crescente até 2020, apresentaram uma pequena queda em 2021 (Figura 12b). Entre os fatores que têm afetado a produção nacional de TVs, destacam-se a falta de insumos globais (principalmente de semicondutores) e o aumento nos custos de logística (Eletros, 2021). A projeção para os próximos anos é de um mercado estável, com aumento de vendas em datas importantes para o segmento, incluindo dia das mães, Black Friday e Natal. Segundo estudo da Growth for Knowledge, o crescimento da Black Friday no Brasil ocorreu em níveis superiores ao de países europeus, tornando a data sazonal como a mais importante para o setor de bens duráveis, que inclui equipamentos eletrônicos, de telefonia e informática (GFK, 2019).

O mercado oficial total de telefones celulares tem grande influência no mercado total de EEE, conforme semelhança nas curvas apresentadas nas Figuras 12c e 12a, respectivamente. Nos últimos anos, o mercado de telefones celulares (Figura 12c) está em queda, o que reflete na queda das vendas totais dos EEE avaliados neste estudo (Figura 12a). Esse declínio pode estar refletindo, principalmente, a queda nas vendas dos telefones celulares do tipo convencional, que estão sendo substituídos por smartphones. A Abinee (2022) destaca a preocupação com o aumento da participação do mercado não-oficial de smartphones em relação ao mercado total de telefones celulares entre 2018 e 2021, saindo de 2% para 8%. Porém, a dependência das novas tecnologias no campo profissional e para o entretenimento, bem como a necessidade de rapidez na comunicação, farão com que os smartphones mantenham o mercado de celulares estável.

Em consequência das medidas de isolamento social pela pandemia de Covid-19, onde houve uma migração das atividades presenciais para o ambiente digital, foi registrado um aumento no número de computadores colocados no mercado (POM) brasileiro (ver Figura 6.2d-6.2f). De acordo com a Abinee (2022), as vendas de computadores somaram mais de 12 milhões de unidades em 2021, o que representa um aumento

de 32% em relação ao ano anterior. Com a continuidade do home office e do ensino a distância, entre 2020 e 2021, ocorreu um aumento no mercado de notebooks ($\uparrow 50\%$) e tablets ($\uparrow 24\%$), enquanto as vendas de desktops caíram 3% (Abinee, 2022). Quanto às projeções de venda, a curto prazo, espera-se que o mercado de computadores continue crescendo para atender as necessidade de home office, do ensino à distância, assim como das compras governamentais. Segundo NIC (2022), a preferência dos usuários e a funcionalidade oferecida por cada tipo de computador são fatores que afetam o mercado de computadores no Brasil. Assim, as mudanças tecnológicas nos notebooks e tablets não têm afetado o mercado de computadores.

Figura 11 - Séries históricas e projeções de vendas de EEE no Brasil.



Nota: A parte tracejada das curvas representa a projeção da série de vendas.

Estimativa de geração de REEE/PCI e estoque de EEE

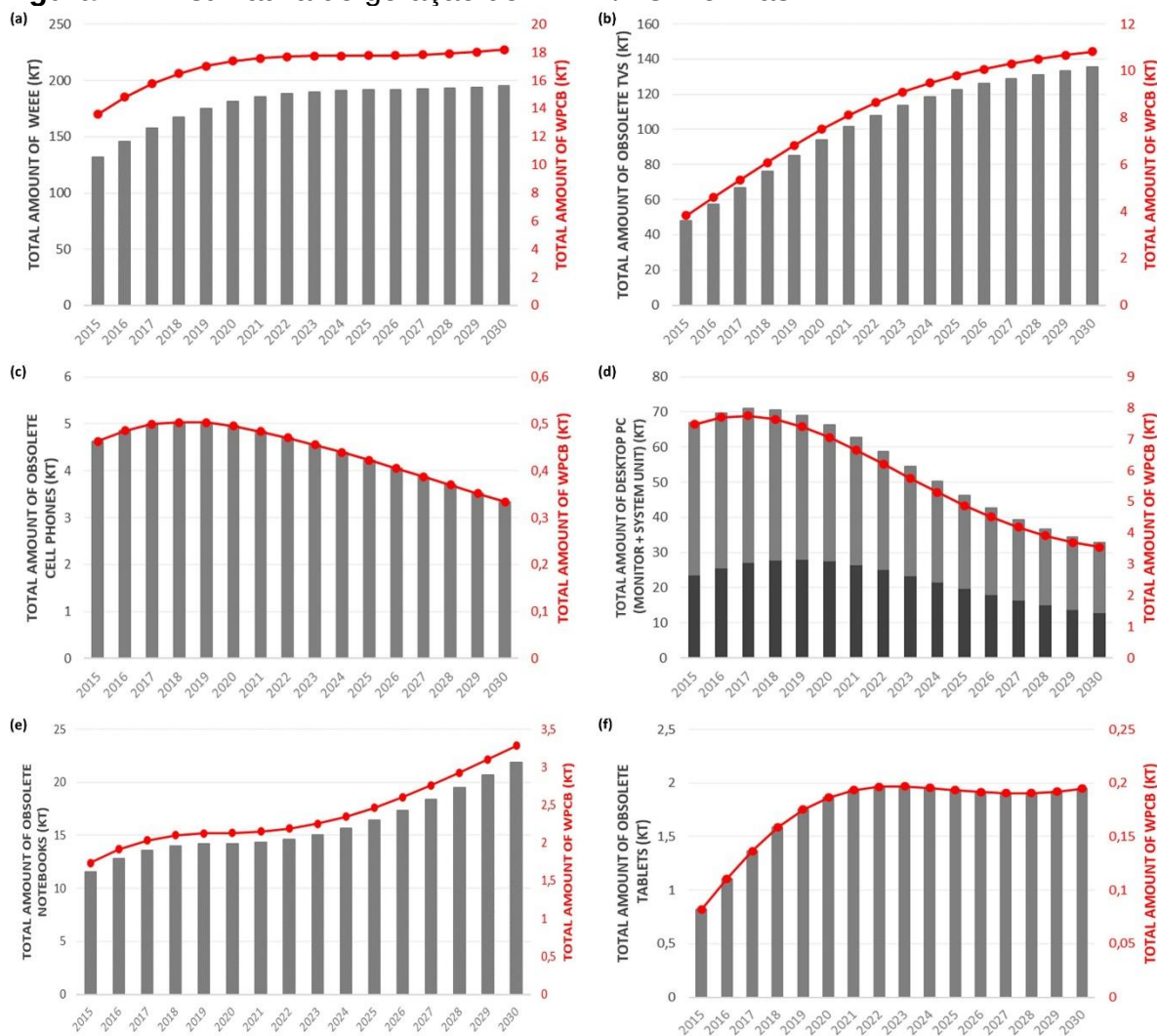
A partir da Equação 6.1, a geração de WEEE foi estimada para cinco tipos de EEE (computador de mesa, notebook, tablet, celular e televisor LCD), para os anos de 2015-2030, conforme Figura 13. O modelo de estimativa aplicado neste estudo mostra que a geração total de REEE no Brasil, entre 2015 e 2030, aumentará 48%, saindo de 131,87 kt (equivalente a 1,94 kg/domicílio/ano ou 0,65 kg/hab/ano) para 195,22 kt (equivalente a 2,23 kg/domicílio/ano ou 0,87 kg/hab/ano). Para o ano de 2022, a geração de WEEE estimada é de 188 kt (Figura 13a), o que equivale a 2,46 kg/dom/ano ou 0,88 kg/hab/ano. A geração anual estimada para os resíduos de PCIs é de cerca de 9,6% da geração total dos REEE. No período de 2015-2030, a geração de resíduos de PCI estimada aumentará cerca de 34%, saindo de 13,6 kt para 18,2 kt (ver Figura 13a). Finalmente, a geração de resíduos de PCI estimada para o ano de 2022 foi de 17,7 kt.

Quando avaliamos a contribuição em massa de cada tipo de EEE na massa total de WEEE, tem-se a seguinte ordem decrescente: TV LCD > computador de mesa > notebook > celular > tablet (Figura 14a). No período de 2015 a 2030, estima-se uma variação na participação desses equipamentos na geração anual de REEE, com uma evolução na participação dos televisores LCD (passando de 36% para 69%) e de notebooks (passando de 9% para 11%), em relação à massa total de REEE. Também estima-se que haja uma diminuição na contribuição dos computadores de mesa (passando de 51% para 17%) e de celulares (passando de 3,5% para 1,7%), em relação à massa total de REEE. No mesmo período, a contribuição dos tablets na massa total de REEE é sempre inferior a 1%.

Avaliando a geração de REEE em termos da média anual de unidades de EEE descartados, tem-se a seguinte ordem decrescente de contribuição: celular > TV LCD > notebook > computador de mesa > tablet (Figura 14b). Embora o telefone celular não tenha uma contribuição tão significativa na massa total de REEE (em média 2%), o dispositivo ainda é o EEE encontrado em maior quantidade no fluxo deste tipo de resíduo do Brasil, conforme constatado também por Franco e Lange (2011), Rodrigues et al. (2015), Araujo et al. (2017), Oliveira Neto et al. (2021). O modelo estimou aumento da geração de celulares, entre 2015 (46 milhões de unidades) e 2018 (50 milhões de unidades), com tendência de redução nos anos seguintes. Com relação aos demais EEE, ao longo do período de 2015-2030, há uma

aumento na quantidade de EEE descartados para TV LCD (passando de 3,9 para 11,3 milhões de unidades), notebook (passando de 3,9 para 7,5 milhões de unidades) e tablets (passando de 1,6 para 3,9 milhões de unidades). No mesmo período, estima-se uma queda na quantidade de computadores de mesa descartados (passando de 4,7 para 2,3 milhões de unidades).

Figura 12 - Estimativa de geração de REEE/PCI no Brasil.



O método aplicado também permitiu estimar o estoque de EEE nos domicílios brasileiros, entre 2015 e 2030 (através da Equação 6.3), o qual passará de aproximadamente 648 milhões para 1,6 bilhão de unidades de EEE (Figura 15). Para o período avaliado, estima-se um aumento de 95% no estoque de EEE por domicílio, de 9,54 EEE/domicílio para 18,65 EEE/domicílio. Ao longo do período avaliado, as estimativas mostram um aumento nos estoques de celular (passando de 5,4 para 11 EEE/domicílio), TV LCD (passando de 1,04 para 2,71 EEE/domicílio), notebook

(passando de 0,69 para 1,71 EEE/domicílio) e tablet (passando de 0,39 para 0,93 EEE/domicílio). Estas projeções mostram que os estoques de TV LCD, notebook e tablet nos domicílios brasileiros irão triplicar até 2030. No mesmo período, o estoque de celular nos domicílios irá duplicar. Por sua vez, o estoque por domicílio para computadores de mesa permanece no mesmo patamar (1 EEE/domicílio), no período estudado.

No Brasil, as pesquisas mostram que as principais formas de destinação dos WEEE são a doação, o armazenamento em casa ou a venda (Franco e Lange 2011; Rodrigues et al., 2015; Araujo et al., 2017; Oliveira Neto et al., 2021). Desse modo, resultados de estimativa para o estoque dos EEE que um dia se tornarão resíduos podem auxiliar nas políticas para sua gestão, considerando o descarte adequado, o refurbishment e a reciclagem/tratamento, favorecendo a circularidade dos materiais.

Figura 13 - Evolução dos REEE gerados no Brasil em termos de: (a) peso dos EEE; (b) quantidade de EEE descartados.

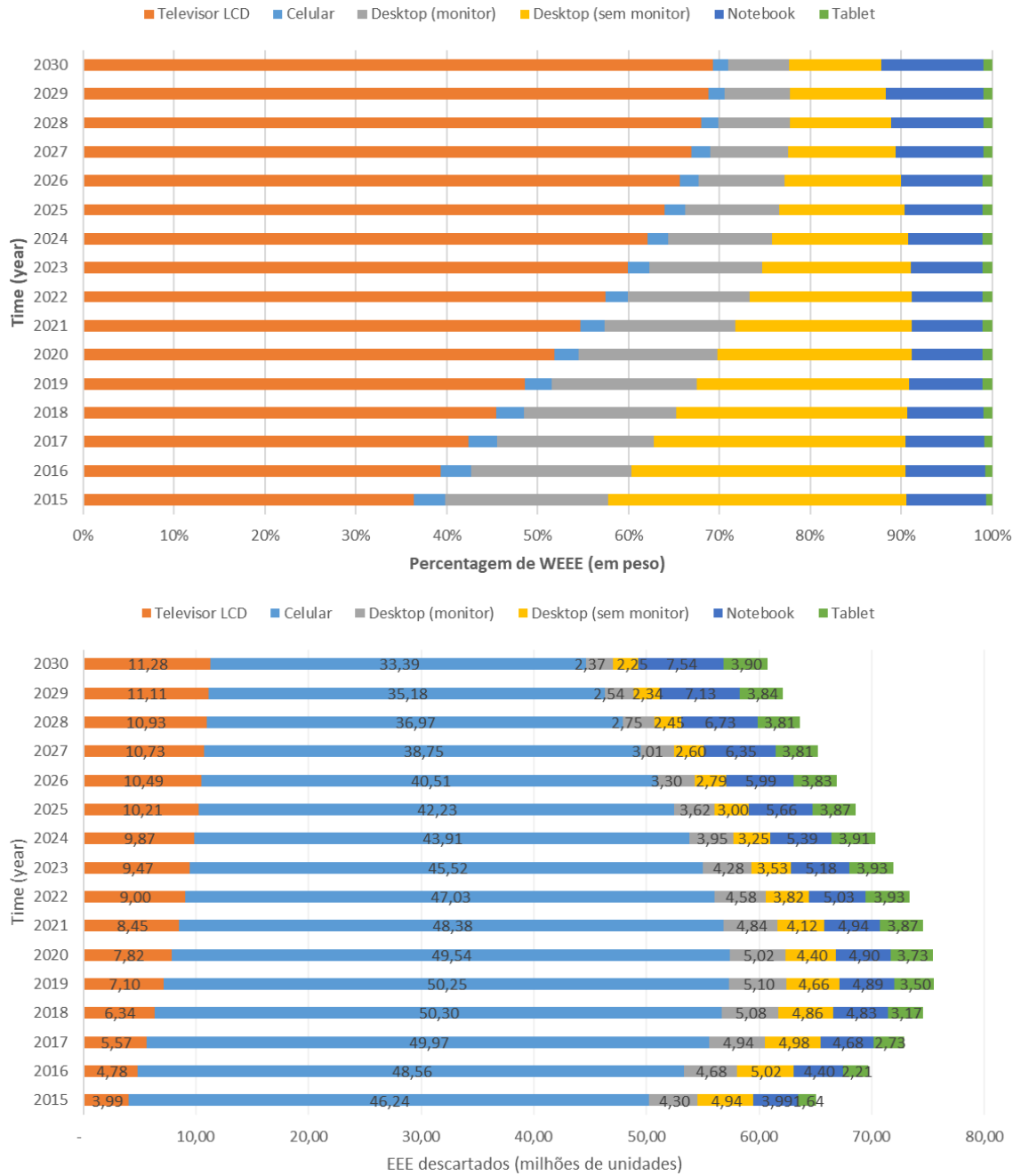
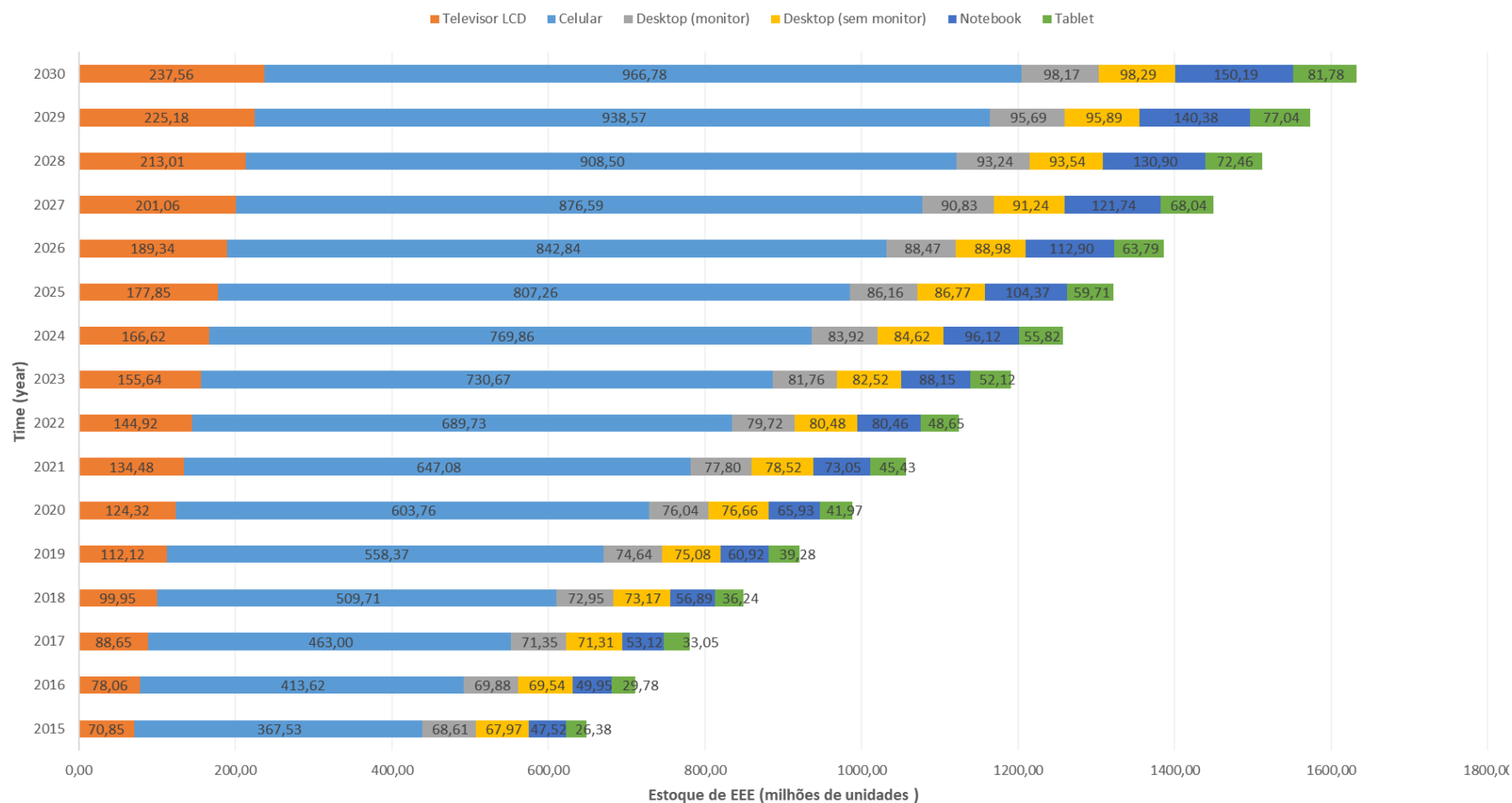


Figura 14- Evolução temporal dos estoques de EEE no Brasil.



Mineração urbana e potencial de recursos secundários provenientes dos REEE no Brasil: do risco ao benefício

Neste estudo, a quantidade de resíduos de PCI gerados no período avaliado (2015-2030) pode ser traduzida na forma de recursos secundários disponíveis para recuperação (urban mining), de acordo com composição dos EEE, mostrada na Tabela 6.1. A Figura 16 mostra a quantidade de recursos disponíveis ao longo do tempo para metais básicos (Fe, Cu, Al, Sn, Zn), metais preciosos (Ag, Au, Pd), metal de terras raras (Bi) e metais pesados (Cd, As, Be, Cr, Ni, Pb, Sb, Cl e Br).

De modo geral, estima-se um aumento de aproximadamente 33% (de 5,1 kt para 6,7 kt) no potencial de aproveitamento de matéria-prima secundária, no período 2015-2030 (Figura 16). Os metais básicos correspondem a mais de 90% dos metais recuperáveis, ao longo do período avaliado. A participação de cada metal básico na massa total de WEEE é a seguinte: cobre (média anual - 49,9% ou 3,14 kt), alumínio (média anual - 17,3% ou 1,14 kt), ferro (média anual - 12,9% ou 0,82 kt), estanho (média anual - 7,9% ou 0,50 kt) e zinco (média anual - 3,6% ou 0,20 kt). A TV LCD destaca-se como EEE de maior potencial como fonte secundária de alumínio, ferro e zinco. O monitor de desktop PC também se destaca como EEE de maior potencial como fonte secundária de alumínio e ferro. The desktop PC system unit destaca-se como EEE de maior potencial como fonte secundária de estanho.

Os metais preciosos são encontrados em quantidade menores, quando comparados aos metais básicos, como a seguir: a prata (média anual - 0,3% ou 16,28 t), o ouro (média anual - 0,1% ou 4,18 t) e o paládio (média anual - 0,01% ou 0,92 t). Como potenciais fontes secundárias de prata e paládio, destacam-se as TVs LCD e o “desktop PC system unit”. O notebook destaca-se como potencial fonte secundária de ouro, seguido das TVs LCD e dos celulares.

No fluxo anual de metais pesados, tem-se os seguintes materiais: chumbo (média anual - 3,6% ou 228,41 t), níquel (média anual - 1,7% ou 107,46 t) e bromo (média anual - 1,5% ou 97,18 t). Os EEE em que os metais pesados estão mais presentes são as TVs LCD, the desktop PC system unit e os notebooks.

Para demonstrar os potenciais benefícios ambientais da mineração urbana, através da reciclagem dos metais presentes nos resíduos de PCI, foi utilizada como

base a metodologia apresentada em Grimes et al. (2008) para avaliar a demanda energética e a poupança em terajoules e pegada de carbono e poupança expressas em quilotoneladas de CO₂ (ver detalhes na seção de metodologia). Conforme Figura 17, entre 2015 e 2030, a reciclagem de alguns metais presentes nos resíduos de PCI tem o potencial de evitar um consumo energético total de aproximadamente 1575 TJ (ou 98 TJ por ano). Em termos de emissões de CO₂, a reciclagem desses metais tem o potencial de evitar que cerca de 148 kt de CO₂ equivalente (ou 9,3 kt por ano) sejam emitidos para a atmosfera. Esses valores são, respectivamente, equivalentes ao consumo de 37261 toneladas de diesel, assim como, as emissões de 23850 pessoas no Brasil.

Considerando que a mineração urbana tem potencial de ser mais rentável do que a mineração virgem, construiu-se um cenário em que alguns metais valiosos presentes nos resíduos de PCI são reciclados. O resultado da comercialização dos metais reciclados presentes nos resíduos de PCI, entre 2015 e 2030, seria uma receita de \$ 4.2 bilhões de dólares americanos (ou \$ 2,61 milhões de dólares americanos por ano), conforme Figura 18. Dentre esses metais, o ouro, recuperado dos notebooks, TVs LCD e celulares representaria uma receita total de \$ 3.17 bilhões de dólares americanos (ou \$ 198 milhões de dólares americanos por ano). A recuperação de paládio, através da reciclagem de desktop system unit, notebooks e TVs LCD, representaria uma receita total de \$ 521 milhões de dólares americanos (ou \$ 32.6 milhões de dólares americanos por ano). A recuperação do cobre, contido em TVs LCD, notebooks e desktop system unit representaria uma receita total de \$ 305 milhões de dólares americanos (ou \$ 19.1 milhões de dólares americanos por ano). A recuperação de prata, através da reciclagem das TVs LCD, the desktop system unit, notebooks e celular, representaria uma receita total de \$ 125 milhões de dólares americanos (ou \$ 7.8 milhões de dólares americanos por ano).

Figura 15 - Potencial de recursos secundários disponíveis para reciclagem de lixo eletrônico no Brasil.

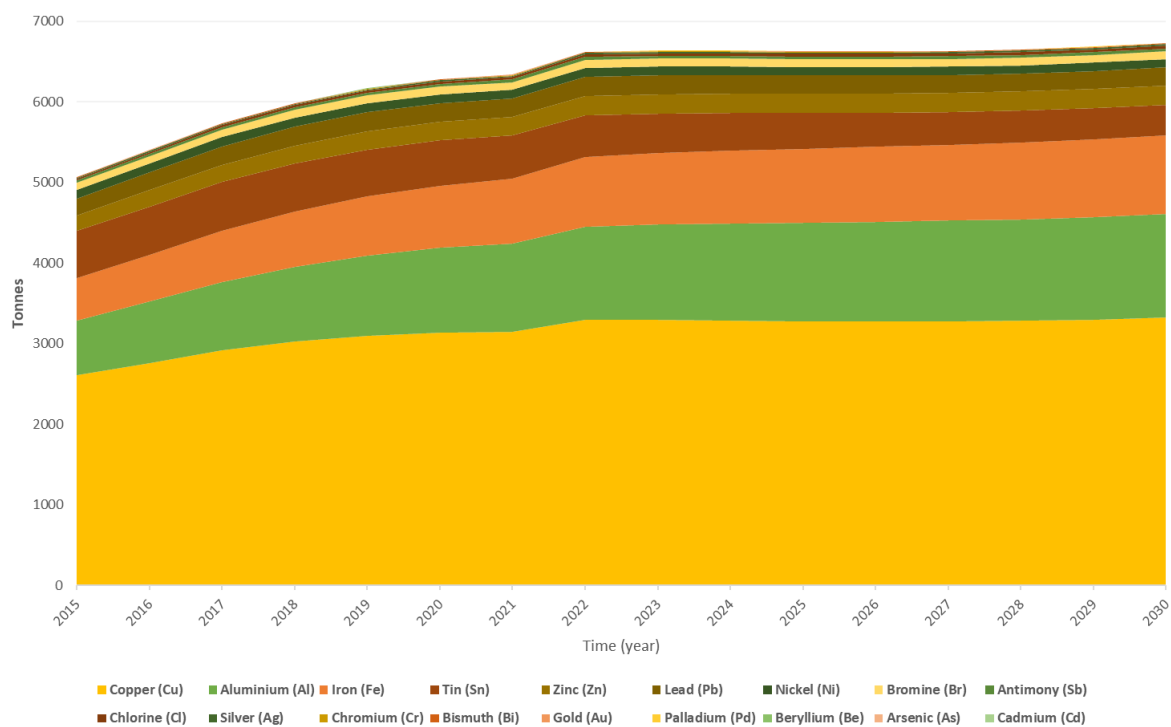


Figura 16 - Economia estimada em emissões anuais de CO₂ (kt) e energia (TJ) provenientes da reciclagem de metais disponíveis em REEE.

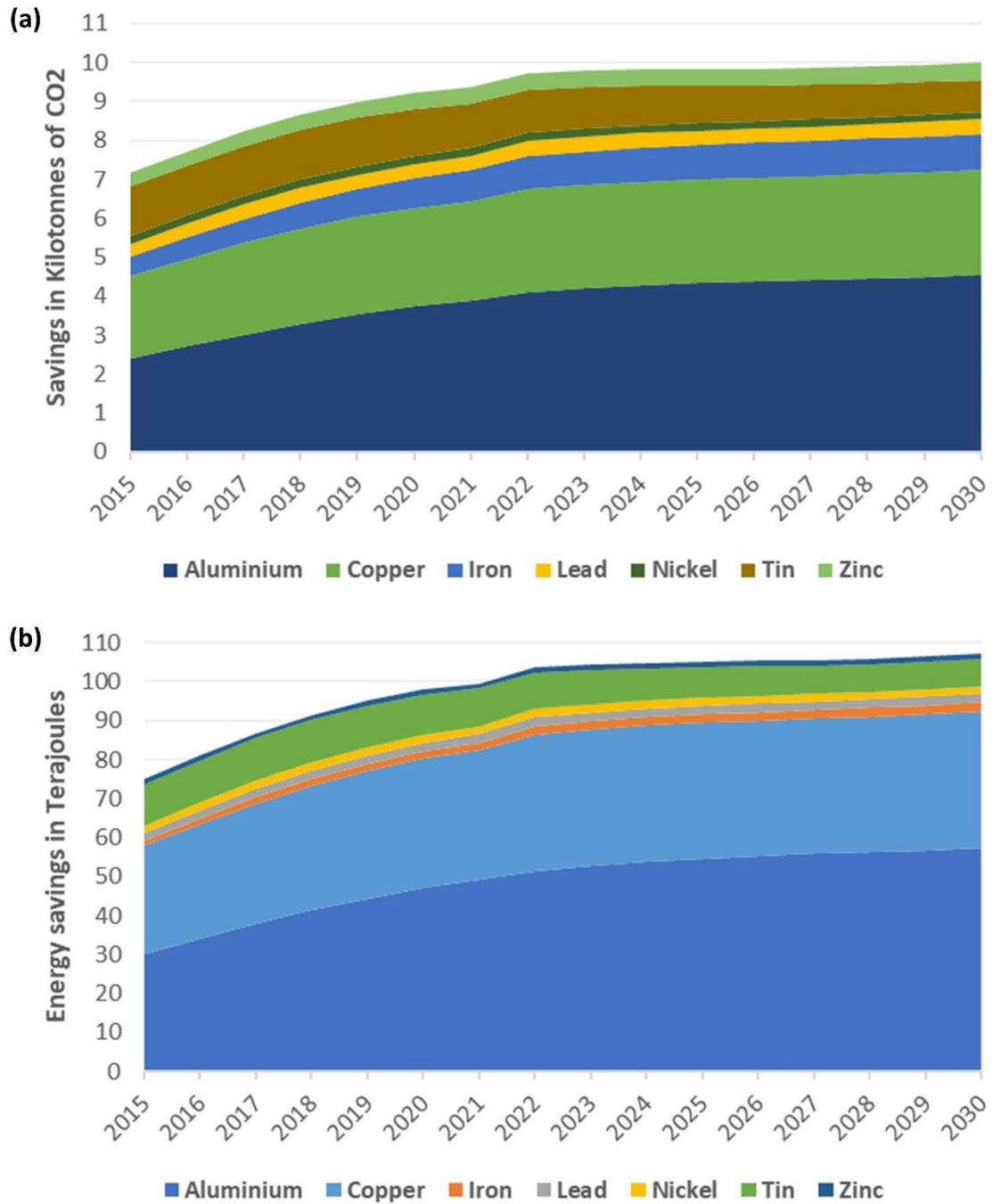
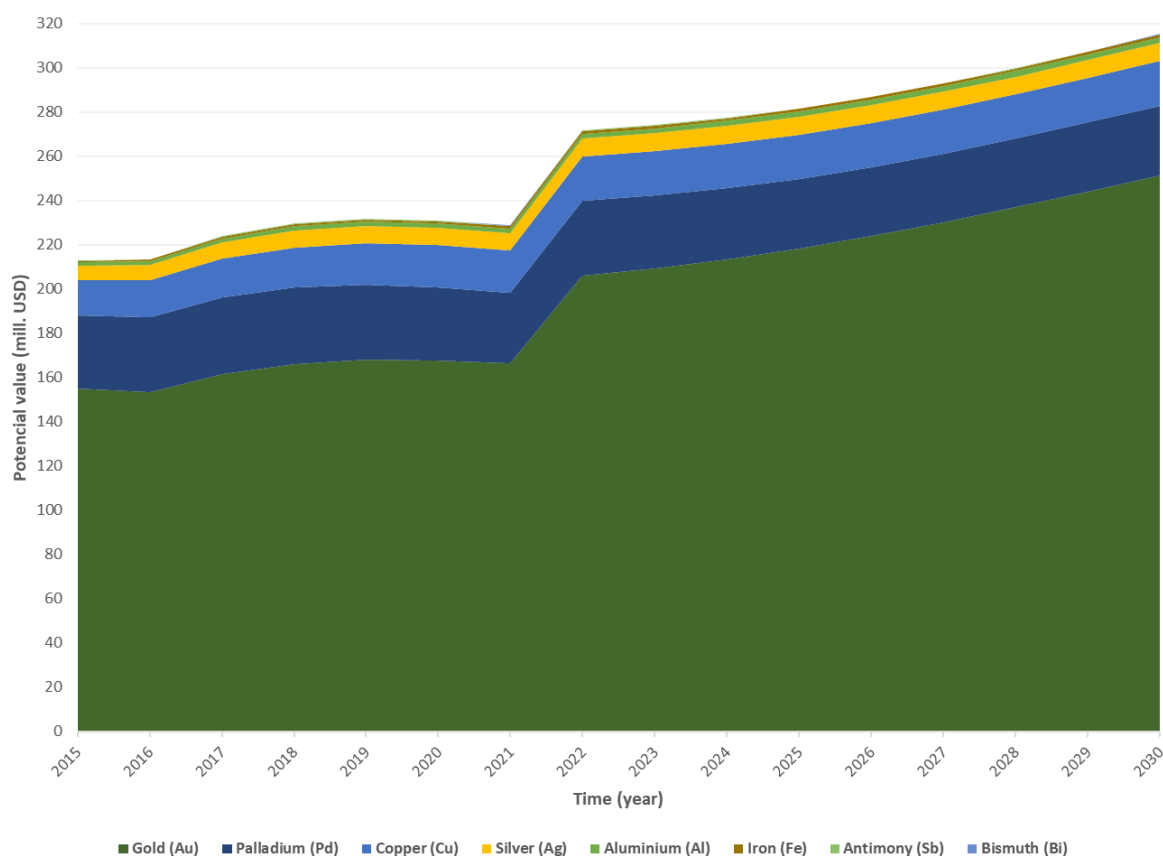


Figura 17 - Valor potencial de recursos secundários disponíveis para reciclagem de lixo eletrônico no Brasil.



CONSIDERAÇÕES FINAIS, LIMITAÇÕES E PESQUISAS FUTURAS

Este estudo apresentou uma estimativa do potencial de mineração urbana da fração metálica dos resíduos de PCIs contidas em alguns EEE colocados no mercado Brasileiro, por meio de análise de séries temporais.

No período de 2015-2030, a recuperação de alguns metais, presentes nos resíduos das PCIs analisadas, resultaria em uma receita acumulada que poderia atingir o valor de aproximadamente 4,2 bilhões de dólares americanos (ou \$ 2,61 milhões de dólares americanos anual). Com relação ao retorno financeiro da recuperação da fração metálica, os materiais mais rentáveis são ouro (\$ 198 milhões de dólares americanos anual), paládio (\$ 32.6 milhões de dólares americanos anual), cobre (\$ 19.1 milhões de dólares americanos anual) and prata (\$ 7.8 milhões de dólares americanos anual) são as mais rentáveis. Entre os EEE avaliados, as principais fontes secundárias desses metais são os notebooks, as TVs LCD, os celulares and the desktop PC system unit.

Adicionalmente, com relação aos benefícios ambientais, os resultados revelaram que as poupanças de emissões de CO₂ e de energia obtidas através da reciclagem, em comparação com a produção primária, foram de cerca de 148 kt (ou 9,3 kt anualmente) and 1575 TJ (ou 98 TJ anualmente), respectivamente, para sete metais (alumínio, cobre, ferro, chumbo, níquel, estanho e zinco).

Apesar deste estudo apresentar um panorama abrangente sobre os EEE colocados no mercado brasileiro e a geração anual de REEE/PCI, seus riscos e potenciais benefícios ambientais e econômicos, é preciso reconhecer algumas limitações e incertezas nas análises. A primeira limitação foi o número de EEE incluídos neste estudo, onde considerou-se apenas cinco tipos de EEE (que continham PCI em sua composição), deixando-se de fora outros EEE disponíveis no mercado brasileiro. Para minimização deste problema, os EEE escolhidos foram os mais vendidos no mercado brasileiro, mesmo em meio à pandemia de COVID-19.

A segunda limitação está relacionada à qualidade dos dados. Estudos de estimativa de geração de WEEE baseados em Weibull distribution conduzidos em vários países frequentemente usam vendas em nível nacional, produção e importação e exportação de dados compilados e harmonizados pelo departamento de estatística nacional. Nesse estudo foram utilizados dados de vendas (com importação) de duas instituições federais (Abinee e Eletros). A criação de um banco de dados harmonizado pelo governo e outras partes interessadas poderá melhorar a qualidade de futuras estimativas de geração de WEEE.

Adicionalmente, a vida útil de um EEE é um dos parâmetros mais significativos para estimativa de geração e análise de fluxo material. Um ponto positivo deste estudo foi considerar a natureza dinâmica da vida útil dos EEE, através da função de distribuição de probabilidade Weibull; no entanto, foram considerados os parâmetros α e β para países fora da União Europeia. Dessa forma, sugere-se que estudos futuros possam avaliar valores para os parâmetros α e β que sejam mais adequados à realidade dos EEE colocados no mercado brasileiro.

REFERÊNCIAS

- Abbondanza, M.N.M., Souza, R.G., 2019. Estimating the generation of household e-waste in municipalities using primary data from surveys: A case study of Sao Jose dos Campos, Brazil. *Waste Manag.* 85, 374–384. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.12.040>
- Abdelbasir, S.M., Hassan, S.S.M., Kamel, A.H., El-nasr, R.S., 2018. Status of electronic waste recycling techniques: a review. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 25, 16533–16547.
- ABRELPE - Associação Brasileira das Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais, 2021. Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2021. 19. ed. São Paulo: Associação Brasileira das Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais, 2021. E-book. Available at: <https://abrelpe.org.br/panorama-2021/> (accessed on 15 june 2022).
- Albuquerque, C.A., Mello, C.H.P., Gomes, J.H. de F., Santos, V.C., Zara, J.V., 2020. E-waste in the world today: An overview of problems and a proposal for improvement in Brazil. *Environ. Qual. Manag.* 29, 63–72. <https://doi.org/10.1002/tqem.21682>
- Alves, R., Ferreira, K.L.A., Lima, R.S., Moraes, F.T.F., 2021. An Action Research Study for Elaborating and Implementing an Electronic Waste Collection Program in Brazil. *Syst. Pract. Action Res.* 34, 91–108. <https://doi.org/10.1007/s11213-019-09509-5>
- Amphalop, N., Suwantararat, N., Prueksasit, T., Yachusri, C., Srithongouthai, S., 2020. Ecological risk assessment of arsenic, cadmium, copper, and lead contamination in soil in e-waste separating household area, Buriram province, Thailand. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 27, 44396–44411. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-10325-x>
- Araujo, D.R.R., de Oliveira, J.D., Selva, V.F., Silva, M.M., Santos, S.M., 2017. Generation of domestic waste electrical and electronic equipment on Fernando de Noronha Island: qualitative and quantitative aspects. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 24, 19703–19713. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-9648-3>

Araújo, M.G., Magrini, A., Mahler, C.F., Bilitewski, B., 2012. A model for estimation of potential generation of waste electrical and electronic equipment in Brazil. *Waste Manag.* 32, 335–342. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.09.020>

Ardi, R., Leisten, R., 2016. Assessing the role of informal sector in WEEE management systems: A System Dynamics approach. *Waste Manag.* 57, 3–16. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.11.038>

Awasthi, A.K., Li, J., 2017. An overview of the potential of eco-friendly hybrid strategy for metal recycling from WEEE. *Resour. Conserv. Recycl.* 126, 228–239. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.07.014>

Awasthi, A.K., Zeng, X., Li, J., 2016a. Environmental pollution of electronic waste recycling in India: A critical review. *Environ. Pollut.* 211, 259–270. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2015.11.027>

Awasthi, A.K., Zeng, X., Li, J., 2016b. Integrated bioleaching of copper metal from waste printed circuit board—a comprehensive review of approaches and challenges. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 23, 21141–21156. <https://doi.org/10.1007/s11356-016-7529-9>

Azevedo, L.P., da Silva Araújo, F.G., Lagarinhos, C.A.F., Tenório, J.A.S., Espinosa, D.C.R., 2017. E-waste management and sustainability: a case study in Brazil. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 24, 25221–25232. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-0099-7>

Babbitt, C., Althaf, S., and Chen, R., 2017. Sustainable materials management for the evolving consumer technology ecosystem. Summary report of phase, 1.

Baldé C.P., Kuehr R., 2021. Impact of the COVID-19 Pandemic on E-waste in the First Three Quarters of 2020. United Nations University (UNU)/United Nations Institute for Training and Research (UNITAR) – co-hosting the SCYCLE Programme, Bonn (Germany).

Baldé, C. P., Forti, V., Gray, V., Kuehr, R., Stegmann, P., 2017. The Global E-waste Monitor – 2017, United Nations University (UNU), International Telecommunication Union (ITU) & International Solid Waste Association (ISWA), Bonn/Geneva/Vienna.

Baldé, C.P., Wang, F., Kuehr, R., and Huisman, J., 2015. The global e-waste monitor–2014, United Nations University, IAS–SCYCLE, Bonn, Germany. ISBN Print, 978-92.

Baniasadi, M., Graves, J.E., Ray, D.A., De Silva, A.L., Renshaw, D., Farnaud, S., 2021. Closed-Loop Recycling of Copper from Waste Printed Circuit Boards Using Bioleaching and Electrowinning Processes. WASTE AND BIOMASS VALORIZATION 12, 3125–3136. <https://doi.org/10.1007/s12649-020-01128-9>

Barba-Gutiérrez, Y., Adenso-Díaz, B., Hopp, M., 2008. An analysis of some environmental consequences of European electrical and electronic waste regulation. Resour. Conserv. Recycl. 52, 481–495. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2007.06.002>

Brasil, 2010. Lei na 12.305, de 2 de agosto de 2010. Diário Of. da União 2. Available at: <https://doi.org/10.1007/s13398-014-0173-7.2> (accessed 21 september 2022).

Brasil, 2019. ACORDO SETORIAL PARA IMPLANTAÇÃO DE SISTEMA DE LOGÍSTICA REVERSA DE PRODUTOS ELETROELETRÔNICOS DE USO DOMÉSTICO E SEUS COMPONENTES. Ministério do Meio Ambiente. Available at: [https://www.mma.gov.br/images/Acordo Setorial/Acordo Setorial - Eletroeletrônicos.pdf](https://www.mma.gov.br/images/Acordo%20Setorial/Acordo%20Setorial%20Eletroeletr%C3%B4nicos.pdf) (accessed 21 september 2022).

Brasil, 2020. DECRETO No 10.240, DE 12 DE FEVEREIRO DE 2020 - Regulamenta o inciso VI do caput do art. 33 e o art. 56 da Lei no 12.305, de 2 de agosto de 2010, e complementa o Decreto no 9.177, de 23 de outubro de 2017, quanto à implementação de sistema de logística reversa.

Brasil, 2021. Fundo Nacional de Desenvolvimento da Educação. Disponível em: < <https://www.fnnde.gov.br/index.php/programas/proinfo/eixos-de-atuacao/tablets> > (accessed on 10 october 2022).

Campolina, J.M., São Leandro Sigrist, C., Faulstich de Paiva, J.M., Oliveira Nunes, A., da Silva Moris, V.A., 2017. A study on the environmental aspects of WEEE plastic recycling in a Brazilian company. Int. J. Life Cycle Assess. 22, 1957–1968. <https://doi.org/10.1007/s11367-017-1282-2>

- Cayumil, R., Khanna, R., Rajarao, R., Mukherjee, P.S., Sahajwalla, V., 2016. Concentration of precious metals during their recovery from electronic waste. *Waste Manag.* 57, 121–130. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.12.004>
- Cenci, M.P., Dal Berto, F.C., Castillo, B.W., Veit, H.M., 2022. Precious and critical metals from wasted LED lamps: characterization and evaluation. *Environ. Technol.* 43, 1870–1881. <https://doi.org/10.1080/09593330.2020.1856939>
- Cesaro, A., Marra, A., Kuchta, K., Belgiorno, V., Van Hullebusch, E.D., 2018. WEEE management in a circular economy perspective: An overview. *Glob. Nest J.* 20, 743–750. <https://doi.org/10.30955/GNJ.002623>
- CETIC, 2021. TIC Domicílios 2021: Pesquisa sobre o uso das tecnologias de informação e comunicação nos domicílios brasileiros. Available at: <https://cetic.br/pt/pesquisa/domicilios/> (accessed on 10 october 2022).
- Chakraborty, P., Selvaraj, S., Nakamura, M., Prithiviraj, B., Cincinelli, A., Bang, J.J., 2018. PCBs and PCDD/Fs in soil from informal e-waste recycling sites and open dumpsites in India: Levels, congener profiles and health risk assessment. *Sci. Total Environ.* 621, 930–938. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.11.083>
- Chancerel, P., Meskers, C., Hagelüken, C., R., V., 2009. Assessment of Precious Metal Flows During Preprocessing of Waste Electrical and Electronic Equipment. *J. Ind. Ecol.* 13, 791–810.
- Charles, R.G.R.G.R.G., Douglas, P., Dowling, M., Liversage, G., Davies, M.L.M.L., 2020. Towards Increased Recovery of Critical Raw Materials from WEEE– evaluation of CRMs at a component level and pre-processing methods for interface optimisation with recovery processes. *Resour. Conserv. Recycl.* 161, 104923. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104923>
- Chi, X., Streicher-Porte, M., Wang, M.Y.L., Reuter, M.A., 2011. Informal electronic waste recycling: A sector review with special focus on China. *Waste Manag.* 31, 731–742. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2010.11.006>

Cucchiella, F., D'Adamo, I., Lenny Koh, S.C., Rosa, P., 2015. Recycling of WEEEs: An economic assessment of present and future e-waste streams. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 51, 263–272. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.06.010>

Cucchiella, F., D'Adamo, I., Lenny Koh, S.C., Rosa, P., 2016. A profitability assessment of European recycling processes treating printed circuit boards from waste electrical and electronic equipments. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 64, 749–760. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.06.057>

Demajorovic, J., Augusto, E.E.F., Souza, M.T.S., 2016. Reverse Logistics of E-Waste in Developing Countries: Challenges and Prospects for the Brazilian Model. *Ambient. Soc.* 19, 117–136. <https://doi.org/10.1590/1809-4422ASOC141545V1922016>

Dias, P., Machado, A., Huda, N., Bernardes, A.M., 2018. Waste electric and electronic equipment (WEEE) management: A study on the Brazilian recycling routes. *J. Clean. Prod.* 174, 7–16. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.219>

Dias, P.R., Cenci, M.P., Bernardes, A.M., Huda, N., 2022. What drives WEEE recycling? A comparative study concerning legislation, collection and recycling. *Waste Manag. Res. J. a Sustain. Circ. Econ.* 40, 1527–1538. <https://doi.org/10.1177/0734242X221081660>

Duan, H., Hou, K., Li, J., Zhu, X., 2011. Examining the technology acceptance for dismantling of waste printed circuit boards in light of recycling and environmental concerns. *J. Environ. Manage.* 92, 392–399. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2010.10.057>

Eletros, 2021. O setor eletroeletrônico e o 2^a semestre. Available at: <https://eletros.org.br/conectados-6a-edicao-2021/> (accessed on 15 october 2022).

Eletros, 2022. Alta do dólar produção dos eletrodomésticos e eletrônicos no país. Available at: <https://eletros.org.br/alta-do-dolar-producao-dos-eletronicos-no-pais/> (accessed on 06 december 2022).

Estrada-Ruiz, R.H., Flores-Campos, R., Gámez-Altamirano, H.A., Velarde-Sánchez, E.J., 2016. Separation of the metallic and non-metallic fraction from printed circuit

boards employing green technology. *J. Hazard. Mater.* 311, 91–99. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2016.02.061>

Forti, V., Baldé, C.P., Kuehr, R., 2018. *E-waste Statistics: Guidelines on Classifications, Reporting and Indicators*, second edition. United Nations University, ViE – SCYCLE, Bonn, Germany.

Forti, V., Baldé, C.P., Kuehr, R., Be, G., 2020. *The Global E-waste Monitor 2020 - Quantities, flows, and circular economy potencial*. United Nations University (UNU)/United Nations Institute for Training and Research (UNITAR) – co-hosted SCYCLE Programme, International Telecommunication Union (ITU) & International Solid Waste Association (ISWA), Bonn/Geneva/Rotterdam.

Franco, R.G.F., Lange, L.C., 2011. Estimativa fluxo REEE em BH. *Eng. Sanit. e Ambient.* 16, 73–82. <https://doi.org/10.1590/S1413-41522011000100011>

GfK, 2019. Crescimento deverá ser de apenas 4% em relação ao ano passado. Available at: <https://www.gfk.com/press/black-friday-devera-ser-morna-este-ano> (accessed on 15 october 2022).

Ghisolfi, V., Diniz Chaves, G.D.L., Ribeiro Siman, R., Xavier, L.H., 2017. System dynamics applied to closed loop supply chains of desktops and laptops in Brazil: A perspective for social inclusion of waste pickers. *Waste Manag.* 60, 14–31. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.12.018>

Ghosh, B., Ghosh, M.K., Parhi, P., Mukherjee, P.S., Mishra, B.K., 2015. Waste Printed Circuit Boards recycling: an extensive assessment of current status. *J. Clean. Prod.* 94, 5–19. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.02.024>

Golev, A., Schmeda-Lopez, D.R., Smart, S.K., Corder, G.D., McFarland, E.W., 2016. Where next on e-waste in Australia? *Waste Manag.* 58, 348–358. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.09.025>

Grimes, S., Donaldson, J., Gomez, G. C., 2008. Report on the environmental benefits of recycling. Commissioned by the Bureau of International Recycling.

Gwenzi, W., Mangori, L., Danha, C., Chaukura, N., Dunjana, N., Sanganyado, E., 2018. Science of the Total Environment Sources, behaviour, and environmental and human health risks of high- technology rare earth elements as emerging contaminants. *Sci. Total Environ.* 636, 299–313.

Hadi, P., Gao, P., Barford, J.P., McKay, G., 2013. Novel application of the nonmetallic fraction of the recycled printed circuit boards as a toxic heavy metal adsorbent. *J. Hazard. Mater.* 252–253, 166–170. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2013.02.037>

Hadi, P., Xu, M., Lin, C.S.K., Hui, C.-W., McKay, G., 2015. Waste printed circuit board recycling techniques and product utilization. *J. Hazard. Mater.* 283, 234–243. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2014.09.032>

Hao, J., Wang, Y., Wu, Y., Guo, F., 2020. Metal recovery from waste printed circuit boards: A review for current status and perspectives. *Resour. Conserv. Recycl.* 157, 104787. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104787>

Heacock, M., Kelly, C.B., Suk, W.A., 2016. E-waste: the growing global problem and next steps. *Environ. Heal.* 1–5. <https://doi.org/10.1515/reveh-2015-0045>

IBGE, 2020. Acesso à Internet e à televisão e posse de telefone móvel celular para uso pessoal 2019. Available at: <https://biblioteca.ibge.gov.br/biblioteca-catalogo.html> (accessed on 10 october 2022).

IBGE, 2021. Acesso à Internet e à televisão e posse de telefone móvel celular para uso pessoal 2021. Available at: <https://biblioteca.ibge.gov.br/biblioteca-catalogo.html> (accessed on 10 october 2022).

Ikhlayel, M., 2016. Differences of methods to estimate generation of waste electrical and electronic equipment for developing countries: Jordan as a case study. *Resour. Conserv. Recycl.* 108, 134–139. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.01.015>

Ilankoon, I.M.S.K., Ghorbani, Y., Chong, M.N., Herath, G., Moyo, T., Petersen, J., 2018. E-waste in the international context – A review of trade flows, regulations, hazards, waste management strategies and technologies for value recovery. *Waste Manag.* 82, 258–275. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.10.018>

Işıldar, A., Rene, E.R.E.R.E.R., van Hullebusch, E.D.E.D., Lens, P.N.L.P.N.L.P.N.L.L., Isildar, A., Rene, E.R.E.R.E.R., van Hullebusch, E.D.E.D., Lens, P.N.L.P.N.L.P.N.L.L., 2018. Electronic waste as a secondary source of critical metals: Management and recovery technologies. *Resour. Conserv. Recycl.* 135, 296–312. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.07.031>

Islam, A., Ahmed, T., Awual, M.R., Rahman, A., Sultana, M., Aziz, A.A., Monir, M.U., Teo, S.H., Hasan, M., 2020. Advances in sustainable approaches to recover metals from e-waste-A review. *J. Clean. Prod.* 244, 118815. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118815>

Islam, M.T., Huda, N., 2019. E-waste in Australia: Generation estimation and untapped material recovery and revenue potential. *J. Clean. Prod.* 237. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.117787>

Itai, T., Otsuka, M., Asante, K.A., Muto, M., Opoku-Ankomah, Y., Ansa-Asare, O.D., Tanabe, S., 2014. Variation and distribution of metals and metalloids in soil/ash mixtures from Agbogbloshe e-waste recycling site in Accra, Ghana. *Sci. Total Environ.* 470–471, 707–716. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.10.037>

Kasper, A.C., Berselli, G.B.T., Freitas, B.D., Tenório, J.A.S., Bernardes, A.M., Veit, H.M., 2011. Printed wiring boards for mobile phones: Characterization and recycling of copper. *Waste Manag.* 31, 2536–2545. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.08.013>

Kaya, M., 2016. Recovery of metals and nonmetals from electronic waste by physical and chemical recycling processes. *Waste Manag.* 57, 64–90. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.08.004>

Kaya, M., 2019. Electronic waste and printed circuit board recycling technologies. Chapter 2: Printed Circuit Boards (PCBs). Berlin, Germany: Springer.

Kazancoglu, Y., Ada, E., Ozturkoglu, Y., Ozbiltekin, M., Kazançoglu, Y., Ada, E., Ozturkoglu, Y., Ozbiltekin, M., 2020. Analysis of the barriers to urban mining for resource melioration in emerging economies. *Resour. Policy* 68, 101768. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2020.101768>

Koehler, A., Snyder, R., Ord, K., 2001. Forecasting Models and Prediction Intervals for the Multiplicative Holt-Winters Method. *International Journal of Forecasting*, v.17, n.2, p.269-286.

Kumar, A., Holuszko, M., Espinosa, D.C.R., 2017. E-waste: An overview on generation, collection, legislation and recycling practices. *Resour. Conserv. Recycl.* 122, 32–42. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.01.018>

LaDou, J., 2006. Printed circuit board industry. *Int. J. Hyg. Environ. Health* 209, 211–219. <https://doi.org/10.1016/j.ijheh.2006.02.001>

Li, B., Yang, J., Lu, B., Song, X., 2015. Estimation of retired mobile phones generation in China: A comparative study on methodology. *Waste Manag.* 35, 247–254. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2014.09.008>

Li, J., Zeng, X., Chen, M., Ogunseitan, O.A., Stevels, A., 2015. “Control-Alt-Delete”: Rebooting Solutions for the E-Waste Problem. *Environ. Sci. Technol.* 49, 7095–7108. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b00449>

Li, W., Achal, V., 2020. Environmental and health impacts due to e-waste disposal in China – A review. *Sci. Total Environ.* 737. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139745>

Lopes dos Santos, K., 2021. The recycling of e-waste in the Industrialised Global South: the case of Sao Paulo Macrometropolis. *Int. J. Urban Sustain. Dev.* 13, 56–69. <https://doi.org/10.1080/19463138.2020.1790373>

Makridakis, S., Wheelwright, S., Hyndman, R., 1998. *Forecasting Methods and Applications*. John Wiley & Sons. 3a Edição. New York.

Marra, A., Cesaro, A., Belgiorio, V., 2019. Recovery opportunities of valuable and critical elements from WEEE treatment residues by hydrometallurgical processes. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 26, 19897–19905. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-05406-5>

Martins, T.A.G., Falconi, I.B.A., Pavoski, G., de Moraes, V.T., Galluzzi Baltazar, M. dos P., Espinosa, D.C.R., 2021. Green synthesis, characterization, and application of

copper nanoparticles obtained from printed circuit boards to degrade mining surfactant by Fenton process. *J. Environ. Chem. Eng.* 9, 106576. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.106576>

Meirelles, F.D.S., 2021. Uso da TI-Tecnologia de Informação nas Empresas. Pesquisa Anual do FGVcia. FGV-EAESP: Centro de Tecnologia de Informação Aplicada. Available at: <https://eaesp.fgv.br/sites/eaesp.fgv.br/files/u68/fgvcia2021pesti-relatorio.pdf> (accessed on 06 december 2022).

Neto, J.C., Silva, M.M., Santos, S.M., 2016. A time series model for estimating the generation of lead acid battery scrap. *Clean Technol. Environ. Policy* 18, 1931–1943. <https://doi.org/10.1007/s10098-016-1121-3>

NIC, 2022. Computador, notebook, tablet ou smartphone: qual dispositivo é mais funcional?. Available at: <https://www.nic.br/noticia/na-midia/computador-notebook-tablet-ou-smartphone-qual-dispositivo-e-mais-funcional/> (accessed on 06 december 2022).

Oliveira Neto, G.C., de Jesus Cardoso Correia, A., Schroeder, A.M., 2017. Economic and environmental assessment of recycling and reuse of electronic waste: Multiple case studies in Brazil and Switzerland. *Resour. Conserv. Recycl.* 127, 42–55. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.08.011>

Oliveira Neto, J.F., Silva, M.M., Machado Santos, S., 2019. A Mini-Review of E-Waste Management in Brazil: Perspectives and Challenges. *Clean - Soil, Air, Water* 47, 1–10. <https://doi.org/10.1002/clen.201900152>

Oliveira, C.R. de, Bernardes, A.M., Gerbase, A.E., 2012. Collection and recycling of electronic scrap: A worldwide overview and comparison with the Brazilian situation. *Waste Manag.* 32, 1592–1610. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2012.04.003>

Ongondo, F.O., Williams, I.D., 2011. Mobile phone collection, reuse and recycling in the UK. *Waste Manag.* 31, 1307–1315. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.01.032>

Ongondo, F.O.O., Williams, I.D.D., Whitlock, G., 2015. Distinct Urban Mines: Exploiting secondary resources in unique anthropogenic spaces. *Waste Manag.* 45, 4–9. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.05.026>

Parajuly, K., Habib, K., Liu, G., 2017. Waste electrical and electronic equipment (WEEE) in Denmark: Flows, quantities and management. *Resour. Conserv. Recycl.* 123, 85–92. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.08.004>

Ping, Z., Liu, X., Tao, Q., Ma, Y., Wang, Y., Li, Z., Wang, J., Cao, Z., Hao, Y., Qian, G., 2019. Mechanism of Dissolving Tin Solders from Waste Printed Circuit Board Assemblies by Cyclic Fluoboric Acid Composite System. *Environ. Eng. Sci.* 36, 903–911. <https://doi.org/10.1089/ees.2018.0308>

Rankin, W.J., 2011. Minerals, metals and sustainability: meeting future material needs. CSIRO publishing.

Rodrigues, A.C., Gunther, W.M.R., Boscov, M.E.G., 2015. Estimativa da geração de resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos de origem domiciliar: proposição de método e aplicação ao município de São Paulo, São Paulo, Brasil. *Eng. Sanit. e Ambient.* 20, 437–447. <https://doi.org/10.1590/s1413-41522015020000133701>

Rubin, R.S., Castro, M.A.S. De, Brandão, D., Schalch, V., Ometto, A.R., 2014. Utilization of Life Cycle Assessment methodology to compare two strategies for recovery of copper from printed circuit board scrap. *J. Clean. Prod.* 64, 297–305. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.07.051>

Santos, S.M., Ogunseitan, O.A., 2022. E-waste management in Brazil: Challenges and opportunities of a reverse logistics model. *Environ. Technol. Innov.* 28, 102671. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2022.102671>

Satyro, W.C., Sacomano, J.B., Contador, J.C., Telles, R., 2018. Planned obsolescence or planned resource depletion? A sustainable approach. *J. Clean. Prod.* 195, 744–752. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.05.222>

Sethurajan, M., van Hullebusch, E.D., Fontana, D., Akcil, A., Deveci, H., Batinic, B., Leal, J.P., Gasche, T.A., Ali Kucuker, M., Kuchta, K., Neto, I.F.F., Soares, H.M.V.M., Chmielarz, A., 2019. Recent advances on hydrometallurgical recovery of critical and precious elements from end-of-life electronic wastes - a review. *Crit. Rev. Environ. Sci. Technol.* 49, 212–275. <https://doi.org/10.1080/10643389.2018.1540760>

Silva, W.C., de Souza Corrêa, R., da Silva, C.S.M., Afonso, J.C., da Silva, R.S., Vianna, C.A., Mantovano, J.L., 2018. Recovery of base metals, silicon and fluoride ions from mobile phone printed circuit boards after leaching with hydrogen fluoride and hydrogen peroxide mixtures. *Waste Manag.* 78, 781–788. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.06.049>

Souza, R.G., 2020. E-waste situation and current practices in Brazil, in: *Handbook of Electronic Waste Management*. Elsevier, pp. 377–396. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817030-4.00009-7>

Souza, R.G., Clímaco, J.C.N., Sant’Anna, A.P., Rocha, T.B., do Valle, R. de A.B., Quelhas, O.L.G., 2016. Sustainability assessment and prioritisation of e-waste management options in Brazil. *Waste Manag.* 57, 46–56. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.01.034>

Sthiannopkao, S., Wong, M.H., 2013. Handling e-waste in developed and developing countries: Initiatives, practices, and consequences. *Sci. Total Environ.* 463–464, 1147–1153. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.06.088>

Tesfaye, F., Lindberg, D., Hamuyuni, J., Taskinen, P., Hupa, L., 2017. Improving urban mining practices for optimal recovery of resources from e-waste. *Miner. Eng.* 111, 209–221. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2017.06.018>

Turner, A., Filella, M., 2017. Bromine in plastic consumer products – Evidence for the widespread recycling of electronic waste. *Sci. Total Environ.* 601–602, 374–379. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.05.173>

Wagner, M., Balde, C. P., Luda di Cortemiglia, V., Nnorom, I., Kuehr, R., Iattoni, G., 2022. Regional E-waste Monitor for Latin America: Results for the 13 countries participating in project UNIDO-GEF 5554.

Wang, R., Xu, Z., 2014. Recycling of non-metallic fractions from waste electrical and electronic equipment (WEEE): A review. *Waste Manag.* 34, 1455–1469. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2014.03.004>

Wu, Z., Yuan, W., Li, J., Wang, X., Liu, L., Wang, J., 2017. A critical review on the recycling of copper and precious metals from waste printed circuit boards using

hydrometallurgy. *Front. Environ. Sci. Eng.* 11, 8. <https://doi.org/10.1007/s11783-017-0995-6>

Xavier, L.H., Giese, E.C., Ribeiro-Duthie, A.C., Lins, F.A.F., 2019. Sustainability and the circular economy: A theoretical approach focused on e-waste urban mining. *Resour. Policy*. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2019.101467>

Yamamoto, H., Murakami, S., 2022. Which consumer psychological factors influence the lifetime of consumer electronic products? A case study of personal computers in Japan. *Waste Manag.* 144, 233–245. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2022.03.030>

Zeng, X., Gong, R., Chen, W.-Q., Li, J., 2016. Uncovering the Recycling Potential of “new” WEEE in China. *Environ. Sci. Technol.* 50, 1347–1358. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b05446>

Zeng, X., Mathews, J.A.J.A., Li, J., 2018. Urban Mining of E-Waste is Becoming More Cost-Effective Than Virgin Mining. *Environ. Sci. Technol.* 52, 4835–4841. <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b04909>

Zeng, X., Xiao, T., Xu, G., Albalghiti, E., Shan, G., Li, J., 2022. Comparing the costs and benefits of virgin and urban mining. *J. Manag. Sci. Eng.* 7, 98–106. <https://doi.org/10.1016/j.jmse.2021.05.002>

7 **ARTIGO 3** AVALIAÇÃO DAS BARREIRAS CRÍTICAS À RECUPERAÇÃO DE MATERIAIS PRESENTES NOS REEE: UMA PERSPECTIVA BRASILEIRA

RESUMO

Por ser o maior gerador de resíduos de equipamentos eletroeletrônicos na América do Sul, o Brasil possui um grande potencial de mineração urbana a partir desse fluxo de resíduos. No entanto, no país só é realizada a etapa inicial do processamento dos REEE, onde a etapa de extração dos materiais valorosos é feita em outros países (principalmente da Europa). Nesse sentido, o presente estudo contribui para uma melhor compreensão das barreiras à recuperação completa dos materiais presentes nos REEE no Brasil. Para tanto, após identificar na literatura as principais barreiras relacionadas ao gerenciamento de REEE, cinco barreiras consideradas mais adequadas a realidade brasileira. Posteriormente, através da aplicação de um questionário, foi coletada a opinião de cinco especialistas em relação a importância dessas barreiras em relação à recuperação completa dos materiais presentes nos REEE. O método DEMATEL foi utilizado para auxiliar na compreensão da influência entre as barreiras e sua categorização em grupos de causa e efeito. Os resultados obtidos no DEMATEL indicam que conhecimento técnico e tecnologia são as barreiras proeminentes para a recuperação completa no Brasil dos materiais presentes nos REEE. Os resultados deste estudo podem ajudar os atores envolvidos no gerenciamento de REEE a implementar melhores práticas e processos de recuperação, promovendo assim, uma maior circularidade dos materiais.

Palavras-chave: REEE; DEMATEL; países em desenvolvimento; economia circular.

INTRODUÇÃO

Segundo Forti et al. (2020), o Brasil é o maior produtor de resíduos de equipamentos eletroeletrônicos (REEE) da América do Sul. Diversos estudos (incluindo KASPER et al., 2011; RUBIN et al., 2014; SILVA et al., 2018; MARTINS et al., 2021; CENCI et al., 2022; CAMPOLINA et al., 2017) demonstraram que o Brasil possui um grande potencial de mineração secundária de materiais de alto valor econômico presentes nos REEE, como metais valiosos, matérias-primas críticas, elementos terras raras, entre outros. Com foco na recuperação da fração metálica, os estudos de Kasper et al. (2011), Rubin et al. (2014) e Martins et al. (2021) dão ênfase a recuperação e a aplicação de cobre presentes em placas de circuito impresso (PCI). Além do cobre nas PCIs, o estudo de Silva et al. (2018) também apontam o potencial de recuperação de níquel, zinco, ferro, alumínio, estanho, entre outros materiais. O estudo de Cenci et al. (2022) demonstra o potencial de recuperação de metais preciosos e críticos a partir de lâmpadas LED. Por fim, com foco na fração não-metálica, Campolina et al. (2017) fazem uma abordagem sobre a reciclagem dos plásticos presentes nos REEE.

Apesar da existência do Decreto 10,240 (BRASIL, 2020), que obriga os fabricantes e importadores a reciclarem ou descartarem adequadamente todo o lixo eletrônico, o sistema de logística reversa necessário ao funcionamento dessa cadeia de ações ainda não está em operação. Dessa maneira, boa parte dos resíduos não entra no circuito de retorno para posterior reaproveitamento. No ambiente doméstico, uma parte dos REEE é descartado com o lixo comum (ARAÚJO et al., 2017; MOURA et al., 2018) ou é vendido/doad0 (FRANCO E LANGE, 2011; RODRIGUES et al., 2015). Se esses REEE não forem detectados pelo mercado informal (catadores), acabam sendo enviados para aterros sanitários (SOUZA et al., 2016; SIGRIST et al., 2015) e lixões, a depender das cidades. Em consequência, há um baixo/irregular fluxo de REEE coletado para reciclagem, aproximadamente 2% do que é gerado (AZEVEDO et al., 2017; LOPES DO SANTOS, 2020). Caso algum REEE fuja desse circuito e entre em um sistema de logística reversa existente, ou seja, seja coletado pelas poucas empresas que realizam o desmanche seguro desses resíduos, apenas a separação de componentes é realizada (incluindo PCI, baterias, peças de plásticos, etc). No entanto, as placas de circuito impresso, fontes dos materiais mais nobres, são enviadas para o exterior, onde são processadas e seus materiais de interesse são

recuperados. Se esses mesmos resíduos são interceptados pela coleta informal, terão o mesmo destino, só que o desmanche será realizado de forma rudimentar e sem segurança.

Nesse sentido, é importante que se conheça e entenda os motivos para que a reciclagem completa com a recuperação desses materiais nobres, no Brasil. Além da importância ambiental e econômica que a recuperação de materiais provenientes de resíduos pode trazer ao país, o Brasil precisa conhecer o seu potencial no mercado de matérias-primas críticas.

Portanto, este capítulo apresenta uma investigação sobre que barreiras impedem a recuperação secundária de materiais nobres dos REEE no Brasil. Com auxílio do método DEMATEL (*Decision Making Trial and Evaluation Laboratory*), foram identificadas e analisadas as principais barreiras que impedem um processamento eficiente dos REEE, além de examinar as relações causa-efeito existente entre elas. O DEMATEL, por facilitar a transformação de objetivos estratégicos em ações práticas, é um método importante para se avançar na qualidade da tomada de decisão (SOARES et al., 2023; BAI E SARKIS, 2013).

USO DE MÉTODOS DE DECISÃO MULTICRITÉRIO NO GERENCIAMENTO DE REEE

A tomada de decisão no gerenciamento de resíduos sólidos urbanos deve considerar outros aspectos, além dos financeiros, sendo uma difícil tarefa, sobretudo nos países em desenvolvimento (SANTOS et al., 2017). A análise de decisão multicritério (do inglês *Multiple Criteria Decision Making* - MCDM) consiste em um conjunto de métodos de apoio à tomada de decisão, onde ao menos duas alternativas precisam atender a múltiplos objetivos os quais, muitas vezes, são conflitantes entre si (CAMPOLINA et al., 2017). Esses objetivos estão associados a variáveis também chamadas de critérios, e permitem avaliar cada alternativa com base em cada objetivo individual. Segundo Roy e Vincke (1981), os MCDM visam avaliar um conjunto de ações potenciais. A avaliação pode ser feita de diversas maneiras, como por exemplo, categorização as alternativas em grupos, escolha de uma alternativa dentre as demais, ordená-las da melhor para a pior e diferentes, etc.

Thokala e Duenas (2012) destacam que a abordagem da MCDM pode ser classificada em três categorias: modelos de mensuração, modelos de sobreclassificação e modelos baseados em metas, aspiração ou nível de referências. Os modelos de mensuração e valor permitem que funções sejam construídas para representar o valor de uma opção em relação a outra, com destaque para o MAUT (*multi-attribute utility theory*) e AHP (*analytic hierarchy process*). Já os modelos de sobreclassificação baseiam-se em comparações par a par das alternativas, em termos de cada critério preestabelecido, destacando-se os métodos ELECTRE (*ELimination Et Choix Traduisant la REalité*) e PROMETHEE (*Preference Ranking Organization METHod for Enrichment of Evaluations*). Por fim, os modelos baseados em metas, aspiração ou nível de referência, utilizam programação linear para escolher as alternativas que mais se aproximam dos níveis de satisfação desejados e preestabelecidos para cada critério determinado, com destaque para os métodos TOPSIS (*Technique for Order Preferences by Similarity to Ideal Solutions*).

Há ainda outros métodos como: ANP (*Analytic Network Process*), DEMATEL (*Decision Making Trial and Evaluation Laboratory*), UTA (*Utilité Additive*), TODIM (Tomada de Decisão Interativa e Multicritério), dentre outros. Adicionalmente, existem os métodos resultantes da combinação com outros métodos, como é o caso do *grey-DEMATEL*.

DEMATEL aplicado ao gerenciamento de REEE

A problemática dos REEE tem sido alvo de discussões pela sociedade nacional e internacional, principalmente por se tratar de um grande desafio devido ao equacionamento entre a geração excessiva e o gerenciamento sustentável. Para Reichert e Mendes (2014), muitas das soluções propostas trazem em si o equívoco da autossuficiência, com medidas isoladas e estanques que não contemplam o manejo dos resíduos como um todo. Frente a esse panorama, pesquisadores e autoridades responsáveis pelo gerenciamento dos resíduos sólidos têm continuamente buscado por novos modelos e técnicas para o gerenciamento integrado dos resíduos sólidos, considerando os aspectos ambientais, econômicos e sociais. Nesse contexto, os MCDM representam um importante auxílio para os tomadores de decisão no gerenciamento dos resíduos sólidos, inclusive dos REEE.

Entre os métodos de MCDM mais aplicados para lidar com essa complexidade da problemática dos REEE, destaca-se o DEMATEL. O método fornece uma saída gráfica, onde cada fator é representado por um peso, significando sua importância comparado à influência de todos os outros elementos do sistema (SHAIK E ABDUL-KADER, 2014). Ao mensurar a influência de cada fator no problema, o método permite determinar a causa desse problema (ANTUNES, 2020). Segundo o autor, o DEMATEL é realizado com ajuda de um mapa de causa-efeito, que mensura a influência de cada fator, possibilitando determinar a fonte do problema.

No Quadro 2 são apresentados alguns estudos que utilizaram o DEMATEL para identificar os fatores críticos no gerenciamento de REEE, com foco em países em desenvolvimento.

Quadro 2 - Estudos que aplicaram o DEMATEL para identificar barreiras no gerenciamento de REEE.

Referências	Abrangência geográfica	Barreiras
Bhattacharjee et al. (2023)	Bangladesh	(B1) Incorporação Administrativa; (B2) Estabilidade Monetária; (B3) Competência Tecnológica e Educacional; (B4) Agilidade da cadeia de suprimentos; (B5) Consideração de Mercado; (B6) Protocolos Governamentais e Agendas Internacionais; (B7) Sociedade e Ambiente.
Karuppiah & Sankaranarayanan (2023)	Índia	(B1) Ausência de conscientização pública sobre a gestão adequada do lixo eletrônico; (B2) Não implementação da alteração da proibição de Basileia; (B3) Falta de políticas e regulamentos dedicados à gestão do lixo eletrônico; (B4) Setor informal em expansão; (B5) Falta de responsabilidade social corporativa iniciativas; (B6) Infraestrutura tecnológica inadequada; (B7) Inexistência de partilha de conhecimento entre empresas de gestão de REEE; (B8) Falta de fundos para a gestão do lixo eletrônico; (B9) Falha na incorporação do design verde no desenvolvimento de produtos eletrônicos; (B10) Ausência de EPR; (B11) Importação ilegal de lixo eletrônico; (B12) Falta de diretrizes para reciclagem de lixo eletrônico; (B13) Número limitado de pontos de coleta; (B14) Falta de clareza sobre o papel das partes interessadas; (B15) Falta de conhecimento

		técnico; (B16) Falta de inventário de dados; (B17) Parceria público-privada limitada; (B18) Métodos de descarte insustentáveis; (B19) Políticas de classificação ineficientes; (B20) Falta de comprometimento da gestão.
Mahanth et al. (2023)	Índia	(B1) Barreiras Sociais; (B2) Barreiras Econômicas; (B3) Barreiras Ambientais.
Kumar et al. (2022)	Índia	(B1) Econômicas; (B2) Sociais; (B3) Gestão Ambiental; (B4) Tecnologia e Infraestrutura; (B5) Políticas governamentais e regulamentações relacionadas.
Trivedi et al. (2022)	Índia	(B1) Falta de implementação eficiente dos quadros legislativos; (B2) Falta de serviços de coleta sofisticados e formais de porta em porta; (B3) Falta de técnicas de tratamento avançadas e sustentáveis; (B4) Falta de treinamento adequado dos trabalhadores do lixo eletrônico; (B5) Falta de conscientização do público em geral sobre os benefícios ambientais da reciclagem; (B6) Falta de mecanismos de eliminação inofensivos; (B7) Falta de iniciativas dos setores corporativos; (B8) Falta de obrigatoriedade de responsabilidade estendida do produtor.
Jangre et al. (2022)	Economias em desenvolvimento (incluindo a Índia)	(B1) Falta de planejamento de longo prazo; (B2) Menos políticas que abordem o problema do lixo eletrônico; (B3) Falta de conscientização do cliente sobre a devolução; (B4) Insensibilidade do público em relação às questões ambientais; (B5) Falta de iniciativas de responsabilidade social corporativa; (B6) Estrutura organizacional e suporte insuficientes; (B7) Recursos humanos limitados; (B8) Tecnologias de reciclagem subdesenvolvidas; (B9) Falta de infraestrutura tecnológica; (B10) Baixa segurança e proteção do sistema de informação; (B11) Menos investimento em armazéns; (B12) Grande investimento inicial e alto custo operacional; (B13) Alto custo da tecnologia; (B14) Fundos inadequados para reciclar o lixo eletrônico; (B15) Falta de subsídio do governo.

Fetanat et al. (2021)	Irã	(B1) Sociais; (B2) Tecnológicas; (B3) Econômicas; (B4) Ambientais.
Sharm et al. (2020)	Índia	(B1) Colaboração com parceiros ambientais; (B2) Benefícios de subsídios; (B3) Recuperação de material precioso; (B4) Esquema de reembolso de depósitos; (B5) Planos de saúde dos funcionários, Programas de formação para consciência ambiental; (B6) Imagem verde; (B7) Redução nas práticas de aterros; (B8) Sistemas de gestão ambiental; (B9) Legislação ambiental; (B10) Redução de substâncias perigosas e tóxicas no meio ambiente.
Kazançoglu et al. (2020)	Turquia	(B1) Jurídicas e Legislativas; (B2) Tecnologia e infraestrutura; (B3) Social e Ambiental; (B4) Econômica; (B5) Logística e gestão da Cadeia de Suprimentos; (B6) Empresarial e gerencial.
Kumar e Dixit (2018a)	Índia	(B1) Falta de conscientização pública sobre a reciclagem de lixo eletrônico; (B2) Falta de políticas e regulamentação que abordem o problema do lixo eletrônico; (B3) Não adoção da emenda de proibição de Basileia; (B4) Crescimento do setor informal; (B5) Falta de implementação de práticas verdes no design de produtos eletrônicos; (B6) Falta de fundos para práticas de reciclagem de lixo eletrônico; (B7) Falta de iniciativas de SER; (B8) Falta de compartilhamento de conhecimento entre empresas de gestão de REEE; (B9) Infraestrutura inadequada; (B10) Falta de Abordagens de responsabilidade estendida do produtor.
Kumar e Dixit (2018b)	Índia	(B1) Políticas e regulações; (B2) Infraestrutura; (B3) Conhecimento; (B4) Socioeconômicas; (B5) Socioculturais; (B6) Tecnológicas; (B7) Financeiras.

Fonte: O autor (2023).

Diversos estudos (entre eles KUMAR E DIXIT, 2018a; KUMAR E DIXIT, 2018b; TRIVEDI et al., 2022; KAZANÇOGLU et al., 2020; SHARMA et al., 2020; JANGRE et al., 2022) apontaram que a falta de políticas e regulamentações é uma das principais barreiras para o gerenciamento adequado de REEE. Nesse sentido, alguns dos fatores que contribuem para esse desafio são: falta de leis ou atraso na aplicação das leis, o papel indefinido dos stakeholders e a falta de abordagem ao design de produto

que favoreça a reciclagem ambientalmente adequada de REEE (KUMAR E DIXIT, 2018a; KUMAR E DIXIT, 2018b; TRIVEDI et al., 2022; KAZANÇOGLU et al., 2020; SHARMA et al., 2020; JANGRE et al., 2022).

Tecnologia e/ou infraestrutura foram consideradas barreiras importantes (por exemplo KUMAR E DIXIT, 2018a; KUMAR et al., 2022; TRIVEDI et al., 2022; JANGRE et al., 2022) para melhorar o gerenciamento de REEE. Entre os principais fatores relacionados a essas barreiras, destacam-se: tecnologias e processos de reciclagem desatualizados e/ou ambientalmente inadequados (KUMAR E DIXIT, 2018; KUMAR et al., 2022; JANGRE et al., 2022) e a deficiência nos serviços de coleta de REEE (TRIVEDI et al., 2022).

A barreira econômica também se destacou em alguns estudos (KUMAR; DIXIT, 2018a; FETANAT et al., 2021; MAHANTH et al., 2023). Entre os principais desafios relacionados a esfera econômica do gerenciamento de REEE, esses estudos apontam: as incertezas relacionadas a rentabilidade/sustentabilidade dos sistemas de gerenciamento de REEE (FETANAT et al., 2021; MAHANTH et al., 2023).), e a falta/insuficiência de subsídios e taxas para o setor formal (KUMAR; DIXIT, 2018a; JANGRE et al., 2022).

Por fim, a barreira social foi considerada proeminente para alguns estudos (KUMAR; DIXIT, 2018a; JANGRE et al., 2022; KUMAR et al., 2022). No geral, o aspecto que mais se destacou nesses estudos foi a falta de conscientização do consumidor em relação às práticas adequadas de descarte/devolução e reciclagem de REEE.

MATERIAIS E MÉTODOS

DESCRIÇÃO DA PESQUISA

O presente estudo classifica-se como uma pesquisa aplicada, cuja finalidade é produzir conhecimentos para solucionar problemas práticos relacionados ao gerenciamento de REEE, mais especificamente a recuperação de materiais presentes nesse fluxo de resíduos sólidos.

Em relação ao objetivo, a pesquisa se enquadra nas categorias de pesquisa descritiva e exploratória. No caso, o foco é nos REEE e nas barreiras para implementar um sistema de recuperação completa dos materiais no Brasil.

No que diz respeito aos procedimentos, a pesquisa utiliza a técnica de pesquisa com survey, coletando informações diretamente de um grupo de especialistas através de um questionário. As informações coletadas se referem às visões desses especialistas sobre as barreiras que afetam a implementação de um sistema para recuperação completa de materiais no Brasil.

Quanto à abordagem, a pesquisa emprega tanto aspectos quantitativos quanto qualitativos, formando uma abordagem combinada para uma compreensão mais completa e detalhada do problema em questão.

Método DEMATEL

Neste estudo de pesquisa, a metodologia embragada foi a abordagem do método DEMATEL. Diversos estudos apontam o DEMATEL como uma metodologia eficaz para abordar as questões relacionadas ao gerenciamento de REEE, sendo utilizada tanto para identificar as causas e estabelecer relações entre as barreiras, quanto possibilitando aos tomadores de decisão desenvolver estratégias de longo prazo para que o objetivo desejado seja alcançado.

A seguir são apresentadas as etapas da técnica de coleta de dados e do método DEMATEL consideradas neste estudo.

Passo 1: identificação e validação das barreiras

Com base nas barreiras identificadas no Quadro 7.1, uma banca (formada pelo autor deste trabalho juntamente com suas orientadoras) definiram quais barreiras seriam aplicáveis ao contexto brasileiro de gerenciamento de REEE. Ao final desta

etapa, a banca selecionou cinco barreiras como mais adequadas, as quais são descritas a seguir:

Tecnologia (B1): barreira relacionada a infraestrutura adequada e a disponibilidade de tecnologias eficientes para o processamento completo dos REEE. Vale destacar que, mesmo quando há tecnologias disponíveis, sua eficácia pode ser comprometida se não houver uma infraestrutura adequada para apoiar sua implementação.

Conhecimento técnico (B2): A falta ou limitação de conhecimento técnico relacionada aos processos e tecnologias para recuperação dos materiais presentes nos REEE pode levar a práticas inadequadas de gerenciamento, resultando em uma recuperação ineficiente (do ponto de vista ambiental e econômico). Adicionalmente, isso poderá impactar negativamente a eficiência dos sistemas de logística reversa.

Controle da poluição (B3): barreira relacionada à ausência de regulamentação e da falta de fiscalização rigorosa, o que resulta em um gerenciamento inadequado dos REEE. A força do mercado informal de reciclagem de REEE acaba sendo um obstáculo para o controle do gerenciamento desses resíduos por parte do governo e setor privado. Adicionalmente, destaca-se a importância da obtenção de certificações ambientais, por parte de empresas de reciclagem, como um indicativo de conformidade com normas e regulamentações.

Custos (B4): os custos associados à extração de materiais dos REEE (por exemplo, os investimentos em infraestrutura e tecnologia) são fatores que podem ter implicações negativas na eficácia do sistema de logística reversa. Assim, podem haver impactos ambientais negativos (pelo fluxo irregular de resíduos coletados) e econômicos (pela perda de potenciais benefícios econômicos pela recuperação e comercialização desses resíduos).

Consumidor (B5): A conscientização do consumidor em relação ao consumo e descarte de produtos eletroeletrônicos tem papel fundamental no gerenciamento desses resíduos. Apesar dos avanços quanto ao conhecimento e a conscientização sobre a importância do reuso/reciclagem desses resíduos, grande parte ainda adota práticas inadequadas de descarte de REEE.

Passo 2: Coleta de dados com especialistas

A partir das barreiras selecionadas na etapa anterior, foi elaborado um questionário para coletar as opiniões de especialistas sobre as relações causais entre as barreiras. Para tanto, uma equipe de cinco especialistas do Brasil que atuam na área de gerenciamento de resíduos sólidos foi consultada, sendo quatro acadêmicos e uma empresa de gerenciamento de resíduos sólidos. Segue o perfil dos especialistas.

Especialista 1: Mestre em desenvolvimento e meio ambiente. Atua como perita e auditora ambiental.

Especialista 2: Doutor em Recursos Naturais. Professor de pós-graduação em Engenharia Ambiental. Entre outras áreas, atua com Sistema Integrado de Gestão e Gestão de Resíduos. Desenvolve pesquisas em relacionadas ao gerenciamento de resíduos industriais, gestão de recursos naturais, sustentabilidade, desperdício e eficácia de processos e sistemas.

Especialista 3: Doutor em Tecnologias Energéticas e Nucleares. Entre outras áreas, atua com energias renováveis e biotecnologia ambiental.

Especialista 4: Doutor em Ciência dos Materiais. Tem experiência na área de Engenharia de Materiais e Metalúrgica, com ênfase em Estão Ambiental e Reciclagem de Resíduos. Entre outras áreas, atua com caracterização de materiais, produção mais limpa, avaliação do ciclo de vida e economia circular, reciclagem de resíduos sólidos industriais.

Especialista 5: Gerente ambiental de uma empresa que atua na coleta, transporte, armazenamento, reparo, processamento, venda para exportação de REEE.

Cada especialista atribuiu pontuações que representam a força e a direção das relações entre as barreiras, sendo 0 (nenhuma influência), 1 (baixa influência), 2 (média influência), 3 (alta influência) e 4 (muito alta influência).

Passo 3: Análise DEMATEL

Matriz de Incidência (X):

A matriz de incidência (X) mostra as pontuações fornecidas pelos especialistas para as relações causais entre as barreiras. Para identificar o modelo das relações entre as N barreiras, inicialmente é gerada uma matriz $N \times N$. O efeito do elemento de cada linha é exercido sobre o elemento de cada coluna desta matriz.

$$X = \begin{bmatrix} 0 & \cdots & x_{n1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{1n} & \cdots & 0 \end{bmatrix}$$

Como foram avaliadas cinco barreiras, a matriz tem dimensões 5X5 (Tabela 4).

Tabela 4 - Matriz de relação direta.

Barreiras	Tecnologia (B1)	Conhecimento técnico (B2)	Controle da poluição (B3)	Custos (B4)	Consumidor (B5)
Tecnologia (B1)	0				
Conhecimento técnico (B2)		0			
Controle da poluição (B3)			0		
Custos (B4)				0	
Consumidor (B5)					0

Matriz Normalizada (N)

Esta etapa tem como objetivo eliminar possíveis vieses nas pontuações dos especialistas. Para realizar a normalização, é efetuado o cálculo direto da soma de todas as linhas e colunas da matriz, obtendo-se o valor máximo dessas somas, representado por 'k'. Em seguida, cada elemento da matriz de relação direta é dividido por 'k' para efetuar a normalização.

$$k = \max \left\{ \max \sum_{j=1}^n x_{ij}, \sum_{i=1}^n x_{ij} \right\}$$

$$N = \frac{1}{k} * X$$

Matriz de Influência Direta e Indireta (T)

Calcule a matriz de influência direta e indireta a partir da matriz normalizada (N). Isso ajudará a identificar as barreiras que têm maior impacto sobre as outras. O processo se inicia com a criação de uma matriz identidade (I) de dimensão $N \times N$. Posteriormente, essa matriz identidade é subtraída da matriz normalizada (N), resultando em uma nova matriz que, por sua vez, é invertida. Então, a matriz normalizada (N) é multiplicada pela matriz resultante desse processo para gerar a matriz de relação global.

$$T = N \times (I - N)^{-1}$$

Identificação das Causas e Efeitos:

Com base na soma de cada linha e cada coluna da matriz T, identificam-se quais barreiras são consideradas causas (positivas) e quais são consideradas efeitos (negativas) em relação as demais barreiras. A soma das linhas (R) e colunas (C) pode ser calculada da seguinte forma:

$$R = \sum_{j=1}^n T_{ij}$$

$$C = \sum_{i=1}^n T_{ij}$$

Em seguida, o cálculo de $R+C$ quantifica a importância da barreira "i" em todo o sistema, enquanto $R-C$ reflete os efeitos líquidos que a barreira "i" exerce sobre as demais barreiras.

Esse modelo pode ser expresso graficamente por meio de um diagrama em que os valores de $(R+C)$ são representados no eixo horizontal, enquanto os valores de $(R-C)$ são dispostos no eixo vertical. A posição e a relação de cada fator em relação a um ponto nas coordenadas $(R+C, R-C)$ são determinadas pelo sistema de coordenadas.

Passo 4: Interpretação dos Resultados

Geração de Diagramas DEMATEL: onde são criados diagramas DEMATEL que representem visualmente as relações causais entre os critérios. Isso facilitará a interpretação dos resultados.

Para facilitar a análise e interpretação, é possível dividir o diagrama de causa-efeito em quatro regiões (Q1, Q2, Q3 e Q4). Para tanto, é preciso calcular o valor médio para $R+C$. A seguir são descritas cada região.

Barreiras primárias (Q1): corresponde a região onde as barreiras são do grupo causal e alta proeminência em relação as demais barreiras.

Barreiras secundárias (Q2): também são barreiras do grupo causal que podem influenciar outras barreiras; no entanto, sua influência sobre as barreiras primeira é superficial (baixa proeminência).

Barreiras independentes (Q3): são barreiras de efeito, desse modo, seu poder de condução sobre as demais barreiras é baixo (baixa proeminência).

Barreiras indiretas (Q4): região que corresponde as barreiras de efeito, mas com alta de proeminência em relação as outras barreiras. A fim de tornar a tomada de decisão eficaz mais acessível, é necessário que as partes interessadas as observem e as controlem imediatamente.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

ANÁLISE INDIVIDUAL DOS ESPECIALISTAS

Nesta seção, são abordados os resultados do estudo, que representa uma iniciativa visando aprimorar o gerenciamento de REEE com ênfase na recuperação completa dos materiais presentes nos REEE no Brasil. No âmbito deste estudo, cada barreira foi categorizada com base nos critérios de avaliação. Além disso, as relações causais entre as diversas barreiras foram visualizadas através das respostas individuais e agregadas dos cinco especialistas em gestão de resíduos sólidos. Essa abordagem contribui para o desenvolvimento de estratégias de tomada de decisão que têm aplicabilidade prática na gestão operacional de sistemas de logística reversa de REEE.

Baseado nos valores de (R+C) (ver Tabela 5), o Especialista 1 considera custo (B4) como a barreira mais proeminente entre as demais. Por sua vez, os valores de (R-C) resultam em 3 barreiras de causa (B1, B3 e B4) e duas barreiras de efeito (B2 e B5). Note-se que a barreira B4 apresentou valor nulo para o valor (D-R), isto é, não é nem causa nem efeito; no entanto, B4 apresenta alto proeminência (D+R), sendo considerada uma importante barreira pelo especialista.

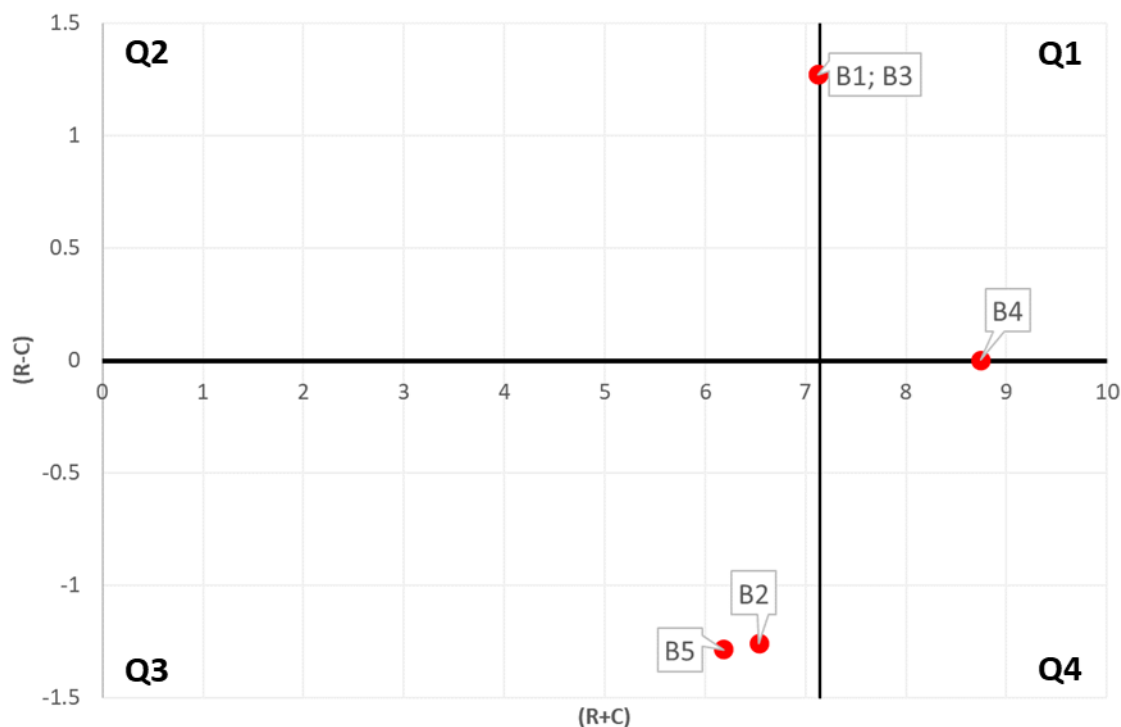
Tabela 5 - Influência Direta e Indireta para as barreiras (de acordo com o Especialista 1)

Barreiras	R	C	R+C (proeminência)	Ranking	R-C (relação)	Causa/Efeito
Tecnologia (B1)	4.1983	2.9261	7.1245	2	1.2722	C
Conhecimento técnico (B2)	2.6388	3.8974	6.5362	4	-1.2585	E
Controle da poluição (B3)	4.1983	2.9261	7.1244	3	1.2722	C
Custo (B4)	4.3707	4.3707	8.7414	1	0.0000	-
Consumidor (B5)	2.4473	3.7332	6.1806	5	-1.2859	E

A análise simultânea dos valores de (R-C) e (R+C), segundo o Especialista 1 (Figura 19), permite categorizar as barreiras em três categorias distintas: barreira

primária (B4 – custo), barreiras secundárias (B1 – tecnologia; B3 – controle da poluição) e barreiras independentes (B2 – conhecimento técnico; B5 - consumidor).

Figura 19 - Diagrama de causa-efeito para as barreiras (de acordo com o especialista 1).



Nota: Média $(R+C) = 7,14$.

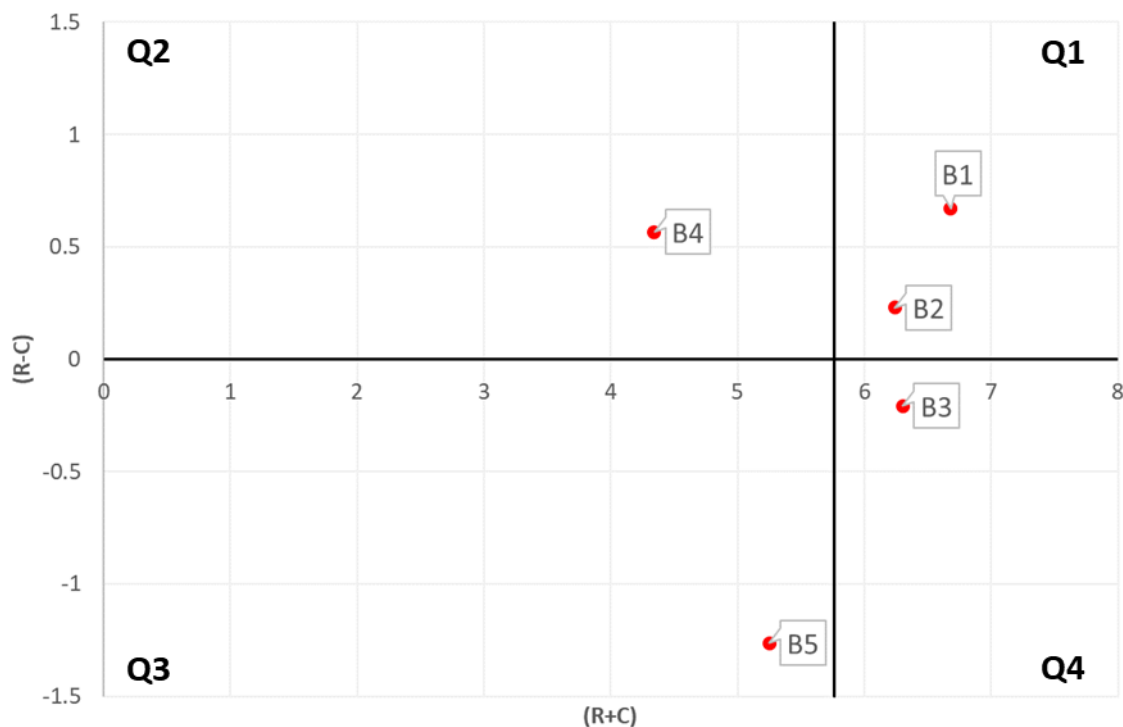
Os valores de $(R+C)$ para o Especialista 2, conforme Tabela 6, apontam tecnologia (B1) como a barreira mais proeminente. Os valores de $(R-C)$ resultam em 3 barreiras de causa (B1, B2 e B4) e duas barreiras de efeito (B3 e B5).

Tabela 6 - Influência Direta e Indireta para as barreiras (de acordo com o Especialista 2)

Barreiras	R	C	R+C		R-C	
			(proeminência)	Ranking	(relação)	Causa/Efeito
Tecnologia (B1)	3.6758	3.0051	6.6809	1	0.6707	C
Conhecimento técnico (B2)	3.0485	3.2555	6.3040	2	-0.2069	E
Controle da poluição (B3)	3.2356	3.0051	6.2408	3	0.2305	C
Custos (B4)	2.4544	1.8870	4.3415	5	0.5674	C
Consumidor (B5)	1.9938	3.2555	5.2493	4	-1.2616	E

A análise simultânea dos valores de (R-C) e (R+C), segundo o Especialista 2, (ver Figura 20) permite categorizar as barreiras em quatro categorias distintas: barreiras primárias (B1 e B2), barreira secundária (B4) e barreira independente (B5 - consumidor) e barreira indireta (B3).

Figura 20 - Diagrama de causa-efeito para as barreiras (de acordo com o especialista 2).



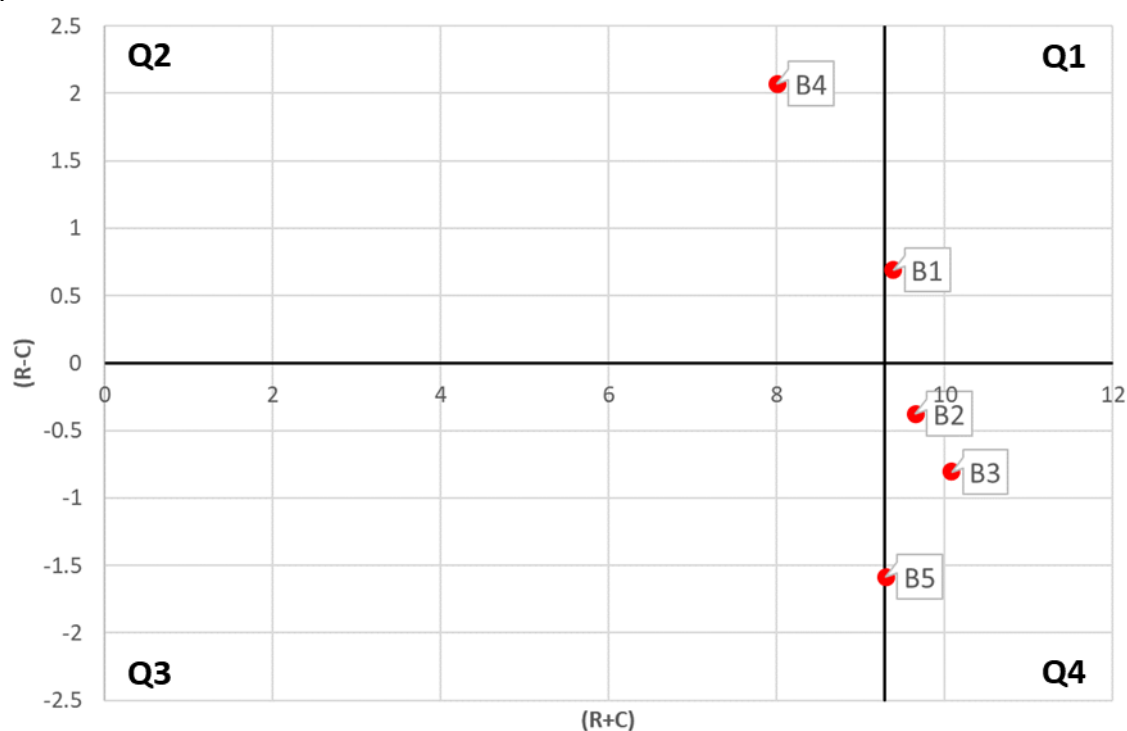
Nota: Média (R+C) = 5,76.

Os valores de proeminência (R+C) para o Especialista 3, conforme Tabela 7, indicam controle da poluição (B3) como a barreira mais proeminente entre as demais. Ao avaliar a relação entre as barreiras, através dos valores de (R-C), tem-se duas barreiras de causa (B1 e B4) e três barreiras de efeito (B2, B3 e B5).

A análise simultânea dos valores de (R-C) e (R+C), segundo o Especialista 3 (conforme Figura 21), permite categorizar as barreiras em três categorias distintas: barreira primária (B1), barreira secundária (B4) e barreiras indiretas (B2, B3 e B5).

Tabela 7 - Influência Direta e Indireta para as barreiras (de acordo com o Especialista 3)

Barreiras	R	C	R+C (proeminência)	Ranking	R-C (relação)	Causa/Efeito
Tecnologia (B1)	5.0403	4.3480	9.3883	3	0.6922	C
Conhecimento técnico (B2)	4.6376	5.0134	9.6510	2	-0.3758	E
Controle da poluição (B3)	4.6376	5.4430	10.0805	1	-0.8054	E
Custos (B4)	5.0403	2.9674	8.0077	5	2.0729	C
Consumidor (B5)	3.8591	5.4430	9.3020	4	-1.5839	E

Figura 21 - Diagrama de causa-efeito para as barreiras (de acordo com o Especialista 3).

Nota: Média (R+C) = 9,29.

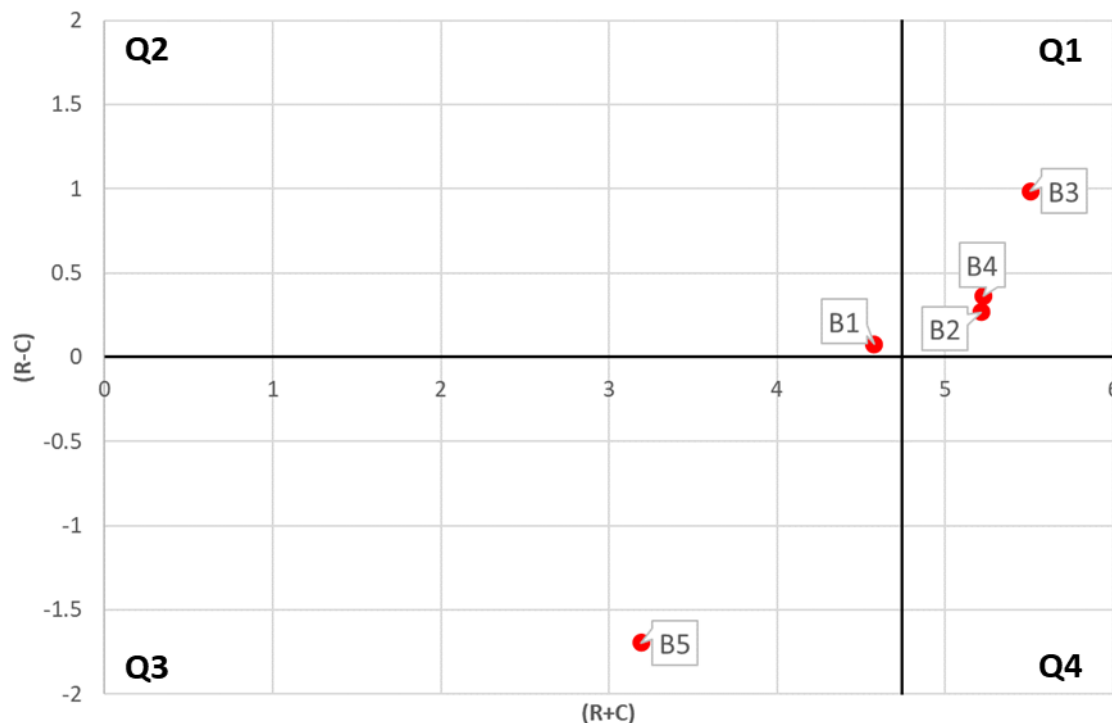
Os valores de (R+C) para o Especialista 4, conforme Tabela 8, apontam controle da poluição (B3) como a barreira mais proeminente. Já a relação entre as barreiras, valores de (R-C), resultam em quatro barreiras de causa (B1, B2, B3 e B4) e uma barreira de efeito (B5).

Tabela 8 - Influência Direta e Indireta para as barreiras (de acordo com o Especialista 4)

Barreiras	R	C	R+C (proeminência)	Ranking	R-C (relação)	Causa/Efeito
Tecnologia (B1)	2.3274	2.2497	4.5771	4	0.0777	C
Conhecimento técnico (B2)	2.7399	2.4728	5.2127	3	0.2671	C
Controle da poluição (B3)	3.2462	2.2592	5.5055	1	0.9870	C
Custos (B4)	2.7951	2.4303	5.2254	2	0.3648	C
Consumidor (B5)	0.7480	2.4445	3.1925	5	-1.6965	E

A análise simultânea dos valores de (R-C) e (R+C), conforme Figura 22, permite categorizar as barreiras em três categorias distintas: barreiras primárias (B2, B3 e B4), barreira secundária (B1) e barreira independente (B5).

Figura 22 - Diagrama de causa-efeito para as barreiras (de acordo com o Especialista 4).



Nota: Média (R+C) = 4,74.

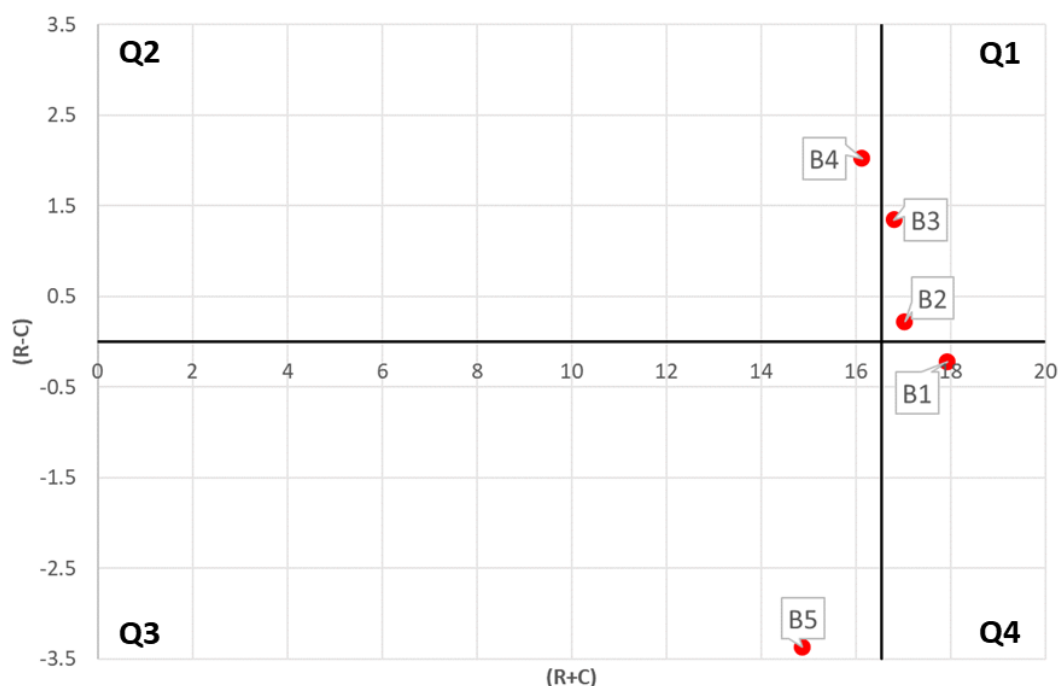
Os valores de proeminência (R+C) para o Especialista 5, conforme Tabela 9, indicam tecnologia (B1) como a barreira mais proeminente entre as demais. A análise da relação entre as barreiras, através dos valores de (R-C), resulta em três barreiras de causa (B2, B3 e B4) e duas barreiras de efeito (B1e B5).

A análise simultânea dos valores de (R-C) e (R+C) do Especialista 5 (ver Figura 23), permite categorizar as barreiras em quatro categorias distintas: barreiras primárias (B2 e B3), barreira secundária (B4) e barreiras independente (B5) e barreira indireta (B1).

Tabela 9 - Influência Direta e Indireta para as barreiras (de acordo com o especialista 5)

Barreiras			R+C (proeminência)	Ranking	R-C	
	R	C			(relação)	Causa/Efeito
Tecnologia (B1)	8.8531	9.0750	17.9280	1	-0.2219	E
Conhecimento técnico (B2)	8.6252	8.4003	17.0255	2	0.2249	C
Controle da poluição (B3)	9.0750	7.7286	16.8036	3	1.3463	C
Custos (B4)	9.0750	7.0510	16.1259	4	2.0240	C
Consumidor (B5)	5.7466	9.1199	14.8666	5	-3.3733	E

Figura 23 - Diagrama de causa-efeito para as barreiras (de acordo com o Especialista 5).



Nota: Média (R+C) = 16,55.

Discussão

Este estudo identificou e analisou cinco importantes barreiras para a recuperação completa dos materiais presentes nos REEE, no Brasil, a partir da logística reversa. Na seção anterior, os resultados para cada um dos cinco especialistas consideraram três aspectos para as barreiras avaliadas: relação (causa e efeito), proeminência (através do valor de R-C) e, através da análise simultânea desses aspectos, o zoneamento/categorização (Q1 - primárias, Q2 - secundárias, Q3 - independentes e Q4 - indiretas).

Para três especialistas (E2, E4 e E5), o conhecimento técnico (B2) é uma barreira primária (Q1) para a recuperação de materiais, a partir de sistemas de logística reversa de REEE. Esses especialistas consideram o conhecimento técnico um fator causal em relação às demais barreiras, sendo o mais crucial para se resolver na perspectiva de recuperação de materiais através de sistemas de logística reversa de REEE. Para o especialista 3, B2 é uma barreira indireta (Q4); isto é, apesar de ser uma barreira de efeito (sendo influenciada pelos fatores causais – Q1), o conhecimento técnico apresenta um destaque entre as demais barreiras pelo seu alto

valor de proeminência. Assim, os stakeholders devem observar e controlar imediatamente essa barreira para que se alcance o objetivo do estudo.

A falta ou limitação de conhecimento técnico sobre como recuperar de forma eficiente os materiais presentes no fluxo de REEE pode resultar em práticas inadequadas de logística reversa, levando a uma recuperação ineficiente de materiais. A falta conhecimento/informação pode até se estender ao início do processo, sobre onde e como o consumidor deve descartar adequadamente os REEE, sendo um desafio a ser superado. Segundo Azevedo et al. (2017), o sistema de coleta é um dos maiores entraves à implementação de processos para recuperação de materiais nos REEE. Alguns estudos (incluindo LOPES DOS SANTOS, 2020; AUGUSTO et al., 2018; GHISOLFI et al., 2017) destacam o insuficiente/irregular volume coletado de REEE no Brasil, o que pode acabar levando ao fracasso dos sistemas de logística reversa. Adicionalmente, a destinação inadequada dos REEE (ALBUQUERQUE et al., 2020) e a competição entre empresas (GHISOLFI et al., 2017; DIESTE et al., 2019; FERREIRA et al., 2019) pela coleta de REEE de mesma categoria são fatores técnicos que também podem afetar a eficiência da coleta e, conseqüentemente, do sistema de logística reversa. Quanto ao processamento dos REEE, a falta de habilidade técnica no pré-tratamento (OLIVEIRA et al., 2020; GHISOLFI et al., 2017) e nos tratamentos avançados (OLIVEIRA NETO et al., 2017; SCHROEDER et al., 2015) também podem afetar a eficiência do sistema de logística reversa.

Nesse sentido, investimentos em treinamento e capacitação dos profissionais e empresas que atuam na indústria de reciclagem de REEE, em conformidade com os aspectos legais, podem melhorar a eficiência na recuperação de materiais nesse fluxo de resíduos.

Os especialistas E2 e E3 consideram a tecnologia (B1) é uma barreira primária (Q1), enquanto E4 e E5 consideram como uma barreira secundária (Q2). Para o especialista E5, a tecnologia (B1) é uma barreira indireta (Q4). Assim, trata-se de um fator causal (Q1 e Q4) e de alto valor de proeminência (Q1 e Q2), o qual impacta consideravelmente (in)eficiência da recuperação de materiais no sistema de logística reversa.

Na problemática da recuperação de materiais a partir dos REEE, a tecnologia desempenha um papel fundamental tanto como parte do problema quanto como parte da solução. Diversos estudos (incluindo ALVES et al., 2021; LOPES DOS SANTOS, 2020; OLIVEIRA NETO et al., 2019; GHISOLFI et al., 2017; OLIVEIRA NETO et al., 2017) destacam a carência do Brasil quanto a infraestrutura e tecnologias adequadas para o processamento completo dos REEE em território nacional; sendo o tratamento avançado é realizado fora do país. A limitação de infraestrutura/tecnologias para as etapas de pré-tratamento de REEE e a eficiência dessas tecnologias têm um impacto direto na capacidade de recuperar materiais valiosos. De acordo com a literatura existente, os métodos de reciclagem de REEE mais utilizados e estudados no Brasil são pirometalurgia, (bio)hidrometalurgia, biometalurgia e processamento mecânico (DAMASCENO et al., 2016; RUBIN et al., 2014; VEIT et al., 2014; SILVA et al., 2019; SILVAS et al., 2015; DIAS et al., 2018; SILVA et al., 2015). Adicionalmente, poucos estudos dão ênfase a reciclagem de polímeros presentes nos REEE (incluindo HIRAYAMA E SARON, 2015; CAMPOLINA et al., 2017).

Apesar da disponibilidade de tecnologias, a capacidade de reciclagem de REEE no país é limitada a alguns tipos de REEE (SOUZA et al., 2019) e as operações mais avançadas estão concentradas nas regiões Sul e Sudeste (SOUZA et al., 2019; OLIVEIRA NETO et al., 2019).

Nesse sentido, o desenvolvimento/aplicação de tecnologias mais eficientes e econômicas e a expansão da capacidade de reciclagem no país poderão impulsionar a recuperação de materiais, tornando o processo mais atrativo e rentável.

Para os especialistas (E4 e E5), controle da poluição (B3) é apontada como uma barreira de alta proeminência e alta relação entre as barreiras, ou seja, localizada em Q1. Para o especialista E1, B3 é considerada uma barreira secundária (em Q2). Diante disso, pode-se destacar sua posição de fator causal (Q1 e Q2) em relação as demais barreiras. Adicionalmente, os especialistas E2 e E3 consideram B3 como uma barreira indireta (Q3). Portanto, o controle da poluição é visto como um fator de alta proeminência (Q1 e Q3) e que deve ser observado e controlado para o bom funcionamento dos sistemas de logística reversa de REEE.

Por muito tempo a falta de regulamentação e fiscalização rigorosas resultou em práticas inadequadas de gerenciamento de REEE. Apesar dos recentes avanços na legislação de REEE, ainda não é possível avaliar através de estudos publicados o seu impacto no gerenciamento de REEE. Na perspectiva governamental, estudos (incluindo DIAS et al., 2018; XAVIER et al., 2021; OLIVEIRA NETO et al., 2019) têm destacado que o governo brasileiro não tem controle sobre as atividades de reciclagem de REEE, principalmente pela existência de um forte mercado informal de reciclagem desses resíduos. Muitas organizações não têm políticas internas sólidas relacionadas ao gerenciamento adequado de REEE, o que pode resultar em práticas de descarte inadequadas ou na falta de iniciativas de reciclagem em suas operações (SOUZA, 2020; LIMA et al., 2016). Na esfera organizacional, SCUR E BARBOSA, 2017; LIMA et al., 2016) destacam a importância da certificação ambiental, o que implica que a empresa está em conformidade com às normas e regulamentações, passou por treinamento e reduziu o impacto ambiental. Por fim, políticas de controle da poluição fracas e ineficazes podem permitir a operação de instalações de reciclagem REEE sem medidas adequadas de controle de emissões, causando impactos negativos ao meio ambiente e à saúde pública (conforme CAETANO et al., 2019; DIAS et al., 2018a; SOUZA et al., 2015).

Segundo os especialistas E3, E3 e E5, custo (B4) é uma barreira secundárias (situada em Q2). Embora seja uma barreira causal (alto poder de condução), o especialista considera que B4 pode ser influenciada por outros fatores (baixa proeminência). Para o especialista E4, a barreira B4 primária (Q1). Diante disso, pode-se destacar custo (B4) como um fator causal que pode impulsionar outras barreiras (independentes ou indiretas).

Os altos custos associados à recuperação de materiais nos REEE, incluindo investimentos em infraestrutura e tecnologia (SILVA et al., 2019; DEMAJOROVIC et al., 2016), a falta de suporte financeiro e exclusão de coletores e cooperativas de reciclagem dos projetos de logística reversa (VALENTE et al., 2021; ALBUQUERQUE et al., 2020; AUGUSTO et al., 2018) e a desigualdade na taxa aplicada pelo governo (OLIVEIRA NETO et al., 2019; AZEVEDO et al., 2017; DEMAJOROVIC et al., 2016; AZEVEDO et al., 2019) são fatores que podem desestimular a participação ativa dos atores envolvidos na indústria de produtos eletrônicos e no gerenciamento de

REEE. Isso pode impactar diretamente no volume coletado e operações de coleta, na separação e na recuperação de materiais no sistema de logística reversa.

Por outro lado, os potenciais benefícios econômicos (AZEVEDO et al., 2019; OLIVEIRA NETO et al., 2017) gerados pela comercialização dos materiais recuperados, podem criar oportunidades de receita. As receitas geradas podem ser direcionadas para programas de reciclagem de REEE, infraestrutura de reciclagem e conscientização pública e, conseqüentemente, melhorar a eficiência do sistema de logística reversa.

Quatro especialistas (E1, E2, E4 e E5) apontaram consumidor (B5) como uma barreira independente (situada em Q3). Já para o especialista E3, consumidor (B5) é uma barreira indireta (Q4). Nos dois casos, B5 é considerada uma barreira efeito (baixo poder de condução) e de baixa proeminência. Isso significa que os especialistas consideram que consumidor (B4) tem baixo poder de condução sobre as barreiras que podem levar ao sucesso da recuperação de materiais nos REEE a partir do sistema de logística reversa.

Apesar dos consumidores não desempenharem um papel direto na gestão da logística reversa de REEE, esses atores desempenham um papel fundamental na separação inicial de produtos eletrônicos descartados. Estudos com foco nos consumidores brasileiros mostram que tem havido um avanço no conhecimento e conscientização dos consumidores em relação à importância da reciclagem e do descarte adequado de REEE (SANTOS E OGUNSEITAN, 2022; ALVES et al., 2021); OLIVEIRA NETO et al., 2022). Entretanto, a grande maioria dos consumidores ainda adotam práticas inadequadas de descarte de REEE (ECHEGARAY E HANSSTEIN, 2017; MOURA et al., 2018; ARAUJO et al., 2017; OLIVEIRA et al., 2020; ECHEGARAY, 2016; OLIVEIRA NETO et al., 2022), o que pode dificultar a coleta e, conseqüentemente, as operações posteriores para recuperação de materiais a partir dos REEE.

Uma possível solução são as campanhas de conscientização pública e os programas de coleta de REEE podem incentivar os consumidores a descartar seus eletrônicos de maneira adequada, aumentando assim a disponibilidade de materiais recicláveis.

CONCLUSÃO

De acordo com os resultados desta pesquisa, as barreiras mais importantes à recuperação completa dos materiais valiosos contidos nos REEE no Brasil são, nesta ordem: conhecimento técnico (B2), tecnologia (B1), controle da poluição (B3), custo (B4) e consumidor (B5).

Para minimizar essas barreiras, algumas ações poderão ser consideradas no gerenciamento de REEE, tais como: (i) treinamento e capacitação dos profissionais e empresas que atuam no setor de reciclagem; (ii) desenvolvimento e aplicação de tecnologias e processos que permitam expandir a capacidade de recuperação e, assim, uma maior receita com a comercialização dos materiais; (iii) normas e regulamentações mais rígidas para o controle das operações nas instalações de recuperação de materiais; e (iv) campanhas de conscientização pública e programas de coleta de REEE para incentivar os consumidores sobre a aquisição e descarte adequado de produtos eletrônicos, aumentando assim, a disponibilidade de materiais recuperáveis.

Por fim, é imperativo que o Brasil aproveite as pesquisas sobre a gestão de REEE realizadas e coloque em prática dentro das políticas e regulamentações já existentes. Além disso, a colaboração entre diferentes partes interessadas, incluindo o governo, a indústria, as organizações de reciclagem e os consumidores, desempenha um papel crucial na superação desses desafios. Somente por meio de ações coordenadas, provenientes de decisões conscientes, e políticas eficazes, o Brasil poderá enfrentar, adequadamente, os problemas relacionados à gestão de REEE, reduzindo a poluição e protegendo o meio ambiente e a saúde pública.

REFERÊNCIAS

ALBUQUERQUE, Carlos Alberto; MELLO, Carlos Henrique Pereira; GOMES, José Henrique de Freitas; SANTOS, Valquíria Claret Dos; ZARA, Julia Vidigal. E-waste in the world today: An overview of problems and a proposal for improvement in Brazil. **Environmental Quality Management**, [S. l.], v. 29, n. 3, p. 63–72, 2020. DOI: 10.1002/tqem.21682. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/tqem.21682>.

ALVES, Roberta; FERREIRA, Karen Lana Alves; LIMA, Renato da Silva; MORAES, Flavia Tuane Ferreira. An Action Research Study for Elaborating and Implementing an Electronic Waste Collection Program in Brazil. **Systemic Practice and Action Research**, [S. l.], v. 34, n. 1, p. 91–108, 2021. DOI: 10.1007/s11213-019-09509-5. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/s11213-019-09509-5>.

ANTUNES, N. M. C.; Avaliação do risco em ativos físicos baseada numa metodologia Fuzzy-FMEA. Diss. Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, 2020.

ARAUJO, D. R. R.; DE OLIVEIRA, J. D.; SELVA, V. F.; SILVA, M. M.; SANTOS, S. M. Generation of domestic waste electrical and electronic equipment on Fernando de Noronha Island: qualitative and quantitative aspects. **Environmental Science and Pollution Research**, [S. l.], v. 24, n. 24, p. 19703–19713, 2017. DOI: 10.1007/s11356-017-9648-3.

AUGUSTO, ERYKA E. FERNANDES; DEMAJOROVIC, JACQUES; MELGAREJO-MORENO, JOAQUÍN. THE IMPACT OF COOPERATION ON THE IMPLEMENTATION OF THE ‘DESCARTE ON’ WEEE REVERSE LOGISTICS PILOT PROJECT IN BRAZIL. In: 2018, **Anais [...]**. [s.l.: s.n.] p. 269–280. DOI: 10.2495/UG180251. Disponível em: <http://library.witpress.com/viewpaper.asp?pcode=UG18-025-1>.

AZEVEDO, Luís P.; ARAÚJO, Fernando Gabriel da S.; LAGARINHOS, Carlos Alberto F.; TENÓRIO, Jorge Alberto S.; ESPINOSA, Denise C. R. Resource Recovery From E-waste for Environmental Sustainability: A Case Study in Brazil. In: **Electronic Waste Management and Treatment Technology**. [s.l.] : Elsevier, 2019. p. 175–200. DOI: 10.1016/B978-0-12-816190-6.00008-X. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B978012816190600008X>.

AZEVEDO, Luís Peres; DA SILVA ARAÚJO, Fernando Gabriel; LAGARINHOS, Carlos Alberto Ferreira; TENÓRIO, Jorge Alberto Soares; ESPINOSA, Denise Crocce Romano. E-waste management and sustainability: a case study in Brazil. **Environmental Science and Pollution Research**, [S. l.], v. 24, n. 32, p. 25221–25232, 2017. DOI: 10.1007/s11356-017-0099-7.

BAI, Chunguang; SARKIS, Joseph. A grey-based DEMATEL model for evaluating business process management critical success factors. **International Journal of Production Economics**, [S. l.], v. 146, n. 1, p. 281–292, 2013. DOI: 10.1016/j.ijpe.2013.07.011. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S092552731300323X>.

BHATTACHARJEE, Prattusha; HOWLADER, Ihan; RAHMAN, Md. Adib; TAQI, Hasin Md. Muhtasim; HASAN, Md. Tuba; ALI, Syed Mithun; ALGHABABSHEH, Mohammad. Critical success factors for circular economy in the waste electrical and electronic equipment sector in an emerging economy: Implications for stakeholders. **Journal of Cleaner Production**, [S. l.], v. 401, p. 136767, 2023. DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.136767. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652623009253>.

BRASIL. **DECRETO Nº 10.240, DE 12 DE FEVEREIRO DE 2020 - Regulamenta o inciso VI do caput do art. 33 e o art. 56 da Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, e complementa o Decreto nº 9.177, de 23 de outubro de 2017, quanto à implementação de sistema de logística re.** [s.l.: s.n.]. Disponível em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/decreto-n-10.240-de-12-de-fevereiro-de-2020-243058096>.

CAETANO, Marcelo Oliveira; LEON, Lucas Ganzer De; PADILHA, Daiane Westphal; GOMES, Luciana Paulo. Análises de risco na operação de usinas de reciclagem de resíduos eletroeletrônicos (REEE). **Gestão & Produção**, [S. l.], v. 26, n. 2, p. 1–12, 2019. DOI: 10.1590/0104-530x3018-19.

CAMPOLINA, Juliana Mendes; SÃO LEANDRO SIGRIST, Carolina; FAULSTICH DE PAIVA, Jane Maria; OLIVEIRA NUNES, Andréa; DA SILVA MORIS, Virgínia Aparecida. A study on the environmental aspects of WEEE plastic recycling in a Brazilian company. **International Journal of Life Cycle Assessment**, [S. l.], v. 22, n. 12, p. 1957–1968, 2017. DOI: 10.1007/s11367-017-1282-2.

CENCI, Marcelo Pilotto; DAL BERTO, Frederico Christ; CASTILLO, Bianca Wurlitzer; VEIT, Hugo Marcelo. Precious and critical metals from wasted LED lamps: characterization and evaluation. **Environmental Technology**, [S. l.], v. 43, n. 12, p. 1870–1881, 2022. DOI: 10.1080/09593330.2020.1856939. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/09593330.2020.1856939>.

DA SILVA, José Rocha Andrade; PIMENTEL, Marcos; ELEUTÉRIO, Sebastião; AUGUSTO, José; COSTA, Mariana Araújo; BRAGA, Mariana; BEZANA, Thiago; ROCHA, Tiago Barreto; PERESSINOTTO, Valdirene. Rematronic. In: PROCEEDINGS OF THE 7TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON MANAGEMENT OF COMPUTATIONAL AND COLLECTIVE INTELLIGENCE IN DIGITAL ECOSYSTEMS 2015, New York, NY, USA. **Anais [...]**. New York, NY, USA: ACM, 2015. p. 221–227. DOI: 10.1145/2857218.2857268. Disponível em: <https://dl.acm.org/doi/10.1145/2857218.2857268>.

DAMASCENO, Odilaine I. C.; REIS, César; REIS, Efraim L.; BELLATO, Carlos R.; DE OLIVEIRA, André F. Modelling of lead migration from electronic waste to mixtures of kaolinite, iron oxides and organic matter. **Journal of the Brazilian Chemical Society**, [S. l.], v. 27, n. 5, p. 877–883, 2016. DOI: 10.5935/0103-5053.20150340.

DE OLIVEIRA NETO, Geraldo Cardoso; DE JESUS CARDOSO CORREIA, Auro; SCHROEDER, Adriano Michelotti. Economic and environmental assessment of recycling and reuse of electronic waste: Multiple case studies in Brazil and Switzerland. **Resources, Conservation and Recycling**, [S. l.], v. 127, n. April, p. 42–55, 2017. DOI: 10.1016/j.resconrec.2017.08.011. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.08.011>.

DE OLIVEIRA NETO, José Francisco; MONTEIRO, Marcones; SILVA, Maisa Mendonça; MIRANDA, Rodrigo; SANTOS, Simone Machado. Household practices regarding e-waste management: A case study from Brazil. **Environmental Technology & Innovation**, [S. l.], v. 28, p. 102723, 2022. DOI: 10.1016/j.eti.2022.102723. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2352186422002358>.

DE OLIVEIRA NETO, José Francisco; SILVA, Maisa Mendonça; MACHADO SANTOS, Simone. A Mini-Review of E-Waste Management in Brazil: Perspectives and Challenges. **Clean - Soil, Air, Water**, [S. l.], v. 47, n. 9, p. 1–10, 2019. DOI: 10.1002/clen.201900152.

DE SOUZA, R. G.; CLÍMACO, J. C. N.; SANT'ANNA, A. P.; ROCHA, T. B.; DO VALLE, R. D. A. B.; QUELHAS, O. L. G. Sustainability assessment and prioritisation of e-waste management options in Brazil. **Waste Management**, [S. l.], v. 57, p. 46–56, 2016. DOI: 10.1016/j.wasman.2016.01.034.

DEMAJOROVIC, JACQUES; AUGUSTO, ERYKA EUGÊNIA FERNANDES; SOUZA, MARIA TEREZA SARAIVA DE. Reverse Logistics of E-Waste in Developing Countries: Challenges and Prospects for the Brazilian Model. **Ambiente & Sociedade**, [S. l.], v. 19, n. 2, p. 117–136, 2016. DOI: 10.1590/1809-4422ASOC141545V1922016. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1414-753X2016000200117&lng=en&tlng=en.

DIAS, Pablo; DE OLIVEIRA, Erich; VEIT, Hugo. Lead hazard evaluation for cathode ray tube monitors in Brazil. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, [S. l.], v. 35, n. 1, p. 43–49, 2018. DOI: 10.1590/0104-6632.20180351s20160367.

DIAS, Pablo; MACHADO, Arthur; HUDA, Nazmul; BERNARDES, Andréa Moura. Waste electric and electronic equipment (WEEE) management: A study on the Brazilian recycling routes. **Journal of Cleaner Production**, [S. l.], v. 174, p. 7–16, 2018. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.10.219. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652617325295>.

DIESTE, Marcos; VIAGI, Arcione Ferreira; PANIZZOLO, Roberto; SANTOS, Reinaldo Fagundes Dos; MARINS, Fernando Augusto Silva. Reverse logistics models for the collection of Waste Electrical and Electronic Equipment: the Brazilian case. In: 2018 INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRODUCTION AND OPERATIONS MANAGEMENT SOCIETY (POMS) 2018, **Anais [...]**. : IEEE, 2018. p. 1–8. DOI: 10.1109/POMS.2018.8629480. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8629480/>.

ECHEGARAY, Fabián. Consumers' reactions to product obsolescence in emerging markets: the case of Brazil. **Journal of Cleaner Production**, [S. l.], v. 134, p. 191–203, 2016. DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.08.119. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652615012202>.

ECHEGARAY, Fabian; HANSSTEIN, Francesca Valeria. Assessing the intention-behavior gap in electronic waste recycling: the case of Brazil. **Journal of Cleaner Production**, [S. l.], v. 142, p. 180–190, 2017. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.05.064.

FERREIRA, Vivian Fernandes Marinho; GONÇALVES-DIAS, Sylmara Lopes Francelino; VALLIN, Isabella De Carvalho. Inclusion of waste pickers in the reverse logistics of Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE) – the case study of Projeto Eco Eletro. **Desenvolvimento e Meio Ambiente**, [S. l.], v. 51, 2019. DOI: 10.5380/dma.v51i0.59970. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/made/article/view/59970>.

FETANAT, Abdolvahhab; TAYEBI, Mohsen; SHAFIPOUR, Gholamreza. Management of waste electrical and electronic equipment based on circular economy strategies: navigating a sustainability transition toward waste management sector. **Clean Technologies and Environmental Policy**, [S. l.], v. 23, n. 2, p. 343–369, 2021. DOI: 10.1007/s10098-020-02006-7. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/s10098-020-02006-7>.

FORTI, Vanessa; BALDÉ, Cornelis Peter; KUEHR, Ruediger; BE, Garam. **The Global E-waste**

Monitor 2020 - Quantities, flows, and circular economy potencial. Bonn/Geneva/Rotterdam: United Nations University (UNU)/United Nations Institute for Training and Research (UNITAR) – co-hosted SCYCLE Programme, International Telecommunication Union (ITU) & International Solid Waste Association (ISWA), 2020.

FRANCO, Rosana Gonçalves Ferreira; LANGE, Liséte Celina. Estimativa fluxo REEE em BH. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, [S. l.], v. 16, n. 1, p. 73–82, 2011. DOI: 10.1590/S1413-41522011000100011. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/esa/v16n1/a11v16n1.pdf%5Cnhttp://www.smarh.eng.ufmg.br/de-fesas/428M.PDF>.

GHISOLFI, V.; DINIZ CHAVES, G. D. L.; RIBEIRO SIMAN, R.; XAVIER, L. H. System dynamics applied to closed loop supply chains of desktops and laptops in Brazil: A perspective for social inclusion of waste pickers. **Waste Management**, [S. l.], v. 60, p. 14–31, 2017. DOI: 10.1016/j.wasman.2016.12.018.

HIRAYAMA, Denise; SARON, Clodoaldo. Characterisation of recycled acrylonitrile-butadiene-styrene and high-impact polystyrene from waste computer equipment in Brazil. **Waste Management and Research**, [S. l.], v. 33, n. 6, p. 543–549, 2015. DOI: 10.1177/0734242X15584845.

JANGRE, Jogendra; PRASAD, Kanika; PATEL, Dharmendra. Analysis of barriers in e-waste management in developing economy: an integrated multiple-criteria decision-making approach. **Environmental Science and Pollution Research**, [S. l.], v. 29, n. 48, p. 72294–72308, 2022. DOI: 10.1007/s11356-022-21363-y. Disponível em: <https://link.springer.com/10.1007/s11356-022-21363-y>.

KARUPPIAH, Koppiahraj; SANKARANARAYANAN, Bathrinath. An integrated multi-criteria decision-making approach for evaluating e-waste mitigation strategies. **Applied Soft Computing**, [S. l.], v. 144, p. 110420, 2023. DOI: 10.1016/j.asoc.2023.110420. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1568494623004386>.

KASPER, Angela C.; BERSELLI, Guilherme B. T.; FREITAS, Bruno D.; TENÓRIO, Jorge A. S.; BERNARDES, Andréa M.; VEIT, Hugo M. Printed wiring boards for mobile phones: Characterization and recycling of copper. **Waste Management**, [S. l.], v. 31, n. 12, p. 2536–2545, 2011. DOI: 10.1016/j.wasman.2011.08.013. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0956053X11003734>.

KAZANÇOĞLU, Yigit; ADA, Erhan; ÖZTURKOĞLU, Yucel; ÖZBİLTEKİN, Melisa. Analysis of the barriers to urban mining for resource melioration in emerging economies. **Resources Policy**, [S. l.], v. 68, p. 101768, 2020. DOI: 10.1016/j.resourpol.2020.101768. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301420720302130>.

KUMAR, A.; DIXIT, G. Evaluating critical barriers to implementation of WEEE management using DEMATEL approach. **Resources, Conservation and Recycling**, [S. l.], v. 131, p. 101–121, 2018. a. DOI: 10.1016/j.resconrec.2017.12.024.

KUMAR, Ashwani; DIXIT, Gaurav. An analysis of barriers affecting the implementation of e-waste management practices in India: A novel ISM-DEMATEL approach. **Sustainable Production and Consumption**, [S. l.], v. 14, p. 36–52, 2018. b. DOI: 10.1016/j.spc.2018.01.002. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2352550918300113>.

KUMAR, Ashwani; GAUR, Diptanshu; LIU, Yang; SHARMA, Dheeraj. Sustainable waste electrical and electronic equipment management guide in emerging economies context: A structural model approach. **Journal of Cleaner Production**, [S. l.], v. 336, p. 130391, 2022. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.130391. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652622000373>.

LIMA, Arthur Braga; ROCHA, Tiago; PIMENTEL, Marcos; FEICHAS, Luiz. The Brazilian government efforts to support electronic recycling facilities to comply with environmental sound practices. In: 2016 ELECTRONICS GOES GREEN 2016+ (EGG) 2016, **Anais [...]**. : IEEE, 2016. p. 1–8. DOI: 10.1109/EGG.2016.7829837. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7829837/>.

LOPES DOS SANTOS, K. The recycling of e-waste in the Industrialised Global South: the case of Sao Paulo Macrometropolis. **International Journal of Urban Sustainable Development**, [S. l.], p. 1–14, 2020. DOI: 10.1080/19463138.2020.1790373.

MAHANTH, T.; SURYASEKARAN, C. R.; PONNAMBALAM, S. G.; SANKARANARAYANAN, Bathrinath; KARUPPIAH, Koppiahraj; NIELSEN, Izabela Ewa. Modelling the Barriers to Circular Economy Practices in the Indian State of Tamil Nadu in Managing E-Wastes to Achieve Green Environment. **Sustainability**, [S. l.], v. 15, n. 5, p. 4224, 2023. DOI: 10.3390/su15054224. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/15/5/4224>.

MARTINS, Thamiris Auxiliadora Gonçalves; FALCONI, Isabela Brandolis Alves; PAVOSKI, Giovani; DE MORAES, Viviane Tavares; GALLUZZI BALTAZAR, Marcela dos Passos; ESPINOSA, Denise Croce Romano. Green synthesis, characterization, and application of copper nanoparticles obtained from printed circuit boards to degrade mining surfactant by Fenton process. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, [S. l.], v. 9, n. 6, p. 106576, 2021. DOI: 10.1016/j.jece.2021.106576. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2213343721015530>.

MOURA, J. M. B. M.; GOHR PINHEIRO, I.; CARMO, J. L. Gravimetric composition of the rejects coming from the segregation process of the municipal recyclable wastes. **Waste Management**, [S. l.], v. 74, p. 98–109, 2018. DOI: 10.1016/j.wasman.2018.01.011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.01.011>.

OLIVEIRA, José Diego; NETO, José Francisco de Oliveira; MENDONÇA SILVA, Maisa; SANTOS, Simone Machado. E-Waste Mistakenly Disposed of as Recyclable Waste: A Case Study from Brazil. **CLEAN – Soil, Air, Water**, [S. l.], v. 48, n. 11, p. 2000115, 2020. DOI: 10.1002/clen.202000115. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/clen.202000115>.

REICHERT, Geraldo Antônio; MENDES, Carlos André Bulhões. Avaliação do ciclo de vida e apoio à decisão em gerenciamento integrado e sustentável de resíduos sólidos urbanos. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, [S. l.], v. 19, n. 3, p. 301–313, 2014. DOI: 10.1590/S1413-41522014019000001145. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1413-41522014000300301&lng=pt&tlng=pt.

RODRIGUES, Angela Cassia; GUNTHER, Wanda Maria Risso; BOSCOV, Maria Eugenia Gimenez. Estimativa da geração de resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos de origem domiciliar: proposição de método e aplicação ao município de São Paulo, São Paulo, Brasil.

Engenharia Sanitaria e Ambiental, [S. l.], v. 20, n. 3, p. 437–447, 2015. DOI: 10.1590/s1413-41522015020000133701.

ROY, Bernard; VINCKE, Philippe. Multicriteria analysis: survey and new directions. **European Journal of Operational Research**, [S. l.], v. 8, n. 3, p. 207–218, 1981. DOI: 10.1016/0377-2217(81)90168-5. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0377221781901685>.

RUBIN, Ricardo Soares; CASTRO, Marco Aurélio Soares De; BRANDÃO, Dennis; SCHALCH, Valdir; OMETTO, Aldo Roberto. Utilization of Life Cycle Assessment methodology to compare two strategies for recovery of copper from printed circuit board scrap. **Journal of Cleaner Production**, [S. l.], v. 64, p. 297–305, 2014. DOI: 10.1016/j.jclepro.2013.07.051. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.07.051>.

SANTOS, Simone Machado; OGUNSEITAN, Oladele A. E-waste management in Brazil: Challenges and opportunities of a reverse logistics model. **Environmental Technology & Innovation**, [S. l.], v. 28, p. 102671, 2022. DOI: 10.1016/j.eti.2022.102671. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2352186422002085>.

SANTOS, Simone Machado; SILVA, Maisa Mendonça; MELO, Renata Maciel; GAVAZZA, Savia; FLORENCIO, Lourdinha; KATO, Mario T. Multi-criteria analysis for municipal solid waste management in a Brazilian metropolitan area. **Environmental Monitoring and Assessment**, [S. l.], v. 189, n. 11, 2017. DOI: 10.1007/s10661-017-6283-x.

SCHROEDER, Adriano Michelotti; DE OLIVEIRA NETO, Geraldo C.; DE SOUSA, Washington Carvalho; COSTA, Ivanir. Recycle and reuse process of e-waste (printed circuit boards) in Brazil. In: PROCEEDINGS OF THE 7TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON MANAGEMENT OF COMPUTATIONAL AND COLLECTIVE INTELLIGENCE IN DIGITAL ECOSYSTEMS 2015, New York, NY, USA. **Anais [...]**. New York, NY, USA: ACM, 2015. p. 214–220. DOI: 10.1145/2857218.2857267. Disponível em: <https://dl.acm.org/doi/10.1145/2857218.2857267>.

SCUR, Gabriela; BARBOSA, Mayara Emília. Green supply chain management practices: Multiple case studies in the Brazilian home appliance industry. **Journal of Cleaner Production**, [S. l.], v. 141, p. 1293–1302, 2017. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.09.158. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.09.158>.

SHAIK, Mohammed Najeeb; ABDUL-KADER, Walid. Comprehensive performance measurement and causal-effect decision making model for reverse logistics enterprise. **Computers & Industrial Engineering**, [S. l.], v. 68, p. 87–103, 2014. DOI: 10.1016/j.cie.2013.12.008. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360835213003884>.

SHARMA, Manu; JOSHI, Sudhanshu; KUMAR, Ashwani. Assessing enablers of e-waste management in circular economy using DEMATEL method: An Indian perspective. **Environmental Science and Pollution Research**, [S. l.], v. 27, n. 12, p. 13325–13338, 2020. DOI: 10.1007/s11356-020-07765-w.

SIGRIST, Carolina São Leandro; BRITO, Luis Felipe Fonseca; VEIGA, Juliana Mendes; PAIVA, Jane Maria Faulstich; MORIS, Virgínia Aparecida Silva. Desenvolvimento de ponto de coleta de resíduos eletroeletrônicos. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**,

[S. l.], v. 19, n. 2, p. 1423–1438, 2015.

SILVA, Marcelle de Fátima Da; DUTRA, Achilles Junqueira Bourdot; MANSUR, Marcelo Borges. Enrichment of Copper, Lead, and Tin by Mechanical Dry Processing of Obsolete Printed Circuit Board Residues. **Materials Research**, [S. l.], v. 22, n. 5, 2019. DOI: 10.1590/1980-5373-mr-2019-0341. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1516-14392019000500213&tlng=en.

SILVA, Walner Costa; DE SOUZA CORRÊA, Roger; DA SILVA, Calvin Sampaio Moreira; AFONSO, Júlio Carlos; DA SILVA, Rubens Souza; VIANNA, Cláudio Augusto; MANTOVANO, José Luiz. Recovery of base metals, silicon and fluoride ions from mobile phone printed circuit boards after leaching with hydrogen fluoride and hydrogen peroxide mixtures. **Waste Management**, [S. l.], v. 78, p. 781–788, 2018. DOI: 10.1016/j.wasman.2018.06.049. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0956053X18304033>.

SILVAS, Flávia P. C.; JIMÉNEZ CORREA, Mónica M.; CALDAS, Marcos P. K.; DE MORAES, Viviane T.; ESPINOSA, Denise C. R.; TENÓRIO, Jorge A. S. Printed circuit board recycling: Physical processing and copper extraction by selective leaching. **Waste Management**, [S. l.], v. 46, p. 503–510, 2015. DOI: 10.1016/j.wasman.2015.08.030. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0956053X15300970>.

SOARES, Targieli dos Santos; SILVA, Maisa Mendonça; SANTOS, Simone Machado. A hybrid Grey-DEMATEL approach to identify barriers to the implementation of an end-of-life vehicle management system in Brazil. **Journal of Cleaner Production**, [S. l.], v. 386, p. 135791, 2023. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.135791. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652622053653>.

SOUZA, R. G.; ROSENHEAD, J.; SALHOFER, S. P.; VALLE, R. A. B.; LINS, M. P. E. Definition of sustainability impact categories based on stakeholder perspectives. **Journal of Cleaner Production**, [S. l.], v. 105, p. 41–51, 2015. DOI: 10.1016/j.jclepro.2014.09.051.

SOUZA, Ricardo Gabbay. E-waste situation and current practices in Brazil. In: **Handbook of Electronic Waste Management**. [s.l.] : Elsevier, 2020. p. 377–396. DOI: 10.1016/B978-0-12-817030-4.00009-7. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780128170304000097>.

THOKALA, Praveen; DUENAS, Alejandra. Multiple criteria decision analysis for health technology assessment. **Value in Health**, [S. l.], v. 15, n. 8, p. 1172–1181, 2012. DOI: 10.1016/j.jval.2012.06.015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jval.2012.06.015>.

TRIVEDI, Vibha; PANDEY, Krishan Kumar; TRIVEDI, Ashish. Analyzing the challenges of e-waste management practices in India during COVID-19. **Management of Environmental Quality: An International Journal**, [S. l.], v. 33, n. 6, p. 1611–1628, 2022. DOI: 10.1108/MEQ-12-2021-0273. Disponível em: <https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/MEQ-12-2021-0273/full/html>.

VALENTE, Daniel Baratieri; GUABIROBA, Ricardo César da Silva; CONEJERO, Marco Antonio; DA SILVA, Marcelino Aurélio Vieira; CÉSAR, Aldara da Silva. Economic analysis of waste electrical and electronic equipment management: a study involving recycling cooperatives in Brazil. **Environment, Development and Sustainability**, [S. l.], v. 23, n. 12, p. 17628–17649, 2021. DOI: 10.1007/s10668-021-01403-2. Disponível em:

<https://link.springer.com/10.1007/s10668-021-01403-2>.

VEIT, Hugo Marcelo; JUCHNESKI, Nichele Cristina de Freitas; SCHERER, Janine. Use of gravity separation in metals concentration from printed circuit board scraps. **Rem: Revista Escola de Minas**, [S. l.], v. 67, n. 1, p. 73–79, 2014. DOI: 10.1590/S0370-44672014000100011. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0370-44672014000100011&lng=en&tlng=en.

8 CONCLUSÕES GERAIS

Desde a década de 1970, o conceito de economia circular tem sido explorado para abordar os desafios de integração entre meio ambiente, setor industrial e sociedade. No campo dos REEE a produção científica iniciou em 2006 e, notadamente intensificada a partir de 2015, o que reflete um crescente interesse global. Os estudos enfatizam temas como reciclagem, reutilização e recuperação de materiais dos REEE, destacando que tecnologias existentes podem alcançar bons índices de recuperação. Previsões indicam um foco futuro em novas tecnologias para a recuperação de metais e matérias-primas críticas. A extensão da vida útil de EEE e a sustentabilidade, especialmente para pequenos eletrodomésticos, são áreas de atenção. No entanto, o baixo índice de coleta de REEE e sua complexa composição são desafios para a gestão adequada. A inovação tecnológica, embora possa complicar a situação, é também vista como parte da solução, exigindo o desenvolvimento de tecnologias mais limpas. A gestão eficaz dos REEE é complexa, envolvendo diversas partes interessadas e exigindo a integração de instrumentos jurídicos, econômicos e sociais.

O desafio futuro para os decisores é aplicar a circularidade dos materiais na hierarquia da gestão dos REEE, considerando os resíduos como recursos valorizáveis com importante valor econômico agregado.

Nesse sentido, a recuperação de metais nas PCIs, a partir dos REEE gerados no Brasil, pode gerar uma receita acumulada de aproximadamente 4,2 bilhões de dólares americanos. Entre os metais mais rentáveis, destacam-se: ouro, paládio, cobre e prata. Quanto aos EEE, notebooks, TVs LCD, celulares e unidades de sistema de PC desktop são identificados como as principais fontes secundárias desses metais. Além disso, a reciclagem desses metais resulta em benefícios ambientais significativos, com poupanças de emissões de CO₂ e energia.

Apesar dos avanços científicos e normativos, o Brasil ainda possui barreiras à recuperação completa dos materiais valiosos presentes nos REEE em território nacional. O gerenciamento de REEE no país demanda atenção imediata e ação coordenada, considerando desafios relacionados ao conhecimento técnico, a tecnologia, ao controle da poluição, aos custos e ao comportamento do consumidor.

Apesar desses obstáculos, há sinais positivos, como a crescente conscientização pública impulsionada pela emergência climática divulgada pela mídia. Faz-se necessário o Brasil aproveitar as pesquisas existentes e implementar políticas

e regulamentações já estabelecidas, enfatizando a colaboração entre governo, indústria, organizações de reciclagem e consumidores como essencial para superar esses desafios. A ação coordenada, baseada em decisões conscientes e políticas eficazes, é vista como crucial para enfrentar efetivamente os problemas relacionados à gestão de REEE, visando a redução da poluição e a proteção do meio ambiente e da saúde pública.

REFERÊNCIAS

- ABDELBASIR, S. M. et al. Status of electronic waste recycling techniques : a review. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 25, n. 2018, p. 16533–16547, 2018.
- ABINEE. **Panorama Econômico e Desempenho Setorial 2020**. Disponível em: <http://www.abinee.org.br/programas/50anos/public/panorama/2021/>. Acesso em: dia mes ano
- AGÊNCIA BRASILEIRA DE DESENVOLVIMENTO INDUSTRIAL. **Logística reversa de equipamentos eletroeletrônicos análise de viabilidade técnica e econômica**. Brasília, DF: ABDI, 2013. p. 177.
- ALAVI, N. et al. Waste electrical and electronic equipment (WEEE) estimation: A case study of Ahvaz City, Iran. **Journal of the Air and Waste Management Association**, v. 65, n. 3, p. 298–305, 2015.
- ANDRAE, A. S. G. Collection rate and reliability are the main sustainability determinants of current fast-paced, small, and short-lived ICT products. **WSEAS Transactions on Environment and Development**, v. 14, p. 531–540, 2018.
- ANDREWS, E. S. **Guidelines for social life cycle assessment of products**: social and socio-economic LCA guidelines complementing environmental LCA and Life Cycle Costing, contributing to the full assessment of goods and services within the context of sustainable developme. [Nairobi, Kenya]: UNEP/Earthprint, 2009.
- APARCANA, S.; SALHOFER, S. Application of a methodology for the social life cycle assessment of recycling systems in low income countries: three Peruvian case studies. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 18, n. 5, p. 1116–1128, 27 jun. 2013.
- ARAÚJO, D. R. R. et al. Generation of domestic waste electrical and electronic equipment on Fernando de Noronha Island: qualitative and quantitative aspects. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 24, n. 24, p. 19703–19713, 2017.
- ARAÚJO, M. G. et al. A model for estimation of potential generation of waste electrical and electronic equipment in Brazil. **Waste Management**, v. 32, n. 2, p. 335–342, 2012.
- AWASTHI, A. K. et al. Evaluating waste printed circuit boards recycling: Opportunities and challenges, a mini review. **Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy**, v. 35, n. 4, p. 346–356, 18 abr. 2017.
- AWASTHI, A. K.; CUCCHIELLA, F.; D'ADAMO, I.; LI, J.; ROSA, P.; TERZI, S.; WEI, G.; ZENG, X. Modelling the correlations of e-waste quantity with economic increase. **Science of the Total Environment**, [S. l.], v. 613–614, p. 46–53, 2018. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.08.288.
- AWASTHI, A. K.; ZENG, X.; LI, J. Environmental pollution of electronic waste

recycling in India: A critical review. **Environmental Pollution**, v. 211, p. 259–270, 2016.

AZIMI, A. N.; DENTE, S. M. R.; HASHIMOTO, S. Social Life-Cycle Assessment of Household Waste Management System in Kabul City. **Sustainability**, v. 12, n. 8, p. 3217, 16 abr. 2020.

BABAYEMI, J. O.; OSIBANJO, O.; WEBER, R. Material and substance flow analysis of mobile phones in Nigeria: a step for progressing e-waste management strategy. **Journal of Material Cycles and Waste Management**, [S. l.], v. 19, n. 2, p. 731–742, 2017. DOI: 10.1007/s10163-016-0472-5.

BALDÉ, C. P., FORTI, V., GRAY, V., KUEHR, R., STEGMANN, P. **The Global E-waste Monitor – 2017**, United Nations University (UNU), International Telecommunication Union (ITU) & International Solid Waste Association (ISWA), Bonn/Geneva/Vienna. [s.l.: s.n.].

BARBA-GUTIÉRREZ, Y.; ADENSO-DÍAZ, B.; HOPP, M. An analysis of some environmental consequences of European electrical and electronic waste regulation. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 52, n. 3, p. 481–495, 2008.

BETTS, K. Producing usable materials from e-waste. **Environmental Science and Technology**, v. 42, n. 18, p. 6782–6783, 2008.

BIGUM, M.; BROGAARD, L.; CHRISTENSEN, T. H. Metal recovery from high-grade WEEE: A life cycle assessment. **Journal of Hazardous Materials**, v. 207–208, p. 8–14, 2012.

BORTHAKUR, A. Policy approaches on E-waste in the emerging economies: A review of the existing governance with special reference to India and South Africa. **Journal of Cleaner Production**, v. 252, p. 119885, 2020.

BOUZON, Marina; GOVINDAN, Kannan; RODRIGUEZ, Carlos M. Taboad.; CAMPOS, Lucila M. S. Identification and analysis of reverse logistics barriers using fuzzy Delphi method and AHP. **Resources, Conservation and Recycling**, [S. l.], v. 108, p. 182–197, 2016. DOI: 10.1016/j.resconrec.2015.05.021. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.05.021>.

BRASIL. Governo Federal. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. **Diário Oficial da União**, p. 2, 2010b.

BRASIL. Governo Federal. **Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010**.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Acordo setorial para implantação de sistema de logística reversa de produtos eletroeletrônicos de uso doméstico e seus componentes**. Disponível em: <https://www.mma.gov.br/images/AcordoSetorial/AcordoSetorial-Eletroeletronicos.pdf>. Acesso em: 21 set. 2020.

BRASIL. **Decreto nº 10.240, de 12 de fevereiro de 2020**. Regulamenta o inciso VI do caput do art. 33 e o art. 56 da Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, e complementa o Decreto nº 9.177, de 23 de outubro de 2017, quanto à implementação de sistema de logística re. [s.l.: s.n.]. Disponível em:

<<https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/decreto-n-10.240-de-12-de-fevereiro-de-2020-243058096>>.

CAMPOLINA, J. M. et al. A study on the environmental aspects of WEEE plastic recycling in a Brazilian company. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 22, n. 12, p. 1957–1968, 2017.

CESARO, A. et al. WEEE management in a circular economy perspective: An overview. **Global Nest Journal**, v. 20, n. 4, p. 743–750, 2018.

CHANCEREL, P. et al. Assessment of Precious Metal Flows During Preprocessing of Waste Electrical and Electronic Equipment. v. 13, n. 5, 2009.

CHARLES, R. G. et al. Platinized counter-electrodes for dye-sensitised solar cells from waste thermocouples: A case study for resource efficiency, industrial symbiosis and circular economy. **Journal of Cleaner Production**, v. 202, p. 1167–1178, 20 nov. 2018.

CHARLES, R. G. et al. Towards Increased Recovery of Critical Raw Materials from WEEE– evaluation of CRMs at a component level and pre-processing methods for interface optimisation with recovery processes. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 161, 2020.

CHUNG, S. SHAN; LAU, K. YAN; ZHANG, C. Generation of and control measures for, e-waste in Hong Kong. **Waste Management**, v. 31, n. 3, p. 544–554, 2011.

COBBING, M. **Toxic Tech: Not in Our Backyard. Uncovering the Hidden Flows of e-waste**. Amsterdam: [s.n.]. Disponível em: <<http://www.greenpeace.org/raw/content/Belgium/fr/press/rports/toxic-tech.pdf>>.

COLE, Christine; GNANAPRAGASAM, Alex; COOPER, Tim; SINGH, Jagdeep. An assessment of achievements of the WEEE Directive in promoting movement up the waste hierarchy: experiences in the UK. **Waste Management**, [S. l.], v. 87, p. 417–427, 2019. DOI: 10.1016/j.wasman.2019.01.046.

COSTA, D.; QUINTEIRO, P.; DIAS, A. C. A systematic review of life cycle sustainability assessment: Current state, methodological challenges, and implementation issues. **Science of the Total Environment**, v. 686, p. 774–787, 2019.

DE SOUZA, R. G. et al. Sustainability assessment and prioritisation of e-waste management options in Brazil. **Waste Management**, p. 1–11, 2016.

DENG, W. J. et al. Distribution of PBDEs in air particles from an electronic waste recycling site compared with Guangzhou and Hong Kong, South China. **Environment International**, v. 33, n. 8, p. 1063–1069, 2007.

DEUS, R. M.; BATTISTELLE, R. A. G.; SILVA, G. H. R. Current and future environmental impact of household solid waste management scenarios for a region of Brazil: carbon dioxide and energy analysis. **Journal of Cleaner Production**, v. 155, p. 218–228, jul. 2017.

DUAN, H. et al. Life cycle assessment of a Chinese desktop personal computer. **Science of the Total Environment**, v. 407, p. 1755–1764, 2009.

EEA. **Waste from electrical and electronic equipment (WEEE)** - quantities, dangerous substances and treatment methods European Environment Agency. Copenhagen: [s.n.].

ERIKSSON, O. et al. Municipal solid waste management from a systems perspective. **Journal of Cleaner Production**, v. 13, n. 3, p. 241–252, fev. 2005.

EU. **Closing the loop** - an EU action plan for the Circular Economy COM/2015/0614 final. Disponível em: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52015DC0614>.

EU. **On the implementation of the Circular Economy Action Plan**. Disponível em: https://ec.europa.eu/environment/circular-economy/implementation_report.pdf. Acesso em: 21 set. 2020.

EU. **The Waste Framework Directive** - Directive 2008/98/EC Of The European Parliament And Of The Council Of 19 November 2008 On Waste And Repealing Certain Directives. Disponível em: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A02008L0098-20180705>.

FARR, J. V. **Systems lifecycle costing: Economic analysis, estimation, and management**. [s.l.: s.n.].

FINKBEINER, M. et al. Towards life cycle sustainability assessment. **Sustainability**, v. 2, n. 10, p. 3309–3322, 2011.

FORTI, V. et al. **The Global E-waste Monitor 2020 - Quantities, flows, and circular economy potencial**. Bonn/Geneva/Rotterdam: United Nations University (UNU)/United Nations Institute for Training and Research (UNITAR) – co-hosted SCYCLE Programme, International Telecommunication Union (ITU) & International Solid Waste Association (ISWA), 2020.

FRANCO, R. G. F.; LANGE, L. C. Estimativa fluxo REEE em BH. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 16, n. 1, p. 73–82, 2011.

FU, J., ZHOU, Q., LIU, J., LIU, W., WANG, T., Z.; Q., JIANG, G. High levels of heavy metals in rice (*Oryza sativa* L.) from a typical E-waste recycling area in Southeast China and its potential risk to human health. **Chemosphere**, v. 71, 2008.

GARLAPATI, V. K. E-waste in India and developed countries : Management , recycling , business and biotechnological initiatives. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 54, p. 874–881, 2016.

GÖK, G.; TULUN, Ş.; GÜRBÜZ, O. A. Consumer Behavior and Policy About E-Waste in Aksaray and Niğde Cities, Turkey. **Clean - Soil, Air, Water**, v. 45, n. 7, 2017.

GOULART COELHO, L. M.; LANGE, L. C. Applying life cycle assessment to support environmentally sustainable waste management strategies in Brazil. **Resources**,

Conservation and Recycling, v. 128, p. 438–450, 2018.

GRDIC, Z. S.; NIZIC, M. K.; RUDAN, E. Circular economy concept in the context of economic development in EU countries. **Sustainability (Switzerland)**, v. 12, n. 7, 2020.

GROOT, J. et al. A comprehensive waste collection cost model applied to post-consumer plastic packaging waste. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 85, p. 79–87, abr. 2014.

GUARNIERI, Patricia; E SILVA, Lucio Camara; LEVINO, Natallya A. Analysis of electronic waste reverse logistics decisions using Strategic Options Development Analysis methodology: A Brazilian case. **Journal of Cleaner Production**, [S. l.], v. 133, p. 1105–1117, 2016. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.06.025. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.06.025>.

GUPT, Y. Economic instruments and the efficient recycling of batteries in Delhi and the National Capital Region of India. **Environment and Development Economics**, v. 20, n. 2, p. 236–258, 2014.

GWENZI, W. et al. Science of the Total Environment Sources , behaviour , and environmental and human health risks of high- technology rare earth elements as emerging contaminants. **Science of the Total Environment**, v. 636, p. 299–313, 2018.

HEACOCK, M.; KELLY, C. B.; SUK, W. A. E-waste : the growing global problem and next steps. **Environmental Health**, p. 1–5, 2016.

HOORNWEG, D.; BHADA-TATA, P. **What a waste: a global review of solid waste management**. [s.l.] knowledge papers no. 15. World Bank, Washington, DC., 2012.

HUNKELER, D.; LICHTENVORT, K.; REBITZER, G. **Environmental Life Cycle Costing**. [s.l.: s.n.]. v. 53

IBGE. **Censo demográfico de Recife**. Disponível em: <<http://cidades.ibge.gov.br/xtras/perfil.php?codmun=261160>>. Acesso em: 25 maio. 2019.

IŞILDAR, A. et al. Electronic waste as a secondary source of critical metals: Management and recovery technologies. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 135, p. 296–312, ago. 2018.

ISO. **ISO 14040: 2006**. Environmental management – life cycle assessment – principles and framework International Standardization Organisation, , 2006.

KAMA, K. Circling the economy: Resource-making and marketization in EU electronic waste policy. **Area**, v. 47, n. 1, p. 16–23, 2015.

KAYA, M. Industrial-Scale E-Waste/WPCB Recycling Lines. In: **Electronic Waste and Printed Circuit Board Recycling Technologies**. The Minerals, Metals & Materials Series. Cham: Springer International Publishing, 2019. p. 177–210.

KHANDELWAL, H. et al. Life cycle assessment of municipal solid waste management options for India. **Bioresource Technology**, v. 288, n. March, p. 121515, 2019.

KIDDEE, P.; NAIDU, R.; WONG, M. H. Electronic waste management approaches : An overview. **Waste Management**, v. 33, n. 5, p. 1237–1250, 2013a.

KLOEPFFER, W. Life cycle sustainability assessment of products. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 13, n. 2, p. 89–95, 2008.

KUMAR, L. et al. LIFE CYCLE ASSESSMENT (LCA) OF MOBILE PHONES. **International Journal of Current Research**, v. 9, n. 6, p. 52542–52546, 2017.

KUNZ, N.; MAYERS, K.; VAN WASSENHOVE, L. N. Stakeholder Views on Extended Producer Responsibility and the Circular Economy. **California Management Review**, v. 60, n. 3, p. 45–70, 2018.

LAU, W. K.-Y.; CHUNG, S.-S.; ZHANG, C. A material flow analysis on current electrical and electronic waste disposal from Hong Kong households. **Waste Management**, v. 33, n. 3, p. 714–721, 2013.

LAURENT, A. et al. Review of LCA studies of solid waste management systems – Part I : Lessons learned and perspectives. **Waste Management**, v. 34, n. 3, p. 573–588, 2014.

LEME, M. M. V. et al. Techno-economic analysis and environmental impact assessment of energy recovery from Municipal Solid Waste (MSW) in Brazil. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 87, p. 8–20, jun. 2014.

LI, J. et al. Life cycle assessment and life cycle cost analysis of recycled solid waste materials in highway pavement: A review. **Journal of Cleaner Production**, v. 233, p. 1182–1206, 2019.

LI, J., DUAN, H., SHI, P. Heavy metal contamination of surface soil in electronic waste dismantling area: site investigation and source-apportionment analysis. **Waste Management & Research**, 29, v. 7, p. 727–738, 2011.

LIIKANEN, M. et al. Steps towards more environmentally sustainable municipal solid waste management – A life cycle assessment study of São Paulo, Brazil. **Journal of Cleaner Production**, v. 196, p. 150–162, set. 2018.

LIMA, P. D. M. et al. Environmental assessment of existing and alternative options for management of municipal solid waste in Brazil. **Waste Management**, v. 78, p. 857–870, ago. 2018.

LODHIA, S.; MARTIN, N.; RICE, J. Extended Producer Responsibility for waste televisions and computers: A regulatory evaluation of the Australian experience. **Journal of Cleaner Production**, [S. l.], v. 164, p. 927–938, 2017. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.07.020.

MARGALLO, M. et al. Environmental sustainability assessment of the management of municipal solid waste incineration residues: a review of the current situation. **Clean**

Technologies and Environmental Policy, v. 17, n. 5, p. 1333–1353, 28 jun. 2015.

MARTINEZ-SANCHEZ, V.; KROMANN, M. A.; ASTRUP, T. F. Life cycle costing of waste management systems: Overview, calculation principles and case studies. **Waste Management**, v. 36, p. 343–355, fev. 2015.

MENIKPURA, S.; GHEEWALA, S. H.; BONNET, S. Framework for life cycle sustainability assessment of municipal solid waste management systems with an application to a case study in Thailand. **Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy**, v. 30, n. 7, p. 708–719, 16 jul. 2012.

MERSONI, C.; REICHERT, G. A. Comparação de cenários de tratamento de resíduos sólidos urbanos por meio da técnica da Avaliação do Ciclo de Vida: o caso do município de Garibaldi, RS. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 22, n. 5, p. 863–875, out. 2017.

NETO, J. C.; SILVA, M. M.; SANTOS, S. M. A time series model for estimating the generation of lead acid battery scrap. **Clean Technologies and Environmental Policy**, v. 18, n. 6, p. 1931–1943, 2016.

OLIVEIRA NETO, J. F. et al. QUANTIFICATION AND CHARACTERIZATION OF WASTE ELECTRICAL AND ELECTRONIC EQUIPMENT DISPOSAL: A CASE STUDY FROM BRAZIL. **Environmental Engineering and Management Journal**, no prelo, 2021.

OLIVEIRA NETO, J. F.; SILVA, M. M.; MACHADO SANTOS, S. A Mini-Review of E-Waste Management in Brazil: Perspectives and Challenges. **Clean - Soil, Air, Water**, v. 47, n. 9, p. 1–10, 2019.

OLIVEIRA, C. R. DE; BERNARDES, A. M.; GERBASE, A. E. Collection and recycling of electronic scrap: A worldwide overview and comparison with the Brazilian situation. **Waste Management**, v. 32, n. 8, p. 1592–1610, 2012.

OLOFSSON, J. K.; MALI, F. From Risk To Resource? E-Waste Management and the Concept of Circular Economy. **Teorija in Praksa**, v. 56, n. 3, p. 836–852, 2019.

ONGONDO, F. O.; WILLIAMS, I. D. Mobile phone collection, reuse and recycling in the UK. **Waste Management**, v. 31, n. 6, p. 1307–1315, 2011.

ONGONDO, F. O.; WILLIAMS, I. D.; CHERRETT, T. J. How are WEEE doing? A global review of the management of electrical and electronic wastes. **Waste Management**, v. 31, p. 714–730, 2011.

ONGONDO, F. O.; WILLIAMS, I. D.; CHERRETT, T. J. How are WEEE doing ? A global review of the management of electrical and electronic wastes. **Waste Management**, v. 31, n. 4, p. 714–730, 2011.

ONGONDO, F. O.; WILLIAMS, I. D.; WHITLOCK, G. Distinct Urban Mines: Exploiting secondary resources in unique anthropogenic spaces. **Waste Management**, [S. l.], v. 45, p. 4–9, 2015. DOI: 10.1016/j.wasman.2015.05.026.

ONU. **Transformando Nosso Mundo: A Agenda 2030 para o Desenvolvimento**

Sustentável. Disponível em: <<https://nacoesunidas.org/pos2015/agenda2030/>>. Acesso em: 5 set. 2020.

PARAJULY, K. et al. **Future e-waste scenarios**. 1. ed. [s.l.] United Nations University and UNEP-IETC, 2020.

PARAJULY, K.; WENZEL, H. Potential for circular economy in household WEEE management. **Journal of Cleaner Production**, v. 151, p. 272–285, maio 2017.

PEETERS, Jef R.; VANEGAS, Paul; KELLENS, Karel; WANG, Feng; HUISMAN, Jaco; DEWULF, Wim; DUFLOU, Joost R. Forecasting waste compositions: A case study on plastic waste of electronic display housings. **Waste Management**, [S. l.], v. 46, p. 28–39, 2015. DOI: 10.1016/j.wasman.2015.09.019. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2015.09.019>.

PERKINS, D. N. et al. E-Waste : A Global Hazard. **Annals of Global Health**, v. 80, n. 4, p. 286–295, 2014.

PNUD. **Ranking IDHM municípios 2010**. Disponível em: <<http://www.br.undp.org/content/brazil/pt/home/idh0/rankings/idhm-municipios-2010.html>>. Acesso em: 25 maio. 2019.

PUANGPRASERT, S.; PRUEKSASIT, T. Health risk assessment of airborne Cd, Cu, Ni and Pb for electronic waste dismantling workers in Buriram Province, Thailand. **Journal of Environmental Management**, v. 252, p. 109601, dez. 2019.

RAVINDRA, K.; MOR, S. E-waste generation and management practices in Chandigarh, India and economic evaluation for sustainable recycling. **Journal of Cleaner Production**, v. 221, p. 286–294, jun. 2019.

REICHERT, G. A.; MENDES, C. A. B. Avaliação do ciclo de vida e apoio à decisão em gerenciamento integrado e sustentável de resíduos sólidos urbanos. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 19, n. 3, p. 301–313, set. 2014.

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, 2009.

RODRIGUES, A. C. **Impactos Socioambientais dos Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos**: estudo da cadeia pós-consumo no Brasil. Santa Bárbara D’Oeste: UNIMEP, 2007.

RODRIGUES, A. C.; GUNTHER, W. M. R.; BOSCOV, M. E. G. Estimativa da geração de resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos de origem domiciliar: proposição de método e aplicação ao município de São Paulo, São Paulo, Brasil. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 20, n. 3, p. 437–447, 2015.

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.

SCHLUEP, M. et al. **e-Waste Assessment Methodology** - Training & Reference Manual Empa. St. Gallen: [s.n.].

SCHROEDER, P.; ANGGRAENI, K.; WEBER, U. The Relevance of Circular Economy Practices to the Sustainable Development Goals. **Journal of Industrial Ecology**, v. 23, n. 1, p. 77–95, 1 fev. 2019.

SCUR, G.; BARBOSA, M. E. Green supply chain management practices: Multiple case studies in the Brazilian home appliance industry. **Journal of Cleaner Production**, v. 141, p. 1293–1302, 2017.

SIGRIST, C. S. L. et al. Desenvolvimento de ponto de coleta de resíduos eletroeletrônicos. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, v. 19, n. 2, p. 1423–1438, 2015.

SONG, Q. et al. Life cycle assessment of desktop PCs in Macau. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 18, n. 3, p. 553–566, 2013.

TEERIOJA, N. et al. Pneumatic vs. door-to-door waste collection systems in existing urban areas: a comparison of economic performance. **Waste Management**, v. 32, n. 10, p. 1782–1791, out. 2012.

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

TUCCIO, G. et al. Mass balance as economic and sustainable strategy in WEEE sector. **Procedia Environmental Science, Engineering and Management**, v. 4, n. 3, p. 191–197, 2017.

UE. Diretiva 2012/19/UE do Parlamento Europeu e do Conselho de 4 de julho de 2012, relativa aos resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos (REEE). **Jornal Oficial da União Europeia**, 2012. Disponível em: <<http://eur-lex.europa.eu>>

UE. **Study on the EU's list of Critical Raw Materials (2020)**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <https://rmis.jrc.ec.europa.eu/uploads/CRM_2020_Report_Final.pdf>.

UMAIR, S.; BJÖRKLUND, A.; PETERSEN, E. E. Social impact assessment of informal recycling of electronic ICT waste in Pakistan using UNEP SETAC guidelines. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 95, p. 46–57, 2015.

UNEP. Developing Integrated Solid Waste Management Plan: Training Manual. **United Nations Environment Programme**, v. 3, p. 48, 2009.

UNEP/SETAC. **Guidelines for Social Life Cycle Assessment of Products**. Belgium: [s.n.].

WANG, F. et al. Enhancing e-waste estimates: Improving data quality by multivariate Input-Output Analysis. **Waste Management**, v. 33, n. 11, p. 2397–2407, 2013.

WIDMER, R. et al. Global perspectives on e-waste. **Environmental Impact Assessment Review**, v. 25, n. 5 SPEC. ISS., p. 436–458, 2005.

WONG, C., DUZGOREN-AYDIN, N., AYDIN, A., W.; M.H. Evidence of excessive releases of metals from primitive e-waste processing in Guiyu, China.

Environmental Pollution, v. 148, p. 62–72, 2007.

XAVIER, L. H. et al. Sustainability and the circular economy: A theoretical approach focused on e-waste urban mining. **Resources Policy**, 2019.

ZHENG, X. et al. Ambient Air Heavy Metals in PM_{2.5} and Potential Human Health Risk Assessment in an Informal Electronic-Waste Recycling Site of China. **Aerosol and Air Quality Research**, v. 16, p. 388–397, 2016.