



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO  
CENTRO TECNOLÓGICO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E DESENVOLVIMENTO  
SUSTENTÁVEL

SUZANA DAS NEVES SILVA

**DIRETRIZES E ESTRATÉGIAS PARA IMPLEMENTAÇÃO E  
OPERACIONALIZAÇÃO DO SISTEMA DE LOGÍSTICA REVERSA DE RESÍDUOS  
ELETROELETRÔNICOS EM MUNICÍPIOS BRASILEIROS DE PEQUENO PORTE**

VITÓRIA – ES  
2023

SUZANA DAS NEVES SILVA

**DIRETRIZES E ESTRATÉGIAS PARA IMPLEMENTAÇÃO E  
OPERACIONALIZAÇÃO DO SISTEMA DE LOGÍSTICA REVERSA DE RESÍDUOS  
ELETROELETRÔNICOS EM MUNICÍPIOS BRASILEIROS DE PEQUENO PORTE**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Desenvolvimento Sustentável da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial à obtenção de grau de Mestre em Engenharia e Desenvolvimento Sustentável.

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. D.Sc. Luciana Harue Yamane

VITÓRIA – ES  
2023

Ficha catalográfica disponibilizada pelo Sistema Integrado de  
Bibliotecas - SIBI/UFES e elaborada pelo autor

---

S586d Silva, Suzana das Neves, 1995-  
Diretrizes e estratégias para implementação e operacionalização  
do sistema de logística reversa de resíduos eletroeletrônicos em  
municípios brasileiros de pequeno porte / Suzana das Neves  
Silva. - 2023.  
119 f. : il.

Orientadora: Luciana Harue Yamane.

Coorientador: - -.

Dissertação (Mestrado em Engenharia e Desenvolvimento  
Sustentável) - Universidade Federal do Espírito Santo, Centro  
Tecnológico.

1. Resíduos eletroeletrônicos. 2. Logística Reversa. 3.  
Municípios de pequeno porte. 4. Desafios. I. Yamane, Luciana  
Harue. II. -, -. III. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro  
Tecnológico. IV. Título.

CDU: 628

---


**SUZANA DAS NEVES SILVA**

**DIRETRIZES E ESTRATÉGIAS PARA IMPLEMENTAÇÃO E OPERACIONALIZAÇÃO DO SISTEMA DE LOGÍSTICA REVERSA DE RESÍDUOS ELETROELETRÔNICOS EM MUNICÍPIOS BRASILEIROS DE PEQUENO PORTE**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Desenvolvimento Sustentável (Modalidade Profissional) da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia e Desenvolvimento Sustentável na área de concentração em Saneamento Ambiental e Saúde Pública.


Aprovada em 27 de outubro de 2023.

**COMISSÃO EXAMINADORA**

Documento assinado digitalmente  
 **LUCIANA HARUE YAMANE**  
Data: 30/10/2023 16:26:05-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>


---

**Prof<sup>ª</sup>. Dra. Luciana Harue Yamane**  
Orientadora - PPGES/CT/UFES

Documento assinado digitalmente  
 **RENATO RIBEIRO SIMAN**  
Data: 30/10/2023 16:30:48-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

**Prof. Dr. Renato Ribeiro Siman**  
Examinador Interno – PPGES/CT/UFES

Documento assinado digitalmente  
 **LUCIA HELENA DA SILVA MACIEL XAVIER**  
Data: 31/10/2023 14:54:46-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

**Prof<sup>ª</sup>. Dra. Lúcia Helena Xavier**  
Examinadora Externa – CETEM

**Prof<sup>ª</sup>. Dra. Luciana Harue Yamane**  
PPGES/CT/UFES

À Deus e à minha família.

## **AGRADECIMENTOS**

Em primeiro lugar, Deus é bom. Agradeço à Ele por me sustentar todos os dias e me mostrar o seu amor. Tudo Dele, por Ele e para Ele;

Agradeço aos meus pais, meus irmãos, minhas cunhadas e lindos sobrinhos por todo apoio e suporte. Vocês são a minha base, sem vocês seria impossível;

Agradeço à minha orientadora Prof<sup>a</sup>. D.Sc. Luciana Harue Yamane pela disposição nessa jornada de orientação que vem desde a graduação com IC, TCC e agora com o mestrado. Obrigada por sua disponibilidade, ensinamentos, correções, conselhos e por ser um exemplo inspirador.

Meu agradecimento também ao Prof. D.Sc. Renato Ribeiro Siman por me impulsionar, aconselhar e sempre apoiar. Obrigada por me acolher através do Laboratório de Gestão do Saneamento Ambiental (Lagesa) há anos e me fazer crescer academicamente e profissionalmente.

Não posso deixar de agradecer a todos os colegas do Lagesa e do PPGES, especialmente Fernanda, Hendrigo, Juliana, Tânia, Yasmim e Luana pelo convívio diário e descontraído. Obrigada por todas as histórias e risadas;

Por fim, agradeço a todos os demais não mencionados aqui, mas que de alguma forma contribuíram para a realização desse trabalho.

*“A única forma de chegar ao impossível é acreditar que é possível”.*

**Alice no País das Maravilhas, de Lewis Carroll**

## RESUMO

Esta dissertação aborda a complexa gestão de resíduos de equipamentos eletroeletrônicos (REEE) com foco em municípios de pequeno porte. O crescimento na geração de REEE em todo o mundo representa um desafio significativo, com particularidades nas operações logísticas reversas devido à sua natureza heterogênea e à presença de componentes valiosos e perigosos. Países desenvolvidos lideram a geração de REEE, enquanto países em desenvolvimento têm taxas mais baixas, mas a gestão varia devido a diferenças em infraestrutura e regulamentações. No contexto brasileiro, a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) estabeleceu a implementação obrigatória de um Sistema de Logística Reversa (SLR) para REEE. No entanto, a implementação do SLR de REEE enfrenta desafios, incluindo falta de informação, infraestrutura inadequada e falta de pessoal qualificado. Esta dissertação visa preencher essa lacuna na literatura, identificando as causas-raízes dos desafios na implementação e operacionalização do SLR de REEE em municípios de pequeno porte. Os objetivos incluem identificar desafios, validar e identificar novos desafios, criar uma Árvore de Realidade Atual (ARA) e propor diretrizes e estratégias para facilitar a implementação do SLR de REEE em municípios de pequeno porte. Ao longo dos capítulos, foram identificados desafios que incluem a falta de conscientização, infraestrutura inadequada, falta de recursos para pesquisa e desenvolvimento de tecnologias de reciclagem de REEE e dificuldade de classificação e segregação dos REEE. Em relação aos municípios de pequeno porte, os desafios mencionados assumem uma relevância ainda maior, dada a escassez de recursos, infraestrutura limitada e menor conscientização da comunidade. Portanto, a dissertação enfatiza a importância de abordagens adaptadas às condições específicas dessas comunidades, incluindo parcerias com instituições de pesquisa e programas de conscientização. O estudo contribui para o entendimento dos desafios na gestão de REEE em municípios de pequeno porte no Brasil e oferece orientações valiosas para a implementação bem-sucedida de sistemas de logística reversa nesses contextos desafiadores.

**Palavras-Chave:** Resíduos Eletroeletrônicos, Logística Reversa, Desafios, Diretrizes, Municípios



## **ABSTRACT**

This dissertation addresses the complex management of waste electrical and electronic equipment (WEEE) with a focus on small municipalities. The growth in WEEE generation worldwide represents a significant challenge, with particularities in reverse logistics operations due to its heterogeneous nature and the presence of valuable and hazardous components. Developed countries lead in WEEE generation, while developing countries have lower rates, but management varies due to differences in infrastructure and regulations. In the Brazilian context, the National Solid Waste Policy (PNRS) established the mandatory implementation of a Reverse Logistics System (RLS) for WEEE. However, the implementation of WEEE RLS faces challenges, including lack of information, inadequate infrastructure, and a shortage of qualified personnel. This dissertation aims to fill this gap in the literature by identifying the root causes of challenges in the implementation and operationalization of WEEE RLS in small municipalities. Objectives include identifying challenges, validating and identifying new challenges, creating a Current Reality Tree (CRT), and proposing guidelines and strategies to facilitate the implementation of WEEE RLS in small municipalities. Throughout the chapters, challenges were identified, including lack of awareness, inadequate infrastructure, lack of resources for research and development of WEEE recycling technologies, and difficulty in classifying and segregating WEEE. Regarding small municipalities, the mentioned challenges assume even greater relevance, given the scarcity of resources, limited infrastructure, and lower community awareness. Therefore, the dissertation emphasizes the importance of approaches tailored to the specific conditions of these communities, including partnerships with research institutions and awareness programs. The study contributes to understanding the challenges in WEEE management in small municipalities in Brazil and provides valuable guidance for the successful implementation of reverse logistics systems in these challenging contexts.

**Keywords:** E-waste, Reverse logistic, Challenges, Guidelines, Small Cities

## FIGURE LIST

Figure 1 - Micro level under the perspective of RLS.....	21
Figure 2 - Research steps.....	24
Figure 3 - Density of references per step.....	52

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Mapa estrutural da dissertação.....	16
Figura 2 - Captura de tela do Grupo de Foco.....	64
Figura 3 - Distribuição dos setores representados pelos participantes do questionário.....	68
Figura 4 - Distribuição dos municípios representados pelos participantes do questionário.....	69
Figura 5 - Número e distribuição de respostas do questionário para os desafios da etapa de descarte do SLR de REEE.....	70
Figura 6 - Número e distribuição de respostas do questionário para os desafios da coleta e recebimento do SLR de REEE.....	74
Figura 7 - Número e distribuição de respostas do questionário para os desafios da etapa de transporte do SLR de REEE.....	77
Figura 8 - Número e distribuição de respostas do questionário para os desafios da etapa de destinação de resíduos do SLR de REEE.....	79
Figura 9 - Árvore de Realidade Atual (ARA) desenvolvida em colaboração com o Grupo de Foco.....	84

## TABLE LIST

Table 1 - Summary of the challenges to operationalize and implement a WEEE RLS.....	29
---	----

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Desafios para operacionalização e implantação do SLR de REEE.....	60
Quadro 2 - Detalhamento da pesquisa documental.....	67
Quadro 3 - Diretrizes e estratégias propostas para a implantação do SLR de REEE.....	93

## **LISTA DE ABREVIATURA E SIGLAS**

ABINEE - Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica

ARA - Árvore de Realidade Atual

AS - Acordo Setorial

CEP - Comitê de Ética em Pesquisa

EU - European Union

hab. - Habitantes

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

kg - Quilograma

LAGESA - Laboratório de Gestão do Saneamento Ambiental

min - Minutos

NBR - Norma Brasileira

OCMR - Organizações de Catadores de Materiais Recicláveis

ONG - Organização Não Governamental

P&D - Pesquisa e Desenvolvimento

PCB - Printed Circuit Boards

PERS - Plano Estadual de Resíduos Sólidos

PMGIRS - Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos

PNRS - Política Nacional de Resíduos Sólidos

REEE - Resíduos de Equipamentos Eletroeletrônicos

RLS - Reverse Logistics System

RSU - Resíduos Sólidos Urbanos

SLR - Sistema de Logística Reversa

TCLE - Termo de Consentimento Livre e Esclarecido

UFES - Universidade Federal do Espírito Santo

USA - United States of America

WEEE - Waste Electrical and Electronic Equipment

## SUMÁRIO

CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO GERAL E ESCOPO DA DISSERTAÇÃO .....	14
CAPÍTULO 2: CHALLENGES TO IMPLEMENT AND OPERATIONALIZE THE WEEE REVERSE LOGISTICS SYSTEM AT THE MICRO LEVEL .....	18
2.1 INTRODUCTION.....	18
2.2 METHODOLOGY .....	24
2.3 RESULTS AND DISCUSSION.....	25
2.3.1 Overview of WEEE LRS challenges at the macro level .....	25
2.3.2 WEEE LRS challenges at the micro level .....	28
2.4 FINAL CONSIDERATIONS.....	52
Study limitations.....	54
2.5 CONCLUSIONS .....	54
CAPÍTULO 3: DIRETRIZES E ESTRATÉGIAS PARA IMPLEMENTAÇÃO E OPERACIONALIZAÇÃO DO SISTEMA DE LOGÍSTICA REVERSA DE RESÍDUOS ELETROELETRÔNICOS EM MUNICÍPIOS BRASILEIROS DE PEQUENO PORTE .....	57
3.1 INTRODUÇÃO .....	57
3.2 METODOLOGIA .....	60
3.2.1 Estudo de caso .....	60
3.2.2 Etapa 1 – Validação dos desafios relacionados a implementação e operacionalização do SLR de REEE.....	60
3.2.3 Etapa 2 – Identificação das causas raízes relacionadas a implementação e operacionalização do SLR de REEE através de Grupo de Foco e elaboração de ARA.....	63
3.2.4 Etapa 3 – Proposição de diretrizes e estratégias para a implementação e operacionalização do SLR de REEE em municípios brasileiros de pequeno porte.....	66
3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	67
3.3.1 Etapa 1 – Validação de desafios relacionados a implementação e operacionalização do SLR de REEE.....	67
3.3.2 Etapa 2 – Identificação das causas raízes relacionadas a implementação e operacionalização do SLR de REEE através de Grupo de Foco e ARA.....	83
3.3.3 Etapa 3 – Proposição de diretrizes e estratégias para a implementação e operacionalização do SLR de REEE em municípios brasileiros de pequeno porte.....	93
3.4 CONCLUSÕES.....	103

CAPÍTULO 4: CONCLUSÃO GERAL.....	105
4.1 CONCLUSÕES.....	105
4.2 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	105
CAPÍTULO 5: REFERÊNCIAS.....	107

## **CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO GERAL E ESCOPO DA DISSERTAÇÃO**

A gestão de resíduos de equipamentos eletroeletrônicos (REEE) é um desafio complexo em termos de logística reversa devido às suas características operacionais peculiares, tais como a geração progressiva e difusa, a heterogeneidade de sua composição, o variado tamanho dos dispositivos (desde telefones celulares até geladeiras) e a presença de componentes valiosos e perigosos.

De acordo com o *Global E-waste Monitor 2020*, aproximadamente 53,6 milhões de toneladas de REEE foram geradas em 2019, com uma média de 7,3 kg por indivíduo, e ainda, com tendência de aumento na geração de REEE (Forti *et al.*, 2020).

Países desenvolvidos como Austrália, China, Japão, Coreia do Sul, América do Norte e aqueles integrantes da União Europeia, lideram a geração de REEE, enquanto países em desenvolvimento têm geralmente taxas mais baixas de geração, e a gestão varia significativamente entre esses países devido a diferenças em infraestrutura, regulamentações e recursos disponíveis (Forti *et al.*, 2020).

Em face do crescimento rápido na geração de REEE, mudanças na legislação ambiental e pressão dos consumidores por responsabilidade social, diversos sistemas de logística reversa foram implementados em todo o mundo, em especial em países desenvolvidos (Dutta e Goel, 2021; Guarnieri, Cerqueira-Streit e Batista, 2020; Shittu, Williams e Shaw, 2021; Xavier, Ottoni e Lepawsky, 2021).

No Brasil, a Lei Federal nº 12.305/2010 estabeleceu a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) e determinou a implementação obrigatória de um Sistema de Logística Reversa (SLR) para REEE, com responsabilidade compartilhada entre fabricantes, importadores, distribuidores, comerciantes e consumidores (BRASIL, 2010).

A logística reversa de REEE geralmente começa com os consumidores devolvendo os dispositivos eletroeletrônicos aos varejistas ou distribuidores, que por sua vez os encaminham aos fabricantes ou importadores para destinação final. No entanto, a implementação do SLR de REEE em nível micro enfrenta desafios, como falta de informação, infraestrutura inadequada e falta de pessoal técnico qualificado, dentre outros. Destaca-se que a definição detalhada de “municípios de pequeno porte” se encontra nos Capítulos 2 e 3.

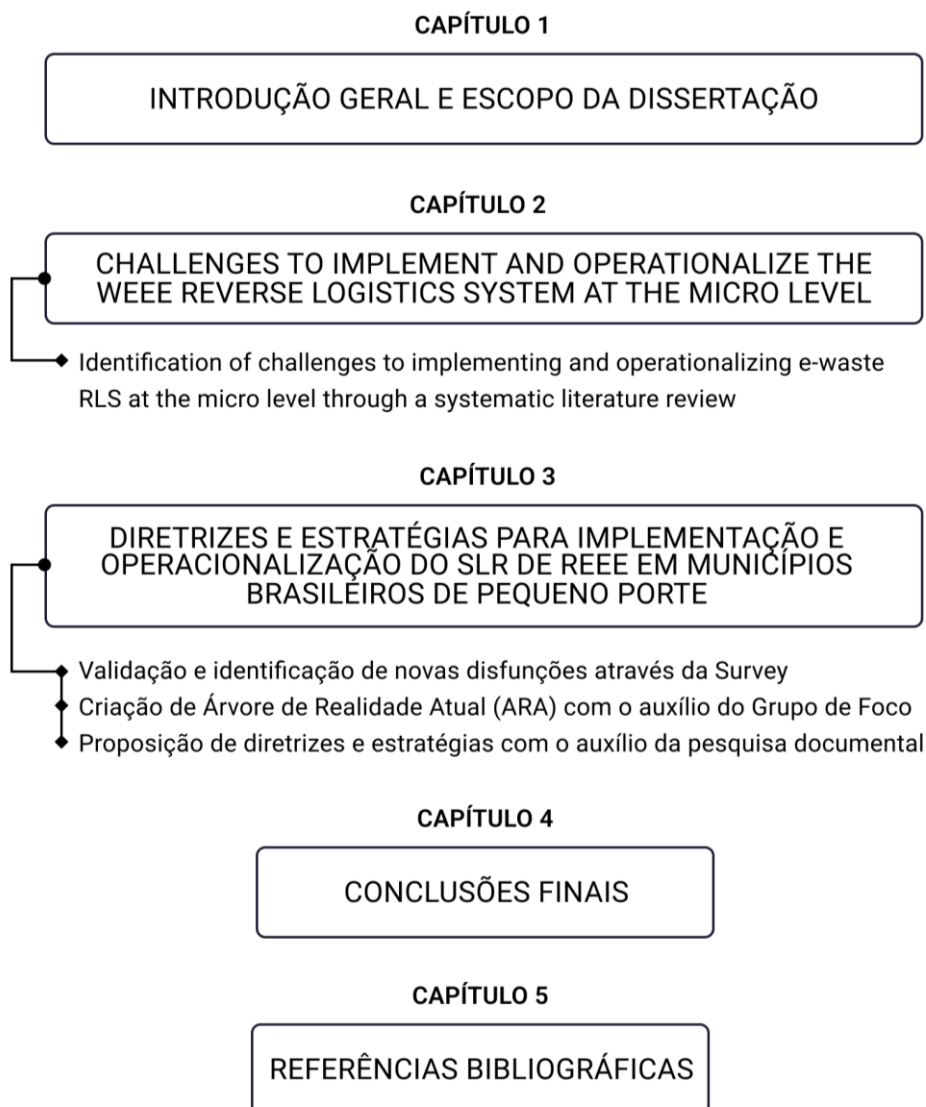
Dessa forma, este estudo visa preencher essa lacuna na literatura, identificando as causas-raízes dos desafios na implementação e operacionalização do SLR de REEE em nível micro. Compreender essas causas-raízes permite a proposição de diretrizes e estratégias para facilitar a implementação do SLR de REEE diante desses contextos desafiadores.

Ainda, tem como objetivos específicos:

- Identificar os desafios relacionados a implementação e operacionalização do SLR de REEE em nível micro;
- Validar e identificar novos desafios relacionados a implementação e operacionalização do SLR de REEE em nível micro;
- Criar uma Árvore de Realidade Atual (ARA) organizando as causas raízes relacionadas a implementação e operacionalização do SLR de REEE;
- Propor diretrizes e estratégias para a implementação e operacionalização do SLR de REEE em nível micro.

Diante disso, além do capítulo introdutório e da conclusão geral, o desenvolvimento desta dissertação foi dividido em dois outros capítulos principais redigidos na forma de artigos. A Figura 1 apresenta um mapa estrutural com os principais elementos textuais desta dissertação.

Figura 1 - Mapa estrutural da dissertação.



Fonte: Autoria própria.

Conforme observado na Figura 1, no Capítulo 1, desenvolveu-se uma introdução dos conceitos e discussões que se apresentaram, bem como, uma breve descrição dos capítulos desta pesquisa.

No Capítulo 2, por meio de uma revisão sistematizada da literatura, foram identificados os desafios para implementar e operacionalizar o SLR de REEE no nível micro. Cabe ressaltar que este artigo foi aceito para publicação na revista *Environmental Science and Pollution Research*, Qualis A2, Fator de impacto (2022) 5,8 e por isso está apresentado em inglês.



Por sua vez, o Capítulo 3, inicialmente, teve por objetivo validar os desafios identificados no Capítulo 2 através de *Survey*, e posteriormente, com o auxílio do Grupo de Foco, criar uma Árvore de Realidade Atual (ARA) para ilustrar as causas-raízes, e, por fim, propor diretrizes e estratégias com o auxílio de levantamento documental.

No Capítulo 4, as considerações finais, inicialmente, apresentam conclusões obtidas em torno das discussões dos Capítulos 2 e 3 e, posteriormente, sugestões para trabalhos futuros, reunidas em torno das questões que surgiram durante o desenvolvimento do trabalho.

## **CAPÍTULO 2: CHALLENGES TO IMPLEMENT AND OPERATIONALIZE THE WEEE REVERSE LOGISTICS SYSTEM AT THE MICRO LEVEL**

### **ABSTRACT**

Waste electrical and electronic equipment (WEEE) possess unique characteristics such as its growing production and the potential for resource extraction due to its composition. The implementation and operationalization of a reverse logistics system (RLS) for WEEE is a challenge, particularly concerning the micro level. The implementation of such systems often prioritize urban centers and their higher population densities, generally overlooking the micro level. The latter refers to ward- or village-level divisions, which can be regarded as the smallest administrative divisions of both urban and rural areas. Furthermore, it encompasses any area facing logistical challenges regarding RLS operationalization due to factors such as geographical isolation, budgetary constraints, imbalances, social isolation, environmental aspects, and even geopolitical conflicts. This study aims to address this literature gap by discussing the challenges to implement and operationalize a WEEE RLS at the micro level. A systematic literature review was employed as our methodology. We found 13 challenges for developed and developing countries without distinction between macro and micro levels. An additional approach highlighted the significance of monitoring and controlling WEEE RLS. The challenge The population and LRS entities' lack or insufficient training and awareness received the most citations in the conducted search. These challenges were organized by operational phase and discussed from the perspective of the micro level to comprehend multifactorial local challenges involving all stakeholders in the reverse logistics of WEEE in emerging nations. This can assist local administrators and constitutes the primary contribution of this study.

**Keywords:** E-waste, Reverse logistic, Small Cities, Village Level, Small Municipalities

### **2.1 INTRODUCTION**

The processes to produce waste electrical and electronic equipment (WEEE) have characteristics that make their reverse logistics system (RLS) complex from an operational point of view, such as its progressive and diffuse production, the heterogeneity of its composition, varying sizes (from cell phones to refrigerators), and their possibility of containing both valuable and dangerous components.

The most recent report available, the Global E-waste Monitor 2020, shows that approximately 53.6 million tons of WEEE were produced in 2019, averaging 7.3 kg per individual (Forti *et al.*, 2020). Although the next report is scheduled for December 2023, estimates expect that this trend of increasing WEEE production will persist.

Developed countries such as Australia, China, Japan, the Republic of Korea, and those in the EU and in North America lead this production. The USA and Canada average per capita around 20 kg, whereas the EU, 17.7 kg (Forti *et al.*, 2020). In contrast, in developing nations such as those in the African continent (which has 1.2 billion inhabitants), the average production per person only totals 1.9 kg (Forti *et al.*, 2020). Therefore, despite the significant production of WEEE, rates fluctuate depending on the country and population scale.

Regarding their composition, WEEE show a notable economic incentive for recycling, encompassing a diverse range of resources and over 60 distinct metals, including copper, gold, silver, aluminum, and iron (Thakur and Kumar, 2020). These metals are predominantly found in printed circuit boards (PCBs) and represent a potential source for resource even in developing nations. Brazil, for example, may channel these resources to waste picker associations, provided they integrate themselves into an RLS. PCBs have an attractive market value, which can stimulate local associations and companies to engage in this process.

Reverse logistics generally refers to a set of processes for managing the physical flow of products and their packaging from material extraction to end consumers (reversing traditional logistics) (Rogers and Tibben-Lembke, 1998). An operationally viable WEEE RLS must assign responsibilities to all members of the chain under the principle of shared responsibility. The chain begins with consumers, who must return WEEE to retailers or distributors. In turn, retailers and distributors must return them to manufacturers or importers. Finally, manufacturers and importers are responsible for the environmentally appropriate disposal of WEEE (BRASIL, 2020; EUROPEAN UNION, 2012; Gharib *et al.*, 2022).

Faced with the rapid growth of the global production of WEEE (Khoshand *et al.*, 2023), the advancement of environmental legislation, and the increase in consumer pressure for social responsibility, several LRS have been implemented in the world, mainly in developed countries. Switzerland was the first country to implement an organized

WEEE collection and recycling system in 1995 (Sinha-Khetriwal, Kraeuchi and Schwaninger, 2005), followed by Sweden, which became a global leader in WEEE collection as a result of a 2001 agreement between electrical and electronic equipment manufacturers and local authorities.

The European Union, a continental example, has guidelines that determine the implementation of public policies to manage WEEE, such as the WEEE Directive (2012/19/EU) and the Restriction of Hazardous Substances Directive (EUROPEAN UNION, 2012). However, in developing countries, WEEE LRSs remain at an early stage of implementation, whose specific models must be adjusted to local realities with special care for operationalization in villages and neighborhoods in which logistical challenges may be greater (Dutta and Goel, 2021; Guarnieri, Cerqueira-Streit and Batista, 2020; Shittu, Williams and Shaw, 2021; Xavier, Ottoni and Lepawsky, 2021). As one moves toward the grassroots level, management models drift further away from established systems, which is an undesirable circumstance. These issues can compound with each other due to the absence of collection mechanisms, resulting in challenges such as REEE accumulation and resource wastage.

WEEE management varies across developed and developing countries due to factors such as infrastructure, regulations, and available resources. Developed countries have a robust infrastructure, efficient collection, specialized recycling centers, and stringent regulations. In contrast, developing countries face challenges regarding infrastructure, waste separation and treatment, and inadequate regulations. This difference underscores the need for a coordinated global approach, including international cooperation, comprehensive regulations, the sharing of best practices, and awareness about WEEE recycling and proper disposal (Anandh *et al.*, 2021).

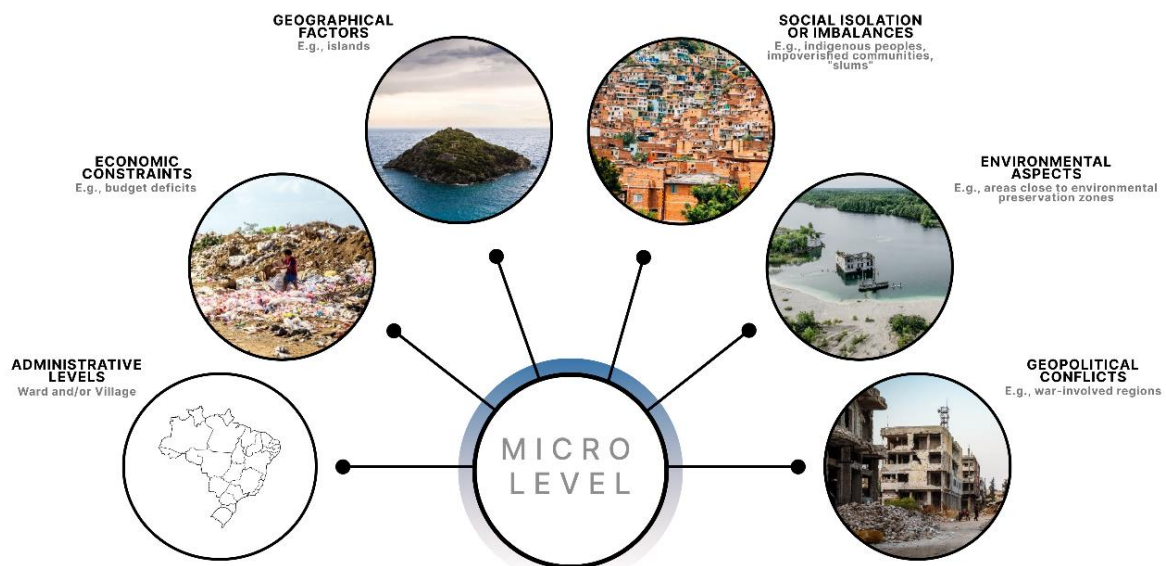
The literature has the following categorization of the micro level: according to Koshta, Patra and Singh (2022), it refers to the division made at the ward or village level and can be considered as the smallest administrative divisions for urban and rural areas.

Countries usually have distinct levels of administrative divisions whose names and structure vary from country to country and even within the same country. For example, in the WEEE LRS in Brazil, municipalities with less than 80,000 inhabitants were not covered by Federal Decree No. 10.240, which estimates that, by 2025, the Brazilian WEEE LRS will have 5,000 collection points in 400 of its largest municipalities,

reaching around 60% of its Brazilian population. However, although the program encompasses more than half of the Brazilian population, it fails to support 93% of the municipalities in the country (from a total of 5,570) (BRASIL, 2020; IBGE, 2021).

However, the definition of the micro level goes beyond the administrative scope (Figure 1 - Micro level under the perspective of RLS.). For a more comprehensive understanding, the micro level can be conceptualized as any area facing logistical challenges integrating itself into the RLS. This may happen for various reasons, such as geographical factors (e.g., islands), economic constraints (e.g., budget deficits), social isolation or imbalances (e.g., Indigenous peoples, impoverished communities, “slums”), environmental aspects (e.g., areas close to environmental preservation zones), geopolitical conflicts (e.g., war-involved regions), among others.

Figure 1 - Micro level under the perspective of RLS.



Source: The Authors, 2023.

Furthermore, this distinction between micro levels is applicable to both developed and developing countries. For instance, the Brazilian municipality of São Paulo represents a macro level, but only the municipality itself is considered at this level, whereas the surrounding neighborhoods fall under the micro level. A similar example is observed in Europe, in which an extensive rail network facilitates connectivity between rural or less populous areas. Consequently, establishing connections among these locations constitutes a macro level that encompasses regions that can be easily integrated to an RLS. However, achieving these connections offers challenges. Hansen et al.

(2022) highlight that transportation services can involve costs and bureaucratic hurdles. The authors also found that some sector stakeholders considered increasing waste availability for recycling by international waste transportation but strict regulations on cross-border waste transportation hindered such an approach.

In summary, the analysis of these diverse administrative layers gives rise to a realization: regardless of their origin, all types of waste fall under a universal principle: extended producer responsibility. This concept demands that manufacturers of goods (including WEEE) take responsibility for the proper management of these products at the end of their life cycle, which includes collection, recycling, and proper disposal (Leclerc and Badami, 2020).

In other words, waste generated in the urban center of a developed country follows the same principle as waste generated in a rural area of a developing country. The producer's responsibility remains the focus, regardless of the geographical origin of the waste. Even waste with more isolated geographical origins still fall subject to this same principle, ensuring that collection takes place even at the micro level.

This context evinces that collection must remain a crucial element even in regions with lower waste production rates (such as Africa, see above) and in logistically remote areas uncovered by a RLS. Waste accumulates over time in these collection-deprived localities, differing from urban centers which, despite their significant production, benefit from RLS implementation and its corresponding collection. Therefore, collection proves imperative in scenarios of remote production, in which the threat of waste accumulation becomes considerably more pressing, fostering informal recycling, for instance.

The informal recycling sector is a problematic social and environmental obstacle (Ciocoiu et al., 2016; Liu et al., 2017; Mohammadi, Singh and Habib, 2021; Orlins and Guan, 2016; Tian et al., 2021; Tran et al., 2018; Yong, Lim and Ilankoon, 2019). The flow of WEEE through informal recyclers is greater than that of formal recyclers (Baidya, Rahul et al., 2020; Kumar and Dixit, 2018a; Okwu et al., 2022).

The complexities of the collection network and the deficiencies of the process have been reported as the main reasons for the failure of many formal initiatives (Pourhejazy *et al.*, 2021). Formal WEEE recycling is generally seen as unprofitable since it requires expensive investments, dependence on government subsidies, and high labor costs

to recover underperforming materials with low profits (Bakhiyi *et al.*, 2018). Zhang et al., (2015) explain that, due to economic factors, informal recycling is profitable in China because informal collectors pay consumers for WEEE. Therefore, most consumers in China are willing to sell their discarded products to street vendors, rather than participating in collection systems, for which they must pay to dispose of their discarded electronic products.

Discussing the challenges to implement and operationalize LRS at the micro level is the main contribution of this study since reverse logistics in urban centers (which concentrate higher population densities) are usually elected for LRS implementation (although they also face challenges, especially in developing countries).

Thus, this research considered places with 80,000 inhabitants or less as the micro level. Locations that also face operational problems related to WEE collection, transportation, storage, and/or final disposal due to geographical isolation (such as islands or remote areas) can also be considered as the micro level.

At the macro level, the studies carried out by Bouzon, Govindan and Rodriguez (2018) and Sirisawat and Kiatcharoenpol (2018) point out the main barriers to WEEE LRS implementation: lack of skilled labor to handle this type of waste, lack of recycling technologies, disagreement among supply chain entities (lack of coordination and support in the supply chain to implement an LRS), limited planning of reverse logistics activities, absence of specific regulations, insufficient waste management practices (lack of unambiguous return policies or of fully regulated waste management), lack of financial resource prioritization, lack of a transportation infrastructure, and lack of a technical staff trained to manage solid waste in general.

Micro-level challenges increase due to vehicle routing, resource allocation, facility location, collected/treated waste capacity determination, among other factors, but no studies have shown how and what challenges impact a WEEE LRS.

In view of the above, our study aims to fill this gap in the literature by identifying the challenges to implement and operationalize reverse logistics systems of electronic waste at the micro level by a systematized literature review to aid local managers.

## 2.2 METHODOLOGY

The systematized review of the literature to be used in this research was divided into seven stages as illustrated in Figure 2:

I - Definition of search terms

II - Definition of databases and period of publication

III - Search of articles on databases

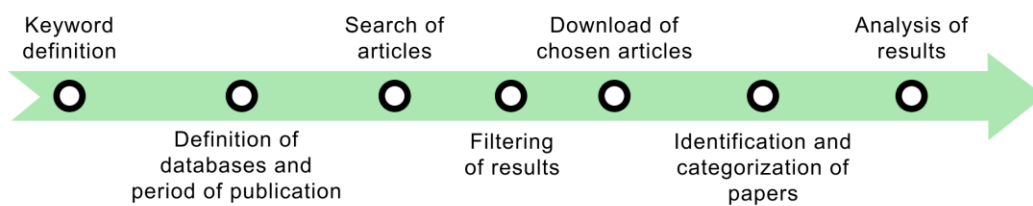
IV - Application of filters to select articles (Title, Abstract, Full reading of articles)

V - Download of selected articles

VI - Identification and categorization of WEEE LRS challenges

VII - Analysis and systematization of secondary data

Figure 2 - Research steps.



Source: The Authors, 2022.

Based on an initial evaluation of the literature, the chosen research problem was “Challenges related to the implementation and operationalization of reverse logistics systems for electronic waste in locations classified as micro level.” The main search terms related to the theme were identified, namely: “WEEE,” “e-waste,” “electronic waste,” “electrical and electronic waste,” “waste of electric and electronic equipment,” “electro-electronic equipment,” “implementation,” “deployment,” “reverse logistics system,” “reverse logistic,” “electronics logistic,” “shared responsibility,” “operational,” “operationalization,” “collection,” “transport,” “temporary storage,” “final destination,” “dysfunction,” “problem,” “difficulty,” “barrier,” “obstacle,” “micro level,” “village level,” “ward village level,” “municipal,” “rural,” “island,” “small town,” “small village,” and “hamlet.”

The search for articles was conducted on two platforms: Scopus and Web of Science. The latter creates a network of publications and researchers based on citations and the controlled indexing of content (Clarivate, 2022). The platform was chosen due to its relevance as its collection encompasses more than 74.8 million academic data and datasets, 1.5 billion references, and 254 disciplines and enables the search for



recognized authors in an area of interest (Clarivate 2022). The choice of Scopus was also based on its relevance. Updated in 2019, its content coverage guide indicates that the platform consists of about 23,452 active journal titles, 120,000 conferences, and 206,000 books from more than 5,000 international publishers (Elsevier, 2020). Moreover, Scopus is considered as one of the largest curated databases of scientific journals, books, conference proceedings, etc., which are selected by a process that undergoes continuous reassessment (Singh *et al.*, 2021).

The use of both platforms enables a more complete analysis. They were searched in July 2022 using only combinations of English keywords, including patents and citations. The search used the Boolean operators “AND” (which enables the combination of two or more words) and “OR” (which is used for similar terms or for those with the same meaning). Some points regarding the used platforms should be considered. The first refers to the difference in found results per platform. When searching for the aforementioned search terms, Scopus retrieved 376 articles and Web of Science, only six. This can be due to different policies on use of versions of publication dates (Liu, Huang and Wang, 2021).

After removing duplicates, the sample from both platforms totaled 378 original studies. From a preliminary analysis of study titles, keywords, and abstracts, 84 studies from Scopus and two from the Web of Science were selected, resulting in a final bibliographic portfolio with 86 original publications. After reading these publications, the studies that did not fit the objectives of this study were excluded.

In the next step, the studies were read to identify and categorize the challenges to WEEE LRSs. For this, according to the Brazilian Federal Decree No. 10.240/2020, challenges were identified by stages of LRS operation, i.e.: (I) disposal by consumers of WEEE at specialized or door-to-door points; (II) receipt and temporary storage of WEEE discarded at receiving points or received at consolidation points; (III) transportation of WEEE from receipt or consolidation points to environmentally appropriate final destinations; and (IV) destination and final disposal.

## **2.3 RESULTS AND DISCUSSION**

### **2.3.1 Overview of WEEE LRS challenges at the macro level**

Some of the found challenges point to the importance of monitoring and controlling WEEE LRSs due to their fundamental importance for the functioning of these systems.

Generally, the rigidity of legislation is unaccompanied by the supervision and control of the destination and final disposal of waste, enabling informal recycling (Morganti et al. 2020). Although many countries have implemented several structures to properly manage WEEE, most electronic waste ends up in landfills, incinerated, or illegally exported to developing countries (Rajesh, Kanakadhurga and Prabakaran, 2022).

Tian et al. (2022) report that competition with formal channels for WEEE recycling is a challenge. Most developing countries (especially China) have profitable indirect initiatives due to the demand for secondary resources and the low wages of skilled workers. The well-established structure of the informal sector and its operational capacity, especially in developing countries, lead to the wide collection, accessibility, and flexibility of door-to-door services (Pourhejazy *et al.*, 2021).

Informal WEEE recyclers face some limitations, such as the lack of essential facilities that can improve their efforts and activities (Jangre, Prasad and Patel, 2022; Maphosa and Maphosa, 2020; Okwu et al., 2022); of safety equipment to protect them from health-related risks usually associated with hazardous elements (Acquah *et al.*, 2021); of essential training on how to protect themselves, handle WEEE, environmental issues, etc. (Salhofer *et al.*, 2016); and of access to adequate guidance, training, health units, and first aid treatment in case of emergencies (Acquah *et al.*, 2021; Okwu *et al.*, 2022); as well as low wages (Andeobu, Wibowo and Grandhi, 2021a; Imran et al., 2017; Salhofer et al., 2016).

Awasthi et al. (2018) and Borthakur and Sinha (2013) point out that another problem in the informal WEEE processing sector involves child labor (which is illegal under international law) and vulnerable women.

However, in some cases even the law fails to offer adequate coverage. Loopholes in legislation cause substantial deficiencies in enforcement capabilities and require the development of a wider range of enforcement tools. Thus, amendments to legal and political structures should consider not only legal principles but also effects on markets, access to the data necessary to establish a response mechanism, and the economic effort necessary to monitor operations (Morganti, Favarin and Andreatta, 2020).

Rautela et al. (2021) highlight that WEEE transportation is a challenge due to the unidentified/recorded amount produced and collected in cities. The WEEE of

developed countries is transported to developing countries, in which they are often stored under precarious conditions. The sustainable transportation of WEEE can be achieved by establishing adequate collection channels and transfer stations similar to those used for municipal solid waste (Rautela *et al.*, 2021).

The informal sector remains actively involved in the transportation of WEEE without the benefit of specified vehicles and regulatory protection. Manufacturers, recyclers, and consumers would play crucial roles in enabling the smooth and safe transportation of WEEE produced in a city by adopting regulations (Rautela *et al.*, 2021).

Notably, cost of transportation configures one of the main factors that influence the efficiency of urban WEEE mining. Bouvier and Wagner (2011) have shown that the barriers associated with reverse logistics systems mainly include costs associated with transportation. Nowakowski (2017) points out that collection companies must prepare vehicles and containers to return discarded equipment. Transportation costs depend on the type and fleet of vehicles, the length of the route, and the number of employees. Moreover, another cost arises since the vehicles are packed with unusable (rather than profitable) equipment.

A considerable commitment has been currently devoted to the development of international and national legislation that will strengthen the regulatory structure of waste and surveillance capabilities. However, the general inability of applying and regulating structures to effectively combat the illegal export of WEEE has been reported. This results in a general sense of impunity since both the perception of the risk of being caught and the likelihood of criminal prosecution are extremely low for environmental crimes (Favarin and Aziani, 2020).

Mohammadi, Singh and Habib (2021) state that transporting WEEE across borders is one of the worrisome challenges of WEEE management in Asian countries.

Salmon *et al.* (2021) claim that the export of WEEE to developing countries is a widely studied issue and that some products can be recycled by unregulated and harmful methods. New examples of fraud or dishonest practices include lapses in the security of personal data when used electronics are resold, non-functional products included in cross-border shipment transactions under the guise of reuse, buyer or seller fraud during online resale or product auctions, and repair of electronics with counterfeit components.

Elia, Gnoni and Tornese (2019) point out that the illegal dumping and export of waste to developing countries occurs in part due to the lack of collection points and coordination between collection service providers and retailers/manufacturers.

According to Tran et al. (2018), about 65% of all precious metals, plastics, and glass in WEEE remained in the Vietnamese economy due to reuse. The remainder (about 30-34%) was illegally exported (in the case of precious metals and plastics) or disposed in landfills (in the case of glass).

In addition to illegal export, there is also legal export to countries that have the technology to recycle WEEE. Recyclers are dedicated to dismantling and separating WEEE, instead of following advanced activities, so the collected and separated materials are exported to international markets for final material recovery (Gunarathne, Alwis, de and Alahakoon, 2020). In Sri Lanka, WEEE recyclers export most of the basic materials. Because Sri Lankan recyclers export materials with lower added value, they receive unattractive export market prices, creating financial difficulties for recyclers to remain in the industry (Gunarathne, Alwis, de and Alahakoon, 2020).

Furthermore, Sharma, Joshi and Govindan (2021) find a lack of standards to measure the recycling potential of WEEE, i.e., its recyclability, which refers to the theoretical probability of an item actually being recycled considering the difficulty of physically treating and chemically recovering recyclable metals, plastics, and glass. A comprehensive theoretical guide to recycling processes with a quantitative ecological design and recycling responsibility is essential to determine the authentic recyclability of WEEE. This study created mathematical models based on the physical and chemical characteristics of the materials contained in the WEEE to calculate the recyclability and difficulty of recycling various types of electronics (Zeng and Li, 2016).

Therefore, the need for more efficient supervision and control are of international concern, along with an integrated management of industries with governments and the whole society to effectively achieve environmental sustainability.

### **2.3.2 WEEE LRS challenges at the micro level**

Regarding this study, it is important to highlight that, after the research, most of the portfolio summarized in Table 1 focus on the macro level, evincing the gap in the literature regarding the micro level. Only a few studies addressed challenges related

to the operationalization and implementation of a WEEE LRS as part of the elaboration of their research problem (rather than as their main focus), applying it at lower levels (whether at the state, city, or neighborhood level), comparing urban and rural environment, or even evaluating case study on islands.

Notably, several studies on the portfolio focused on the challenge The population and LRS entities' lack or insufficient training and awareness. Although a social challenge, the operational scope of this study considered this a challenge since lack of awareness is directly related to inadequate disposal, the first step of reverse logistics systems.

Table 1 summarizes the bibliographic landscape of challenges listed in each operational phase. This table includes a diverse array of studies originating from the extensive literature concerning WEEE RLS. However, this study discusses the micro level, for which information availability in the literature is limited. Thus, while challenges have been identified at the macro level for both developed and developing countries, a gap remains to be filled in investigating the micro context, especially in developing countries. As a result, the classification of challenges followed the operational phases of the RLS as these very phases must be fulfilled for both the micro and macro levels, constituting a universal categorization that encompasses all spheres.

Table 1 - Summary of the challenges to operationalize and implement a WEEE RLS.

Operational stage	Challenges	References
1 Disposal	1A The population and LRS entities' lack or insufficient training and awareness	(Almulhim, 2022; Andeobu, Wibowo and Grandhi, 2021b; Aquino et al., 2020; Arya and Kumar, 2020; Bakhiyi et al., 2018; Borthakur and Govind, 2017; Borthakur and Sinha, 2013; Chen, Faibil and Agyemang, 2020; Dagiliūtė, R et al., 2019; Dixit and Badgaiyan, 2016; Fan et al., 2018; Gharib et al., 2022; Gunarathne, Alwis, de and Alahakoon, 2020; Imran et al., 2017; Islam et al., 2021; Jafari, Heydari and Keramati, 2017; Jangre, Prasad and Patel, 2022; Kumar and Dixit, 2018b; a; Nnorom, Osibanjo and Ogwuegbu, 2011; Nowakowski, 2016, 2019;

Operational stage	Challenges	References
		Pérez-Belis et al., 2017; Rena et al., 2022; Salmon et al., 2021; Santos and Ogunseitan, 2022; Shahrabi, Shokouhyar and Zeidyahyae, 2021; Siddiqua et al., 2022; Sirisawat et al., 2015; Ylä-Mella, Keiski and Pongrácz, 2015)
	<p style="text-align: center;">1B Inadequate disposal of WEEE</p>	(Almulhim, 2022; Baidya, R et al., 2020; Borthakur and Sinha, 2013; Fan et al., 2018; Gollakota, Gautam and Shu, 2020; Marczuk et al., 2019; Mohammadi, Singh and Habib, 2021; Okwu et al., 2022; Rajesh, Kanakadhurga and Prabakaran, 2022; Salhofer et al., 2016; Santos and Ogunseitan, 2022)
	<p style="text-align: center;">1C Difficulty classifying and segregating WEEE</p>	(Cole et al., 2019; Cole, Cooper and Gnanapragasam, 2016; Kazancoglu et al., 2020; Okwu et al., 2022; Tansel, 2017)
	<p style="text-align: center;">1D Inadequate distribution of WEEE disposal points</p>	(Aquino et al., 2020; Sari, Masruroh and Asih, 2021)
2 Collection and Receipt	<p style="text-align: center;">2A Collection rate and WEEE collection/disposal points</p>	and (Andeobu, Wibowo and Grandhi, 2021b; Arya and Kumar, 2020; Bakhiyi et al., 2018; Bouvier and Wagner, 2011; Chen, Faibil and Agyemang, 2020; Elia, Gnoni and Tornese, 2019; Gollakota, Gautam and Shu, 2020; Gunarathne, Alwis, de and Alahakoon, 2020; Marczuk et al., 2019; Mmereki, Li and Li'ao, 2015; Okwu et al., 2022; Zhang et al., 2015)
	<p style="text-align: center;">2B Insufficient WEEE receiving and sorting plants</p>	(Ciocoiu et al., 2016; Gunarathne, Alwis, de and Alahakoon, 2020; Okwu et al., 2022; Singh, Dasgupta and Routroy, 2022; Tansel, 2017, 2020; Vieira et al., 2020; Yao et al., 2013)

Operational stage	Challenges	References
	2C Intelligent WEEE collection systems not applied	(Elia, Gnoni and Tornese, 2019; Kazancoglu et al., 2020; Nowakowski and Pamula, 2020; Yao et al., 2013)
3 Transportation	3A Deficient WEEE transportation infrastructure	(Hansen et al., 2022; Nowakowski, 2017)
	3B Long and costly distances	(Hansen et al., 2022; Nowakowski and Mrówczyńska, 2018)
4 Final Destination	4A Lack of technical training to work in the WEEE recycling sector	and (Araujo et al., 2017; Arya and Kumar, 2020; Gollakota, Gautam and Shu, 2020; Imran et al., 2017; Kazançoglu et al., 2020; Kumar and Dixit, 2018a; Masud et al., 2019; Mmerekı, Li and Li'ao, 2015; Sharma, Joshi and Govindan, 2021; Tansel, 2017)
	4B Research and Development shortage of WEEE recycling technologies	(Awasthi and Li, 2017; Bakhiyi et al., 2018; Jangre, Prasad and Patel, 2022; Kumar and Dixit, 2018a; Salmon et al., 2021; Sharma, Joshi and Govindan, 2021; Song et al., 2017; Tansel, 2020; Vieira et al., 2020; Yong, Lim and Ilankoon, 2019; Zhang et al., 2015)
	4C Absence or insufficient number of WEEE recycling companies	and and and (Acquah et al., 2021; Afonso, 2018; Almulhim, 2022; Andeobu, Wibowo and Grandhi, 2021b; Berežni et al., 2021; Chen, Faibil and Agyemang, 2020; Gollakota, Gautam and Shu, 2020; Kumar and Dixit, 2018a; Mmerekı, Li and Li'ao, 2015; Neto, Silva and Santos, 2019; Nnorom, Osibanjo e Ogwuegbu, 2011; Okwu et al., 2022; Sharma, Joshi and Govindan, 2021; Sirisawat et al., 2015; Song et al., 2017)

Operational stage	Challenges	References
	4D Heterogeneous composition hinders treatment	(Rajesh, Kanakadhurga and Prabaharan, 2022; Shahabuddin et al., 2022)

Source: The Authors, 2022.

The following sections discuss how the identified challenges (Table 1) impact WEEE LRSs at the micro level according to operational stages.

### 2.3.2.1 Step (I): Disposal

#### **1A The population and LRS entities' lack or insufficient training and awareness**

Although disposal behavior and consumer awareness are central to successful WEEE management interventions, few consumers are aware of the importance of WEEE recycling, the hazards related to these products, and available disposal options. Thus, they often erroneously dispose of WEEE with other household waste (Andeobu, Wibowo and Grandhi, 2021a; Araujo et al., 2017; Imran et al., 2017; Jangre, Prasad and Patel, 2022; Kumar, 2019; Okwu et al., 2022; Santos and Ogunseitani, 2022), regardless of whether they reside in dense urban centers or in remote villages.

For Salhofer et al. (2016), the disposal of small WEEE, such as mobile phones, also offers a challenge precisely because of their size since they “fit” in the disposal of household waste, being discarded in a “practical” way.

Dagiliūtė, Renata et al. (2019) shows that consumers who had less knowledge about collection points more often discarded WEEE along with household waste or stored them at home, being more prone to irregular disposal. Factors such as age, educational level, and income also correlate with these WEEE disposal behaviors.

Regarding the population's educational level, a highlight refers to rural communities lacking even more awareness about the management of WEEE (Sirisawat *et al.*, 2015). It is also worth mentioning that this is the reality of many developing countries (Gunarathne, Alwis and Alahakoon, 2020), even in the urban environment.

Regarding the micro level, the financial scope can intensify the challenge of the population's lack of awareness. The difficulty in promoting environmental education



campaigns, for example, can be due to a lean budget. Small municipalities have more restricted budgets and lesser capacity for collection, generating dependence on Federal and State intergovernmental transfers, making them financially dependent on the State and the Union and restricting their autonomy. When faced with financial difficulties, adopting a planning strategy (considered as a necessity in the face of resource scarcity) becomes essential to obtain the best possible results with the use of limited available resources.

In addition to consumers, other members in reverse logistics chains also lack awareness/information, especially local retailers since they lie outside commercial networks with vertical marketing strategies (as is common at the micro level). However, lack of awareness occurs on a global level.

Arya and Kumar (2020) report the lagging public awareness of the health hazards of informally recycling WEEE in India. The scavengers, manufacturers, refurbishers involved in repairing obsolete appliances are unaware of the potential risk of these products to their health and the environment.

Similarly, Gunarathne, Alwis and Alahakoon (2020) warn of the lack of awareness of all links in the WEEE LR chain in Sri Lanka, not just consumers. Pakistan also has a need to educate recyclers, scavengers, manufacturers, and consumers about the handling, collection, disposal, and impacts of WEEE (Imran *et al.*, 2017).

Almulhim (2022) states that ignorance about the proper management of WEEE has configured a significant challenge for the population of Saudi Arabia. They state that awareness among chain members enables informed choices about management strategies to reduce the environmental impact of WEEE.

Consumer behavior has been studied to improve WEEE disposal patterns. Shahrasi, Shokouhyar and Zeidyahyae (2021) point out that it is essential to obtain the necessary information about consumer attitudes and behaviors to design a structured WEEE management system. They also claim that increasing the amount of collected WEEE and ensuring that they are properly processed are two of the main objectives of Directive 2012/19/EU, both of which highly depend on consumer behavior and WEEE disposal.

Siddiqua et al. (2022) agree that understanding the buying and discarding behavior of consumers of electronic products would suggest to policymakers the development of strategies aimed at WEEE RLSs. They also show that the attitude and awareness of consumers is a key factor that directly influences the recycling of WEEE. Findings on the ignorance of WEEE disposal mechanisms practically imply that this can lead to the failure of the pro-environmental WEEE disposal programs implemented by the UAE government.

In addition to lack of awareness, authors have addressed lack of will. Gharib et al. (2022) state that the unwillingness of the population or local authorities to cooperate in the management of WEEE is a critical problem and that the perceptions of internal stakeholders (including manufacturers, suppliers, distributors, retailers, consumers, and government consumers) should be assessed and integrated.

Kumar (2019) comments that one of the biggest threats to the success of reverse supply chain management is the reluctance of consumers to participate in the recycling process. They also state that, since the starting point of any reverse supply chain is the will and active participation of consumers in the recycling process, it is necessary to understand the factors that influence this behavior that is dynamic and is influenced by consumer ideology, familiarity/convenience of recycling activities and demographics.

Some authors point out ways to promote this awareness. Almulhim (2022) points out that one of the pillars of WEEE management is raising awareness by programs and events. Disseminating information, promoting discussions, and involving government authorities and relevant stakeholders to raise awareness is the first step for the proper disposal of WEEE. Research by Ylä-Mella, Keiski and Pongrácz (2015) suggests an explicit need for more information and publicity about the recovery of mobile phones in Finland (especially up-to-date information on retrieval services by retailers) to change consumers' current storage habits.

This impact on consumers' storage, repair, reuse, and disposal behavior can be generated by the development of communication tools to improve people's awareness, such as implementing WEEE training programs, investing in more diverse strategies involving social media, providing information in physical locations, and promoting awareness campaigns (Almulhim, 2022; Islam *et al.*, 2021). The education

of individuals is one of the most important factors to improve WEEE collection rates. Depending on their behavior, waste can go through official systems of waste collection, informal recycling, improper disposal, or be stored in a residence (Nowakowski, 2019).

Compared to the macro level, the micro level has fewer inhabitants, which facilitates social mobilization by events and programs. Community representatives are more centralized, and people in the community generally know each other, spreading information more quickly among themselves. Despite the possibility of distant properties (such as in rural areas), government authorities must commit themselves to an exclusive transportation for social mobilization events.

In contrast, Islam et al. (2021) show that consumers are demanding a substantial change in existing WEEE management systems. Issues that require the attention of researchers and policymakers around product and service innovation include formal WEEE collection and service options (online, door-to-door, sidewalk pickup, proximity to permanent recycling centers).

### ***1B Inadequate disposal of WEEE***

Due to the lack of public awareness, most individuals seem to ignore the toxicity or hazard of WEEE, and few consumers know the dangers of WEEE. Thus, WEEE are generally discarded along with other waste contaminating urban solid waste — or even recyclable waste in selective collection (Borthakur and Sinha, 2013; Okwu et al., 2022; Santos and Ogunseitan, 2022). The main limitations in the European Union are related to small WEEE as they can easily be discarded with urban solid waste (Salhofer *et al.*, 2016)

Gollakota, Gautam and Shu (2020) point out that unregulated disposal and illegal WEEE landfills in developing nations are the main concerns of WEEE management.

This impact on the environment due to the inadequate disposal of WEEE is worsened at the micro level. The mismanagement of solid waste is reported as one of the more immediate and acute challenges for islands (or small island developing states) than in other land masses. Inadequate disposal of WEEE and lack of end-of-life management systems cause coastal pollution, loss of biodiversity, and decreased natural population (Mohammadi, Singh and Habib, 2021).

A more realistic analysis must highlight that this challenge manifests itself both at macro levels in developed countries and at micro levels in developing nations as even developed countries with RLS in place face difficulties addressing this issue. An example of this is evident in the study conducted by Marczuk et al. (2019), which concluded that WEEE accounts for 0.02% of the total weight of common waste collected throughout the year in Lublin, indicating the imperfections in the WEEE collection system and the need for improvement. Thus, even after over 10 years as part of the European Union, the presence of WEEE in mixed municipal waste evinces it as an issue not only with WEEE collection but also with selective collection in general.

Challenges are inherent to RLS regardless of the level to which they are applied but they are further exacerbated at the micro level when in synergy with other factors.

### ***1C Difficulty classifying and segregating WEEE***

Consumers are known to have difficulty in differentiating electrical and electronic equipment (Okwu *et al.*, 2022) from WEEE because they neither know their concepts nor can identify types of WEEE, regardless of macro or micro levels. However, the solution (which stems from environmental education) is mostly lacking at the micro level due to the rarity of awareness campaigns.

According to Kazancoglu et al. (2020), the most significant problem in WEEE management stems from the lack of WEEE classification in emerging economies. The authors point out that, unlike in developed countries emerging economies collect and recycle WEEE (when sent for treatment) without classifying them, thus incinerating or disposing their useful and valuable parts and components (and even products that could be reused) in landfills.

Furthermore, the absent or incorrect classification of WEEE directly affects their possible reuse and should thus be prioritized. Cole et al. (2019) claim that reuse is limited when discarded products need repairs, especially in the case of lower-value items. The authors state that discarded WEEE are usually intended for recycling due to incorrect handling during collection. Recycling targets also discourage the reuse of components since items are classified as “waste,” for which recycling seems to be the easiest option (Cole *et al.*, 2019).

WEEE requires manual sorting to produce adequate recycled products. Tansel (2017) considers the difficulty of separating the components as a challenge since they are screwed, embedded, glued, or welded to each other. For elements with similar physical, chemical, and thermodynamic properties, this difficulty can be reduced by pre-selecting the pieces that enter this process to release the materials by physical force. These processes may include grinding (by crushing, grinding, or shearing), which typically provide partial releases (Tansel, 2017).

Classification can separate WEEE in lots with different prices according to their composition, valuing residues and separating those that have contaminants. However, it is worth mentioning that this activity implies the existence of a structure that can receive and sort this waste when carried out after consumers' disposal stage.

Xavier et al. (2020) find two types of WEEE disassembly: the destructive, which neither preserves parts and components nor separates materials; and the non-destructive, which considers disassembly to preserve materials and components. In Brazil, NBR 16156:2013 establishes requirements to protect the environment and manage occupational safety and health risks during WEEE disassembly.

These criteria and requirements mentioned above are important but unattainable at the micro level since estimating the cost of disassembling WEEE is complex due to the different materials contained in them.

Additionally, safe and non-destructive WEEE disassembly requires the provision of spaces to receive and package post-consumer products, accommodate workstations and tools, and to allocate the different obtained materials; parameters which are hardly found at the micro level due to a lack of facilities or small installations (Xavier *et al.*, 2020).

### ***1D Inadequate distribution of WEEE disposal points***

An appropriate amount of disposal points arranged in strategic locations are essential to ensure coverage of the largest possible area (Sari, Masruroh and Asih, 2021).

WEEE disposal points must receive and store electronic products consumers discard without mischaracterizing these products until their transfer to their final environmentally appropriate disposal. Therefore, the appropriate location configures a point installed in a dry, clean, and safe place against theft, loss, and breakdown of

collector containers with coverage and signage (BRASIL, 2020). Moreover, one should consider the population's easy access.

The inadequate location of disposal points impacts the difficulty of consumers' disposal. Retail is a very important part of the WEEE LRS since it is the closest stage to consumers. Thus, retailers become mediators between the industry and consumers. As consumers acquire electronic products at these commercial establishments, they configure easy points for disposal after use. Management entities should think of these points strategically, prioritizing places that receive great circulation of people and are easily accessible to consumers, such as shopping malls, supermarkets, and large popular stores.

Moreover, the inadequate location of disposal points also impacts collection routes. Studies propose appropriate locations or criteria for this by simulating transportation routes. Aquino et al. (2020) highlight that the increase in WEEE maximized this problem due to the lack of adequate disposal sites (both in number and location). The authors proposed a mathematical model to allocate WEEE collection points to minimize the costs of opportunity, transportation, installation, and distance between demand and collection points. Sari, Masruroh and Asih (2021) conducted a study that aimed to design a collection system determining the number and location of disposal point facilities and the site of a transportation route from a collection center to a final disposal location. They concluded that a disposal point should have a maximum range of 11.2 km and that, although a challenge, it can also offer an opportunity for the head of LRS management to design a collection system.

The micro level offers two aspects for consideration. In cities considered small (with less than 80,000 inhabitants), the problem involving inadequate localization of disposal points can be minimized since urban areas are smaller and commercial establishments are usually concentrated in these areas, facilitating the distribution of points. Moreover, it may be feasible to consult with the population to select an efficient location.

However, the problem of distributing the number and strategic location of disposal points in rural areas is maximized depending on the distance between residences and city centers/municipalities. If the aforementioned study were to be considered, for example, a 11.2-km maximum range of a disposal point would likely amount to one

point for each residence in a rural area, resulting in an unfeasible system. Therefore, consumers may also opt for residential collection. However, if retail and/or managing entities provide this service, they should also provide adequate transportation, especially for large WEEE, such as refrigerators, stoves, etc.

### **2.3.2.2 Step (II): Collection and Receipt**

#### ***2A Collection rate and WEEE collection/disposal points***

The rate of WEEE collection/disposal is related to the behavior of consumers in relation to disposal, the degree of awareness of the population, legal issues, the fulfillment of goals, among other factors.

Most developing countries lack a WEEE legislation. In 2019, 78 countries had their WEEE legislation covering 71% of the world's population (Shahabuddin *et al.*, 2022). Although some countries have the necessary legislation in place to collect and recycle WEEE, some goals imposed on the volume of WEEE collected and/or treated are minimal, requiring no effort from the LRS chain to comply with it.

Regarding consumer behavior, it is observed that the storage of obsolete or damaged WEEE in homes is common either due to emotional attachment, misinformation or unwillingness, hindering the recycling and circularization of materials (Arya and Kumar, 2020; Okwu *et al.*, 2022; Santos and Ogunseitan, 2022).

Gunarathne, Alwis and Alahakoon (2020) claim that a challenge Sri Lankan families face in managing WEEE is their reluctance to dispose of televisions, refrigerators, rice cookers, and other old household equipment. This situation resembles that of some other developing countries and arises mainly due to lack of awareness.

However, at the micro level, the return rate of WEEE may suffer from the lower consumption link, which is directly related to local per capita production.

Zhang *et al.*, (2015) showed that China — a country with more than 50% of the population living in rural areas and a wide difference in income and living standards between rural and urban areas — has a penetration rate of electronic products below 50%. Most electronic devices, such as computers and air conditioners, often still work, despite their obsolescence. Moreover, its disposal rate of WEEE is non-existent or much lower than that offered by companies. Thus, according to this study, China may be a country that has a lower WEEE production rate and a higher rate of reuse.

However, its WEEE is still not discarded either due to the absence of this practice or of a local WEEE LRS.

For Andeobu, Wibowo and Grandhi (2021), one of the challenges affecting WEEE management in South Africa includes home and business WEEE return rates. The authors conclude that access to sufficient volumes of WEEE is the most significant challenge for the growth of the South African WEEE recycling industry and for companies to move from their current manual decommissioning and limited preprocessing to further processing.

Therefore micro WEEE return rates and collection/disposal points economically hinders the operationalization of reverse logistics systems due to the lack of scale. Possibly, the managing body of these locations will need to create a reverse logistics network that collects/receives WEEE from various locations in the vicinity to obtain a minimum WEEE weight. An example consists of inter-municipal municipal solid waste public consortia that, due to their formation and consolidation, require investments and support from the Union and the States. According to Ventura, Beatriz and Suquisiqui (2019), small municipalities demand the most attention due to the increase in the deficient provision of collection services as these municipalities lack financial resources the most and qualified technical personnel to manage municipal solid waste.

Directly linked to return rates, the insufficient amount collection points is a reality in many countries (Elia, Gnoni and Tornese, 2019; Gollakota, Gautam and Shu, 2020).

The lack of WEEE collection points incentivized informal collectors due to their accessibility, which expanded the informal WEEE sector (Bakhiyi et al., 2018; Chen, Faibil and Agyemang, 2020). Chen, Faibil and Agyemang (2020) also highlight the sub-barriers of this challenge: the lack of effective and acceptable collection models, site rental and employee recruitment costs, and the fear of competitive advantages from indirect collectors.

Bouvier and Wagner (2011) concluded that a barrier associated with WEEE collection systems (whether by voluntary delivery sites, private companies, and/or non-profit donation centers) is the lack or restricted access to a conveniently located facility.

According to Marczuk et al. (2019), reverse logistics systems require constant adaptation to changes in transportation structure and the amount of generated waste.



The increasing amount of WEEE discarded at certain times of the year would require a greater number of collection points, more frequent emptying during these periods, and additional information campaigns. This challenge must be solved by selecting and continuously cooperating with entities that will be responsible for monitoring the filling these points.

Marczuk et al. (2019) report that this challenge is faced mainly in urban centers. The micro level shows a smaller fluctuation in disposal behavior and thus in the collection of WEEE discarded during the year. Generally, the reality shows low return rates because of the longer life of obsolete devices, i.e., a lower purchase rate of electronic products.

Mmerekki, Li and Li'ao (2015) highlight that developed countries offer a variety of options for WEEE collection points (including sidewalk points, permanent delivery centers, and special delivery events) and points of purchase to facilitate WEEE collection. On the other hand, the lack of collection points impacts the micro level even more. Research by Gunarathne, Alwis and Alahakoon (2020) shows that the absence of WEEE collection points in less populous areas leaves most of the WEEE generated in these areas without formal collection. Thus, WEEE recyclers have the burden of establishing their own collection channels.

One of the causes of this challenge at the micro level may be the financial issue discussed earlier. WEEE collection points have considerable cost as, in addition to involving various types of waste containers, they also require storage and transportation to consolidation points until they are forwarded for recycling.

Another issue that influences is the legislative sphere. The WEEE LRS in Brazil (still in its implementation phase), for example, fails to provide collection/disposal points for small municipalities, i.e., the country lacks even a legal requirement by the decree that establishes the system in the country, inhibiting the establishment of points at the micro level.

Moreover, micro-level trading is also an influence factor. The micro level generally shows a predominance of local retailers and merchants (rather than commercial networks) who neither have the necessary information nor are charged for the availability of collection/disposal points. Therefore, note that retailers are a fundamental part of the LRS because they are the closest contact with consumers.

## **2B Insufficient WEEE receiving and sorting plants**

Chen, Faibil and Agyemang (2020) point out that the availability of an infrastructure system plays a significant role in stimulating management practices in the WEEE industry.

The need for these locations is, according to Tansel (2020), due to advances in product design for increasingly compact and efficient systems, which, in turn, have created challenges for recycling and recovering materials as they involve a lack of infrastructure, adequate collection mechanisms, and proper material recovery mechanisms and processes.

According to (Vieira *et al.*, 2020), the lack of a collection service routine reflects the absence of a structure to receive the collected WEEE. The limited planning of waste management and the lack of reverse logistics organization represent the absence of the organization that would enable the reuse, recycling, and remanufacturing of products. For Gunarathne, Alwis and Alahakoon (2020) and Okwu *et al.* (2022), the absence of well-established plants to receive and sort WEEE creates challenges (such as mixing WEEE with other types of waste), creating another problem not only for the collection but also for the treatment of WEEE.

The successful implementation of WEEE collection and its operation are of paramount importance to a developing country such as India, which has a considerable rate of WEEE production but an inadequate infrastructure. In addition to infrastructure, the distribution of collection points across geographical regions should be considered (Singh, Dasgupta and Routroy, 2022). Romania, as other Central and Eastern European countries, is far behind Western Europe in implementing reforms in the WEEE sector, and one of the main reasons for this gap is the lack of infrastructure to collect and recycle WEEE (Ciocoiu *et al.*, 2016).

According to Yao *et al.* (2013), the planning and optimization of a formal collection network are fundamental for the recovery of WEEE in China. The authors focused on the weaknesses of the WEEE recycling system and the precarious municipal WEEE collection facilities in Shanghai.

At the micro level, self-employed recyclers and informal sector companies may resist delivering WEEE to organized and equipped receiving and sorting plants. The

establishment of these plants would generate opportunities for cooperatives of more advanced waste pickers, for example, toward verticalizing the production chain.

Singh, Dasgupta and Routroy (2022) provide significant information: the reported literature mostly covers the collection of WEEE in urban areas and almost no study has evaluated rural areas. Different parts of India have measures to collect WEEE from urban and rural users but their volume of collection is far from the expected value despite various stakeholders' efforts, such as the government and manufacturers, to improve it.

### ***2C Intelligent WEEE collection systems not applied***

Smart systems play a crucial role in optimizing all stages of WEEE management, encompassing operations, tracking, collection, recycling, and overall management. These technological solutions leverage automation, data analysis, and connectivity to enhance the efficiency and sustainability of management. These systems encompass monitoring and tracking, data analysis, and online platforms.

Their advantages are notable: optimization of collection, sorting, and recycling operations with reduced costs and required resources; enhancement of traceability, facilitating the tracking of product lifecycles and thus reinforcing accountability; and production of crucial data to support decisions, including consumption patterns, product types, and waste flows (Shevchenko *et al.*, 2021).

The Internet of Things and smart systems have a close and highly synergistic relation. The Internet of Things is a network of physical objects embedded in sensors, software, and technologies that aims to connect and exchange data with other devices and systems over the Internet. These devices and systems range from common household objects to sophisticated industrial tools, which can be applied to waste management (Haque *et al.*, 2020). When applied to WEEE management systems, IoT plays a pivotal role in creating more efficient and responsive smart systems. Consequently, smart technologies can drive the transformation of waste management practices toward a more circular economic model.

According to Favot *et al.* (2022), European extended producer responsibility models to manage WEEE have been introduced, reflecting variations in market concentration and player responsibilities across countries. These models include the State Fund (eco-tax) Model, in which producers contribute to a waste management fund

(potentially coordinated by a government agency); the Single Organization Model, characterized by industry-controlled compliance organizations and environmental agreements; the Competing Organization Model, in which compliance organizations handle take-back duties and compete based on fees; and miscellaneous producer-funded models. These models, although developed for the macro level, can also be adapted for the micro level if modified appropriately.

Kazancoglu et al. (2020) highlight the gap, especially in WEEE collection processes, based on tracking technologies and intelligent collection systems. The authors report that collection process digitization should be designed to leverage support and provide social, economic, and environmental benefits, such as reducing air pollution, improving working patterns, and reducing waste by using new technologies such as smart vehicles. Therefore, the implementation of digital technologies in WEEE collection processes provides process traceability and cost and time recovery per collection point.

Nowakowski and Pamuła (2020) investigated a system to facilitate the planning of WEEE collection and facilitate communication between individuals who request the collection of waste and collection companies. The authors claim that the mobile applications that currently support waste collection are relatively limited and primarily used to find waste collection points or set reminders related to the collection schedule. Additional features, such as vehicle route planning, could improve these applications.

Elia, Gnoni and Tornese (2019) find that the adoption of dynamic approaches to WEEE collection based on variable (rather than fixed) collection frequencies could help improve the overall efficiency of collection processes. Moreover, the demand for sustainable, low-carbon urban logistics is also increasing due to urban pollution and congestion. The authors described different models of WEEE collection, comparing them by simulation modeling, which enabled them to evaluate a set of key integrated performance indicators, evincing the benefits and limits of different logistic scenarios.

Yao et al. (2013) claim that the project of the WEEE collection network is a typical reverse logistics issue characterized by a convergent structure, in which end-of-life products are collected from many users and transported to a reduced number of recyclers by vehicle routing.

In the research by Yao et al. (2013), the WEEE collection and transportation network in Shanghai take place in an integrated solution approach. Collection and transit locations are identified by quadratic optimization models, and a well-organized collection scheme is then offered as a comprehensive scheduling guidance. The vehicle routing problem consists of locating the best route to a destination from a starting point with numerous variations and solutions.

Routes can be facilitated at the micro level due to the few collection points and smaller local centers (if centralized), unlike rural areas. Another point is financial resource scarcity. In fact, digital transformation projects require high investments to acquire technologies that remain expensive for management and the cost of information technology professionals, who are increasingly disputed in the market. Finally, a data infrastructure is needed, in view of the difficulties of storing public data and the need to integrate the systems used in city halls.

### **2.3.2.3 Stage (III): Transportation**

Regarding transportation challenges, to provide a more realistic analysis, it is crucial to emphasize that issues related to the inadequate transportation infrastructure for WEEE and extensive costly distances are not only confined to micro levels and developing countries (Costa, Nascimento and Ometto, 2020; Feitosa, 2020; Hansen et al., 2022; Kazançoglu et al., 2020; Nowakowski and Mrówczyńska, 2018; Wilker et al., 2022), but also extend to macro levels and developed nations (Hong, Chu and Wang, 2011; Nowakowski and Mrówczyńska, 2018). Even in developed countries with implemented RLSs, transportation demands careful locally adapted approaches.

The complexity stems from transportation challenges significantly differing between developed and developing countries due to disparities in their realities. Of all process stages, transportation shows the greatest discrepancy in reality between these two types of nations. A transportation challenge faced by a developing country can be exponentially more arduous than that faced by developed nations. While the nature of the problem remains the same, its magnitude varies according to context.

Lastly, the literature has significant limitations substantiating the discussion on transportation-associated challenges, constituting a substantial gap in this field of study. It is essential that more in-depth studies are conducted to explore this intricate transportation issue. The substantial discrepancies in transportation realities between

developed and developing countries and micro and macro perspectives underscore the urgent need to fill this research gap, which this study has clearly identified.

### **3A Deficient WEEE transportation infrastructure**

The main transportation modes are divided into five categories: rail, road, waterway, air, and pipeline. Since infrastructure is the set of fundamental services for the socioeconomic development of a location, the transportation infrastructure refers to roads, highways, bridges, tunnels, railways, airports, ports, waterways, among others (Araújo *et al.*, 2019).

A system that makes infrastructure impossible or in some way disrupts the flow of transportation of a region regardless of the type of transportation is considered inadequate. Some examples include problems with signage, plate readability and visibility, lack of protective devices, road obstacles and disturbances, insufficient and poor breakdown lanes, curves with small rays and low visibility, very narrow roads, worn pavement, etc. (Wilker *et al.*, 2022).

Hansen *et al.* (2022) point out that a potential barrier to the inclusion of WEEE management in investment decisions is the lack of waste transportation and recycling infrastructure. While the authors conclude that many developing countries lack such infrastructure (especially in rural areas), they fail to specify the type of structure but it is understood as referring to routes, bridges, tunnels, airports, ports, etc.

Nowakowski and Mrówczyńska (2018) report that restrictions such as lack of parking should be considered in city centers, busy streets, narrow sidewalks, etc. depending on the collection model. These factors can prevent the successful implementation of mobile collection in these areas, unlike rural areas, for example.

According to Feitosa (2020), the management responsible for treating waste in small municipalities has few employees and a minimum truck fleet, which hinders the process of collection and transportation to a final destination. Moreover, it is important to highlight that the responsibility for collecting and transporting WEEE lies in the companies or entities managing the LRS, who are also expected to hire trained professionals.

Another important point is the need to comply with current legislation on the transportation of certain types of WEEE classified as hazardous waste. This procedure

may involve criteria such as handling with diligent care to avoid breakage; appropriate packaging or storage to minimize risks of breakage; no tilting of collectors containing fragile products; no crushing, pressing, or compacting WEEE during transportation; transportation vehicle with a closed or covered chassis; etc.

### **3B Long and costly distances**

The results of the Nowakowski and Mrówczyńska (2018) research indicate that the extension of the route in the transportation of waste is the main factor on emissions and the sustainability of collection methods. The authors conclude that mobile collection has some limitations in densely populated urban areas and that the collection of WEEE at the time of delivery of new equipment is the most efficient method since it avoids additional expenses and emissions.

Hansen et al. (2022) point out the need for waste transportation and recycling services in Kenya — and East Africa in general despite differences between countries and provinces. They also highlight that the transportation of waste is particularly complicated due to the distances between users, making it difficult to collect devices, including economically.

Transportation costs directly impacts economic viability. For Kazançoğlu et al. (2020), the shipping cost is considered the most important criterion for difficulties locating sorting centers. In the transportation of hazardous waste, two key objectives considered are cost and risk, with the shortest route equaling the fastest route for carrier companies (Liang *et al.*, 2020).

Therefore, according to its structure, the improvement of accessibility to transportation reduces travel time and cost, increases traffic volume, and spatially redistributes economic activities (Hong, Chu and Wang, 2011).

This challenge has no relevant impact in small and localized centers as they only have small-scale routes, but long routes negatively affect the rural micro level. According to (Costa, Nascimento and Ometto, 2020), in most Brazilian municipalities, waste transportation and final disposal are carried out at random, without deep analysis to reduce route extensions, thus using a larger amount of fuel and increasing process costs and impacting air quality.

#### **2.3.2.4 Step (IV): Final Destination**

An environmentally appropriate final destination involves reuse, recycling, resource recovery, energy use, or other destinations. Most of the challenges found refer to recycling.

##### ***4A Lack of technical training to work in the WEEE recycling sector***

The WEEE recycling workforce is unqualified (Kumar and Dixit, 2018b; Mmereki, Li and Li'ao, 2015; Sharma, Joshi and Govindan, 2021). Among the main challenges for WEEE management is the lack of training to safely handle and process products during the recovery of materials in uncontrolled recycling operations (Tansel, 2017).

Arya and Kumar (2020) reported that the biggest challenge in the WEEE management system in India is lack of technical knowledge. The authors also warn of inadequate disposal, after which the waste is sent to landfills or incinerators of municipal solid waste with limited chance of separation before its final destination, leading to environmental and health risks.

For Kazançoğlu et al. (2020), the barrier with the second highest impact is the lack of qualification and education of workers and that urban recovery operations require certain technical skills (unlike other sectors). Gollakota, Gautam and Shu (2020) found that most recycling operations are manual, especially in developing countries. The authors point out that the sophisticated technologies installed are at suboptimal operational scale due to workers' lack of training for operations.

Moreover, Imran et al. (2017) attest that technical knowledge and awareness of the problem go hand in hand. Due to the lack of awareness of the general public and WEEE stakeholders, very few have experience in WEEE management.

This challenge is intensified at the micro level. Masud et al. (2019) points out that the implementation of WEEE management technology in remote areas is another challenging task; the resolution of problems associated with operation and maintenance becomes difficult due to the lack of adequate knowledge and information.

Islands exemplify the micro level, in which the lack of technical assistance is an intense challenge. Araujo et al. (2017) considered the application of their study on an island and, due to the lack of professionals to repair electronic devices, new equipment was favored to quickly replace damaged equipment, thus increasing the problems of



WEEE management on site. WEEE can accumulate on the island for about three months before being sent to their final destination: municipal sorting and recycling units in Pernambuco, Brazil (Araujo *et al.*, 2017).

#### **4B Research and Development shortage of WEEE recycling technologies**

Arya and Kumar (2020) report that the environmentally correct management of electronic waste in developing countries is either limited or completely absent. WEEE management is more complex than municipal solid waste management due to the higher toxic concentration in electronic devices, thus requiring special techniques to treat WEEE and prevent leakage and dissipation of toxins into the environment.

(Kumar and Dixit, 2018a) point out that the sustainability of WEEE management practices depends on available technologies and recycling techniques and that one of the main problems related to WEEE management is the lack of advanced technologies. There is a gap in the Research and Development of WEEE recycling technologies (Song *et al.*, 2017; Vieira *et al.*, 2020) as well as in the communication between industries that recycle waste and end users of electronic items, hindering the development of technologies that can manage waste (Jangre, Prasad and Patel, 2022).

The application of advanced technologies in integrated recycling plants significantly increases material recovery and reduces impacts on the environment and humans (Zhang *et al.*, 2015). However, in the best circumstances, current recycling methods are imperfect and lead to the loss of critical materials in small concentrations (Salmon *et al.*, 2021).

Sharma, Joshi and Govindan (2021) claim that a huge amount of metals remains untapped due to inefficient treatments and Bakhiyi *et al.* (2018) conclude that metal recovery technologies still perform poorly (e.g., difficulties recycling valuable metals) and are still immature and/or polluting.

Some WEEE components, such as PCB, CRT monitors, and LCD screens, also remain extremely difficult to recycle, mainly due to their complexity, dangerous nature, and inefficient recycling technologies, so much so that many recyclers simply refuse to process them (Afonso, 2018; Liu *et al.*, 2017).

Santos and Ogunseitan (2022) report that the variability of WEEE requires advanced technologies to recover critical materials and rare earth elements. Due to the lack of technologies and investments, Brazil only undertakes the dismantling process. Recycling processes that recover critical metals and/or rare-earth elements (which are requested worldwide) should be evaluated as an economic opportunity (Santos and Ogunseitan, 2022).

The lack of advanced WEEE recycling technologies is even more visible at the micro level. These technologies have a high cost and are applied in power plants, a distant reality for rural localities. Although the level of investment required for different technologies in the circular economy varies significantly, certain technologies and innovations often require prohibitive financial investment for many companies, especially small and medium-sized enterprises (Rizos and Bryhn, 2022).

Yong, Lim and Ilankoon (2019) claim that WEEE value recovery operations in Malaysia have suboptimal metal recovery and energy efficiency. The authors conclude that this calls for the continuous technical improvement of these semi-formal businesses recovering the value of electronic waste in Malaysia.

In addition to composition, advances in product design toward increasingly compact and efficient systems have created challenges for recycling and recovering WEEE materials due to the lack of appropriate material recovery mechanisms and processes and of adequate infrastructure and collection mechanisms (Tansel, 2020).

#### ***4C Absence or an insufficient number of WEEE recycling companies***

Management could efficiently handle WEEE collection, transportation, recycling, and disposal by an effective infrastructure (Kumar and Dixit, 2018b). Chen, Faibil and Agyemang (2020) highlight that the availability of an adequate infrastructure system plays a significant role in stimulating appropriate management practices in the WEEE industry. A proper on-premises infrastructure improves the process of implementing formal WEEE management practices.

Kumar and Dixit (2018a) and Sharma, Joshi and Govindan (2021) found the great incidence of formal WEEE treatment facilities facing infrastructure barriers. These include lack of facilities (storage, transportation, treatment, and disposal) and limited planning of WEEE production.

Nnorom, Osibanjo and Ogwuegbu (2011) conclude that one of the main restrictions to good WEEE management in developing countries is the unavailability of formal recycling infrastructure. WEEE management is a considerably more difficult challenge in developing countries due to the lack of sufficient and safe facilities to recycle WEEE, which entails the accumulation of waste at home and/or inadequate disposal (Acquah et al., 2021; Almulhim, 2022; Andeobu, Wibowo and Grandhi, 2021b; Berežni et al., 2021; Gollakota, Gautam and Shu, 2020; Kazançoglu et al., 2020; Mmereki, Li and Li'ao, 2015; Song et al., 2017).

In emerging countries, most companies only collect WEEE, reverse manufacturing and mischaracterizing them, and destining their waste to landfills. Once separated, value-added materials such as PCB are sold to recycling plants in developed countries due to the absence of recycling companies to extract precious metals in most emerging countries (Muniz *et al.*, 2017).

Andeobu, Wibowo and Grandhi (2021) claim that the infrastructure to manage and recycle WEEE in most of Nigeria is limited or non-existent. Nigeria faces several challenges, such as the lack of standardized recycling sites and lack of adequate infrastructure for WEEE management (Okwu *et al.*, 2022). Sirisawat et al. (2015) found a general lack of efficiency within the reverse logistics system in Thailand and no suitable place to consolidate WEEE in communities. Neto, Silva and Santos (2019) stated that the main barriers to reverse logistics is the lack of adequate facilities to extract precious metals in Brazil, which represents the final treatment phase of WEEE.

The absence of a formal recycler is a persistent challenge at the micro level. Yao et al. (2013) showed the precarious municipal WEEE collection facilities in Shanghai. Afonso (2018) points out that the management of WEEE in Brazil is still in its infancy as it lacks an infrastructure that considers regional differences and territorial extension. Finally, Rautela et al. (2021) conclude that WEEE recycling and treatment facilities require advanced capital investments, but only a few countries allocate budgets for WEEE management.

#### ***4D Heterogeneous composition hinders treatment***

In general, WEEE comprises 40% metal, 30% plastic polymers, and 30% oxides of varied materials. However, these quantities can vary significantly from country to country due to uneven mixtures of electrical and electronic equipment in WEEE

((Shahabuddin *et al.*, 2022). Some components receive specific treatment due to their toxicity such as batteries (which undergo a separate recycling process) and cathode ray tube monitors (since they contain lead).

These products may also have unrecyclable materials, such as paper (adhesives, labels, carbon paper, and metallized, paraffinized, and laminated papers), plastics (adhesives, foam, and polystyrene), glass (mirrors and ceramics), rubber, and even wood (TV cabinets and old stereos), which compose part of the packaging for transportation and thus have a low participation in the composition of these products (Ribeiro, 2019).

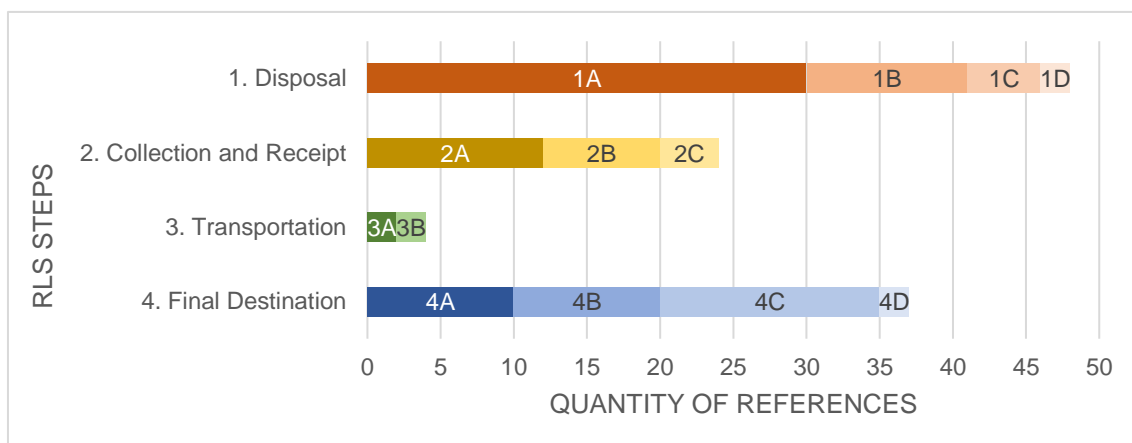
Many developed countries face the problem of separating WEEE due to their complex composition (Rajesh, Kanakadhurga and Prabaharan, 2022). Shahabuddin *et al.* (2022) report that handling and processing WEEE still offer a challenge due to their complex mix of hazardous, precious, basic, and other materials.

In general, mechanical separation processes are used as pre-treatment, including methods such as grinding, electrostatic and magnetic separation, particle size classification, among others. Generally, this pre-process is the only treatment that occurs at the micro level due to its technical ease and low cost. However, the lack of technical training in the WEEE recycling sector (as mentioned above) can make it a complex process.

## 2.4 FINAL CONSIDERATIONS

Figure 3 shows the density of bibliographic citations related to the identified challenges per operational stage of the WEEE LRS discussed in this review.

Figure 3 - Density of references per step.



Source: The Authors, 2022.

Figure 3 shows that, of the stages of the WEEE LRS, disposal (48 studies) has the most bibliographic citations, followed by final destination (37 studies), collection and receipt (24 studies) and, finally, transportation (4 studies). The number of bibliographic citations for each stage shows discrepancies and the figure shows the importance future studies on WEEE management should give to transportation.

Therefore, after combining all the challenges encountered, WEEE LRSs in developed countries can serve as an example for developing countries, which often lack such system. Many developed countries already have WEEE recycling policies and facilities, but the problem lies in developing countries with higher population densities, in which it is difficult to collect, sort, and recycle WEEE (Tembhare *et al.*, 2022).

Moreover, it is necessary to consider that each site has particularities and that the micro level demands attention and adjustment to them. Thus, Marinello and Gamberini (2021) claim the need to better disseminate WEEE management approaches, optimize current practices, or design specific solutions according to the needs and characteristics of different territories. The authors state that no single solution will suffice for all countries and that each should be addressed according to their own social, political, and economic circumstances (Shahrasbi, Shokouhyar and Zeidyahyae, 2021).

Andeobu, Wibowo and Grandhi (2021) conclude that local government councils are the main stakeholders in the management and recycling process, thus incurring expenses to deal with WEEE and requiring policymakers to understand the determinants, motivations, and costs associated with collecting and disposing of WEEE. Gunarathne, Alwis and Alahakoon (2020) claim that since waste management in developing countries is highly contextual viable and sustainable solutions must be designed to meet specific local circumstances.

Koshta, Patra and Singh (2021) argue that a national WEEE estimate provides a more comprehensive view of what is generated in a country but that these estimates are of limited use to an LRS since they fail to consider the effect of economic and social variables at the local level, critical to the efficient operation of such system. Thus, a micro-level strategy is essential to operationalize WEEE LRS.

## **Study limitations**

A pertinent observation is that the examined literature addresses the challenges of WEEE RLS in a general manner, without delving into discussions at both macro and micro levels. The employed methodology, a systematic literature review, in turn reflects this gap, as the absence of specific focus on these levels translates into an inherent limitation of the study.

Furthermore, it's important to highlight that the analysis is predominantly theoretical, lacking empirical data or local diagnoses. The absence of practical examples limits the tangibility of conclusions and the applicability of the discussed ideas. This scenario is particularly noticeable when considering developing countries in the initial phase of RLS implementation. In these contexts, not only is the discussion at the micro level scarce, but the very inclusion of the micro level in the early stages of system implementation is incipient.

In summary, the study provides valuable insights; however, it's crucial to acknowledge and address these limitations to properly contextualize its findings. Future investigations should consider more comprehensive approaches that encompass discussions at both macro and micro scales and seek ways to enrich theoretical analysis with practical examples, especially in the contexts of developing countries.

## **2.5 CONCLUSIONS**

In all, 13 challenges were identified according to their operational stage (Disposal: 4; Collection and Receipt: 3; Transportation: 2; and Final Destination: 4).

Some of the found challenges were also discussed, addressing the importance of supervising and controlling WEEE LRSs. These challenges involve informal recycling, amounts not legally registered, lack of recycling measurement systems, illegal export to developing countries, and lack of knowledge sharing between the formal and informal WEEE sectors. Several studies have reported informal recycling as a challenge, configuring a concern at the micro level. However, this level produces an irrelevant amount of WEEE compared to developed countries, making informal recycling an easier challenge to circumvent.

The challenge *The population and LRS entities' lack or insufficient training and awareness* have a greater number of results in our search, this configuring a challenge

thoroughly addressed in the literature. At the micro level, the rural communities lack even more awareness about WEEE management, for example. However, because such communities are smaller, they enjoy the advantage of covering their entire population (or almost) with an awareness campaign.

In addition to this challenge, at the micro level, the challenges identified with the greatest impact are *Absence or insufficient number of WEEE recycling companies; Return rate and WEEE collection/disposal points; Insufficient WEEE receiving and sorting plants; Deficient WEEE transportation infrastructure; Long and costly distances; and Inadequate distribution of WEEE disposal points.*

Return rates and WEEE collection/disposal points can be a difficult challenge to address because, the function of any system requires a minimum amount of waste, which a single collection point may fail to achieve. The general lack of collection or transportation structure, the use of WEEE recycling companies, and insufficient collection points (given their cost) are difficult to overcome by the restrictions and financial dependence of these places. The inadequate location of receiving/collecting points is an easy challenge to circumvent at the micro level since it has only a few points available, and a mathematical study could find the optimal location. Long and costly distances are a worrying challenge in rural localities, configuring an inevitable difficult as collection points generally lie far from centers.

The identified challenges with less impact refer to *Difficulty classifying and segregating WEEE; Intelligent WEEE collection systems not applied; Research and Development shortage of WEEE recycling technologies; Heterogeneous composition hinders treatment; Inadequate disposal of WEEE; and Lack of technical training to work in the WEEE recycling sector.*

Some challenges cause less impact because they already require some development in the implementation of an LRS that may be absent at the micro level. Although very important, intelligent collection systems and advanced technologies require implementation basics, constituting a future investment claim for the micro level. Other challenges are more impactful when related to a relevant amount of WEEE, such as inadequate disposal, classification and segregation difficulties, and the heterogeneous composition of WEEE (only relevant for the macro level).

Although the legal point of view evinces the mandatory implementation of WEEE RLS, it is essential that these directions be ratified at the state and municipal level given the particularities that occur mainly at the municipal level such as those addressed in this study. Finally, the challenges emerging countries faced in managing WEEE offer a complex process due to the number of stakeholders involved and the complexities of the macro environment, thus requiring a systematic approach to understand the multifaceted and multi-stakeholder challenges of WEEE recycling in these countries.

In conclusion, the impact of this study is to shed light on the discussion surrounding the challenges of WEEE RLS in a micro perspective, encompassing both developing and developed countries. In developing countries, the emphasis lies in the meticulous consideration of the micro sphere when implementing or strengthening RLS. This implies a shift from the traditionally focused approach on urban centers and regions with higher WEEE generation. Instead, it is imperative to recognize the importance of incorporating areas with economic limitations, geographical isolation, inequalities, environmental challenges, and even geopolitical issues. In developed countries, the desired impact is the expansion of RLS coverage, aiming to encompass as much waste as possible. Even countries that have implemented such systems must extend its reach. Special attention should be directed toward micro-level areas that may have been overlooked regarding coverage. Therefore, this study not only seeks to emphasize the importance of RLS, but also to foster a comprehensive approach that considers the nuances of different contexts, promoting a more equitable and efficient treatment of WEEE.



## **CAPÍTULO 3: DIRETRIZES E ESTRATÉGIAS PARA IMPLEMENTAÇÃO E OPERACIONALIZAÇÃO DO SISTEMA DE LOGÍSTICA REVERSA DE RESÍDUOS ELETROELETRÔNICOS EM MUNICÍPIOS BRASILEIROS DE PEQUENO PORTE**

### **RESUMO**

Embora o Decreto Federal brasileiro nº 10.240/2020, em vigor desde fevereiro de 2020, tenha estabelecido atendimento para cidades com população superior à 80 mil habitantes para o Sistema de Logística Reversa Obrigatória (SLRO) de Resíduos Eletroeletrônicos (REEE) no Brasil, atendendo a 60% da população brasileira até 2025, o corte populacional firmado não engloba 93% do total de municípios no Brasil. Este estudo identificou a necessidade de compreender as causas raízes desses desafios nessas áreas e propôs diretrizes e estratégias para facilitar a implementação do SLR de REEE. Foram utilizadas várias abordagens, como questionários, grupos de foco e análises de documentos para coletar dados e validar os desafios identificados. Os resultados mostraram a importância dos desafios identificados, com o descarte inadequado de REEE sendo um problema principal. As diretrizes e estratégias propostas têm o potencial de apoiar os tomadores de decisão na promoção da implementação do SLR de REEE em municípios de pequeno porte no Brasil.

**Palavras-Chave:** Resíduos Eletroeletrônicos, Logística Reversa, Diretrizes, Municípios, Ilhas, Área rural

### **3.1 INTRODUÇÃO**

No Brasil, a Lei Federal nº 12.305/2010 instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) e determinou a implementação obrigatória de um Sistema de Logística Reversa (SLR) para Resíduos Eletroeletrônicos (REEE), dentre outros resíduos, descrevendo a responsabilidade compartilhada dos fabricantes, importadores, distribuidores, comerciantes e consumidores (BRASIL, 2010).

Nesse sentido, em outubro de 2019, foi assinado o Acordo Setorial (AS) para implementação e operacionalização do SLR de REEE de uso doméstico e seus

componentes, em atendimento à PNRS (ABINEE, 2019), cuja Fase 1 compreendia a criação do Grupo de Acompanhamento de Performance, adesão dos atores envolvidos e estruturação de mecanismo de monitoramento e acompanhamento das ações e a Fase 2 envolvia a implementação na prática, habilitando os prestadores de serviços e instalando os pontos de recebimento previstos em cada município, sendo contemplados pelo acordo somente municípios com número de habitantes maior do que 80 mil.

No entanto, em fevereiro de 2020, passou a vigorar o Decreto Federal nº 10.240/2020 que determina que até 2025, o SLR de REEE alcance 400 dos maiores municípios brasileiros e cinco mil pontos de coleta, atingindo por volta de 60% da população brasileira (BRASIL, 2020). Apesar da Fase 2 atingir mais da metade da população do país, abrange somente municípios brasileiros com mais de 80 mil habitantes, ou seja, representa cerca de 7% da totalidade municipal brasileira, dado que o Brasil possui 5.570 municípios (IBGE, 2021).

Na prática, apesar do Decreto Federal nº 10.240, em seu art. 8º determinar que “*não será admitida a exclusão de municípios, somente o remanejamento dos municípios a serem atendidos ao longo dos anos*”, a implementação e operacionalização do SLR de REEE em municípios de pequeno porte encontra entraves, tais como a falta de informação de implicações práticas, a falta de uma infraestrutura adequada e a falta de corpo técnico para a gestão e gerenciamento dos resíduos sólidos de forma geral.

Cabe ressaltar que é de responsabilidade dos municípios e do Distrito Federal a gestão integrada dos resíduos sólidos urbanos, assim como elaborar o Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos (PMGIRS), abrangendo a descrição das formas e dos limites de participação no poder público local na logística reversa. Porém, a PNRS, através dos art. 33 e do art. 36, exclui qualquer responsabilidade do titular do serviço público de limpeza urbana e de manejo de resíduos sólidos na implementação e operacionalização da logística reversa.

Por outra perspectiva, ao analisarmos o art. 31 da Lei nº 12.305/2010 e os artigos 12 a 29 do Decreto Federal nº 10.936/2022 (Cap. III – Da Logística Reversa), que regulamenta a Lei nº 12.305/2010, nota-se que, além de poder, é recomendável que os municípios participem da implementação da logística reversa como gestores e/ou corresponsáveis do sistema.

Nesse sentido, o Plano Estadual de Resíduos Sólidos do Estado do Espírito Santo (PERS-ES), por exemplo, propôs como diretriz/estratégia para implementação do SLR de REEE “*fomentar discussão e ratificar Acordos Setoriais Estaduais para os resíduos com logística reversa obrigatória* (conforme art. 33º da Lei Federal nº12.305/2010)”, de forma a garantir que todos os municípios façam parte da cadeia reversa de REEE.

Outro exemplo é o Plano Estadual de Resíduos Sólidos do Rio de Janeiro (PERS-RJ), onde um dos seus objetivos específicos é “*avançar na implementação dos sistemas de logística reversa por meio dos acordos setoriais estaduais e termos de compromisso com fabricantes, importadores e distribuidores, nos diferentes fluxos de resíduos*”.

Todavia, apesar do arcabouço legal supracitado (leis, decretos, acordos setoriais e planos) favorecer a implementação do SLR de REEE, na prática, o Brasil ainda precisa desenvolver e aprimorar a cadeia operacional reversa, que, conforme mencionado anteriormente, ainda encontra diversos desafios, em especial no nível micro.

Os estudos realizados por Bouzon, Govindan e Rodriguez (2018) e Sirisawat e Kiatcharoenpol (2018) apontam desafios como: falta de mão de obra qualificada, falta de tecnologias mais recentes, dificuldades com os membros da cadeia de suprimentos, previsão e planejamento limitados em atividades da logística reversa, falta de leis específicas, falta de práticas de gerenciamento de resíduos e falta de priorização em termos de recursos financeiros. Além da análise desses desafios, é relevante identificar os indivíduos influenciados por elas, pois avaliando perspectivas de diversas partes interessadas, a partir da criação de iniciativas estratégicas, é que se aumenta a efetividade na implementação do SLR (Bouzon, Govindan e Rodriguez, 2018).

Sob a ótica da governança corporativa, esses desafios são considerados como disfunções e podem ser de diversos tipos (operacional, técnica, legal, ambiental, cultural e social) (Siman *et al.*, 2020). Identificar esses desafios e entender como se relacionam, permite identificar as causas-raízes e traçar uma lista prioritária de ações para a implementação da LR. De forma aplicada, em relação a implementação e operacionalização do SLR de REEE, conhecer as causas-raízes possibilita direcionar

quais estratégias podem ser adotadas, bem como que diretrizes devem ser elencadas.

Observado o contexto descrito, percebeu-se a necessidade de estabelecer diretrizes e estratégias para a implementação e operacionalização do SLR de REEE tomando como estudo de caso os municípios brasileiros que possuem menos do que 80 mil habitantes, denominados nesta pesquisa como “*municípios de pequeno porte*”.

Diante do exposto, identificou-se como lacuna de pesquisa a necessidade de identificar as causas raízes desses desafios em municípios brasileiros de pequeno porte, de modo que seja possível propor diretrizes e estratégias para que viabilize e facilite a implementação e operacionalização do SLR de REEE.

### **3.2 METODOLOGIA**

#### **3.2.1 Estudo de caso**

Nesta pesquisa, classificamos como municípios de pequeno porte aqueles com menos de 80 mil habitantes, totalizando 5.170 municípios brasileiros. O estudo de caso incluiu esses municípios de pequeno porte, uma vez que o Decreto Federal nº 10.240/2020 estabelece a obrigatoriedade de implementação do SLR para REEE somente em municípios de grande porte, com mais de 80 mil habitantes, como mencionado anteriormente.

#### **3.2.2 Etapa 1 – Validação dos desafios relacionados a implementação e operacionalização do SLR de REEE**

Nesta etapa, o objetivo foi validar os desafios em nível micro identificados por Silva et al. (2023), apresentados no Quadro 1, e identificar novos desafios em municípios brasileiros de pequeno porte.

Quadro 1 - Desafios para operacionalização e implantação do SLR de REEE.

<b>Etapa operacional</b>	<b>Desafios</b>
1 Descarte	1.1 Ausência ou quantidade insuficiente de programas de capacitação e conscientização da população e dos entes dos SLR
	1.2 Descarte inadequado de REEE
	1.3 Dificuldade de classificação e segregação dos REEE
	1.4 Distribuição inadequada de pontos de descarte de REEE
2 Coleta e Recebimento	2.1 Taxa de coleta de REEE incipiente e Pontos de coleta/descarte de REEE incipiente
	2.2 Centrais de recebimento e triagem de REEE insuficientes
	2.3 Sistemas inteligentes de coleta de REEE inaplicados

<b>Etapa operacional</b>	<b>Desafios</b>
3 Transporte	3.1 Infraestruturas de transporte de REEE deficientes
	3.2 Distâncias extensas e onerosas
4 Destinação de resíduos	4.1 Falta de capacitação técnica para atuar no setor de reciclagem de REEE
	4.2 Carência em P&D de tecnologias de reciclagem de REEE
	4.3 Ausência ou quantidade insuficiente de empresas recicladoras de REEE
	4.4 Composição heterogênea dificulta o tratamento

Fonte: Silva et al. (2023).

Para tanto, utilizou-se a ferramenta *Survey* sob a forma de questionário, contendo tanto perguntas abertas quanto fechadas.

O *Survey* de coleta de dados é aplicado no adensamento da pesquisa sistemática da literatura e sua aplicação abrange diversas áreas do conhecimento. As duas razões principais para usar amostras no estudo científico são economia de tempo e economia de recursos. Em geral, coletar informações sobre todo o meio pode inviabilizar alguns planejamentos de pesquisa (Paranhos *et al.*, 2013) e a aplicação de *Survey* de forma online é uma opção de baixo custo que contribui com a realização de pesquisas científicas com aplicação de questionários.

Dessa forma, o questionário foi elaborado por meio da plataforma de enquete eletrônica da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), um sistema que permite que o usuário elabore a pesquisa eletrônica à comunidade universitária e externa.

Na primeira seção do formulário continham informações básicas como o nome da pesquisa, da pesquisadora e da orientadora, o objetivo da pesquisa e o informe de que as informações e os dados repassados pelo formulário estão sob total sigilo, sendo utilizados somente como fonte para estudos acadêmicos.

A próxima seção era sobre o consentimento do participante e disponibilizava o Termo de Consentimento Livre e Esclarecido (TCLE), que apresentava os possíveis benefícios, riscos, garantias e assistências pela participação na pesquisa. Isto porque o questionário foi submetido à aprovação do Comitê de Ética em Pesquisa (CEP) da UFES, parecer número 5.956.171, que tem como finalidade avaliar e acompanhar os projetos de pesquisa com a participação de seres humanos, no que tange as questões éticas, garantindo a integridade e a dignidade dos participantes. Ao final desta seção, o participante deveria escolher a opção “Concordo em participar” para seguir.

A seção seguinte era para coletar duas informações sobre o entrevistado: o setor e o município/estado representado. Destaca-se que o setor foi dividido em Acadêmico (alunos e professores), Comunitário (público em geral), Empresarial (comércio e indústria), Institucional (prefeituras, órgãos e/ou instituições públicas), Rural (população de comunidades rurais) e Outros, pois assim assegura-se uma abrangente categorização das diversas origens e representações dos entrevistados, permitindo uma análise mais aprofundada e uma compreensão completa das perspectivas envolvidas.

A subdivisão do setor em categorias distintas, como Acadêmico, Comunitário, Empresarial, Institucional, Rural e Outros visa capturar a diversidade de experiências e pontos de vista presentes no estudo. Essa segmentação estruturada facilita a identificação de padrões, tendências e discrepâncias entre os diferentes grupos, conferindo maior solidez às conclusões e enriquecendo a interpretação dos resultados obtidos.

Para cada desafio existia uma resposta única e as opções eram “Concordo”, “Discordo”, “Não sei opinar”. Ao final de cada etapa existia a pergunta aberta “Gostaria de fazer algum comentário sobre os desafios da Etapa X?”, isso se dá, pois, esse formato permite a coleta não apenas das opiniões quantitativas sobre os desafios apresentados, mas também abre espaço para *insights* qualitativos e observações detalhadas por parte dos entrevistados.

A inclusão da pergunta aberta visa capturar nuances e contextos que podem não ser abordados nas opções pré-definidas de resposta, incentivando os participantes a compartilhar suas percepções de forma mais ampla e personalizada. Essa abordagem enriquece a compreensão dos resultados, possibilita a identificação de aspectos subjacentes e, ao mesmo tempo, oferece uma oportunidade para os entrevistados expressarem considerações específicas e contribuições relacionadas aos desafios em cada etapa operacional.

Por fim, ao final do questionário, foi apresentada uma pergunta aberta para recolha de novos desafios, caso existisse na percepção do participante (Existe algum desafio operacional para implementação do SLR de REEE nos municípios brasileiros de pequeno porte que você, como representante/profissional/especialista da área, não

encontrou na listagem e gostaria de compartilhar?), para assim incluir um espaço para a inclusão de perspectivas não previstas nas etapas anteriores do questionário.

Essa questão visa capturar possíveis desafios que possam ter sido omitidos nas listagens anteriores, enriquecendo ainda mais a compreensão dos obstáculos reais enfrentados na implementação do SLR de REEE em municípios brasileiros de pequeno porte. A inclusão dessa pergunta aberta demonstra o compromisso em explorar uma gama completa de desafios, valorizando as percepções e experiências dos participantes, e garantindo que os resultados do estudo reflitam uma visão abrangente e representativa das questões enfrentadas nesse contexto.

A aplicação do questionário ocorreu entre os dias 27/04/2023 e 31/05/2023, totalizando 35 dias de duração, com 131 respostas válidas, sendo excluídas as respostas em branco.

### **3.2.3 Etapa 2 – Identificação das causas raízes relacionadas a implementação e operacionalização do SLR de REEE através de Grupo de Foco e elaboração de ARA**

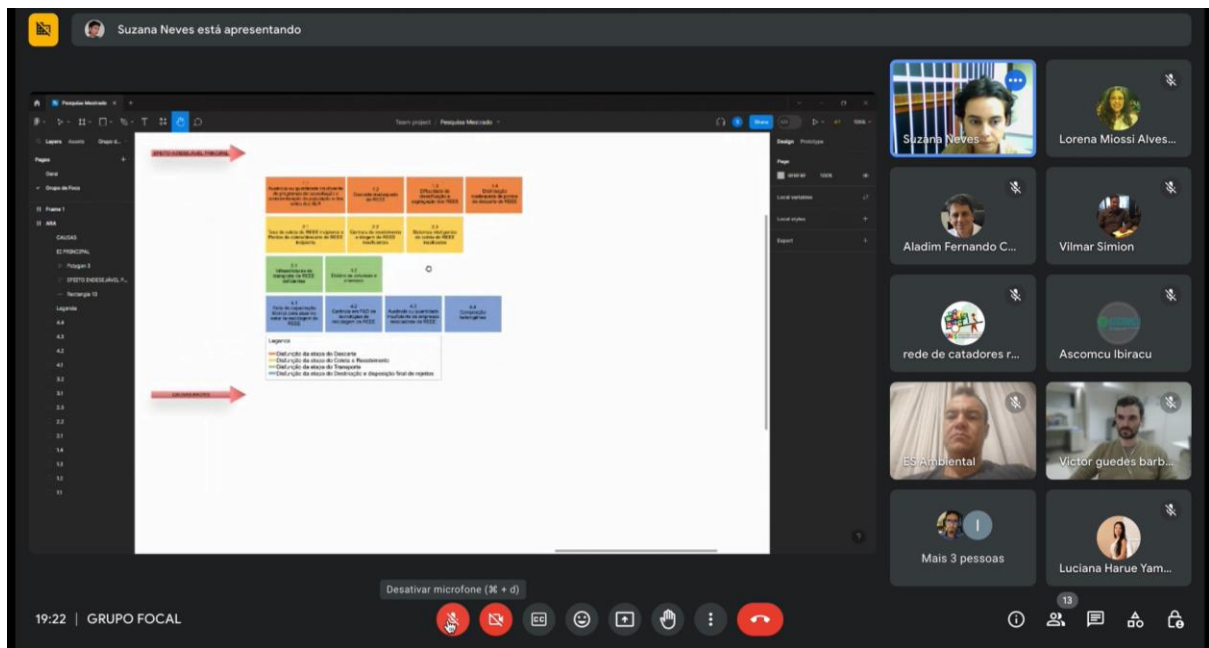
Para ilustração das causas raízes relacionadas a implementação e operacionalização do SLR de REEE em municípios de pequeno porte utilizou-se o Grupo de Foco e a hierarquização dessas relações foram feitas por meio da ferramenta Árvore de Realidade Atual (ARA).

O grupo de foco é um método qualitativo que consiste na reunião de indivíduos envolvidos em um movimento coletivo com o objetivo de realizar discussões sobre elementos de comum interesse, através de experiências e pontos de vista compartilhados entre os participantes. Esta ferramenta é útil para testar a formulação de perguntas, como o *Survey*, e para explorar os resultados de um método que necessita ser validado (Kitzinger, 1994; Sharts-Hopko, 2001).

O Grupo de Foco ocorreu no dia no dia 11/07/2023, às 19h, através da plataforma *Google Meet* (Figura 2). O Grupo de Foco contou com 10 participantes (além da pesquisadora/mediadora) e sua composição foi composta pelos setores Acadêmico, Empresarial, Institucional, Organizações de Catadores de Materiais Recicláveis (OCMR) e Organização Não Governamental (ONG), de forma a prezar pela relevância da experiência e contribuição esperadas deles sobre a reunião. Destaca-

se que a elaboração da lista dos possíveis participantes contou com a contribuição dos pesquisadores do Laboratório de Gestão do Saneamento Ambiental (LAGESA), que ofereceram sugestões relevantes.

Figura 2 - Captura de tela do Grupo de Foco.



Fonte: Autoria própria.

Assim, a reunião com o Grupo de Foco teve duração de 1 hora e foi realizada de forma virtual, visto que oferecem inúmeros benefícios em comparação com as presenciais. Primeiro, economizou-se tempo e dinheiro, eliminando deslocamentos e permitindo a colaboração de participantes de outros estados. Além disso, proporcionou-se maior flexibilidade e conveniência, tornando mais fácil agendar horários convenientes para todos os participantes, além da facilidade de compartilhamento de informações. Por fim, a reunião, por ser virtual, foi gravada, mantendo um histórico das discussões, e foi especialmente útil visto que a pesquisadora era a mediadora do Grupo de Foco, não tendo espaço para anotações ou registros fora a gravação.

O contato com os participantes se deu via celular, através de ligações e/ou pelo WhatsApp, onde explicou-se brevemente sobre a pesquisa e sobre o interesse da participação do mesmo no Grupo de Foco. Assim, criou-se um grupo no WhatsApp com os convidados confirmados com o objetivo de passar informações como data, horário, *link* da videoconferência e explicação prévia da programação da reunião.



Segue-se a programação realizada com o Grupo de Foco:

- (10min) - Apresentação do objetivo geral e objetivos específicos da pesquisa, acompanhada do esclarecimento quanto aos resultados esperados, assim como uma explicação sobre o objetivo da ARA, exemplos e os passos de criação da ARA;
- (5min) - Dinâmica de reconhecimento dos participantes, quando cada convidado se apresentou com nome e função na instituição a qual faz parte;
- (45min) - Construção da ARA através da discussão dos participantes, realizada no *software* Figma, que permite construir um mapa interativo com a participação de todos simultaneamente.

A ARA é uma ferramenta de governança capaz de explicar a realidade de uma organização, identificando entraves não estruturados e o que é preciso alterar para obter soluções (Watson, Blackstone e Gardiner, 2007). Essa ferramenta é projetada para auxiliar a identificação de restrições, chamadas de Efeitos Indesejáveis (EI), ou seja, problemas, bem como a relação existe entre estes efeitos, oferecendo uma representação detalhada da relação entre causa e efeito (Librelato *et al.*, 2014).

Além da ARA, existem outras ferramentas que podem ser utilizadas para identificar causas raízes, tais como Diagrama de Ishikawa, Os 5 Porquês e Análise de Pareto (Doskočil e Lacko, 2019; Kogawa e Nunes Salgado, 2017). Essas ferramentas são amplamente aplicadas em processos de melhoria contínua e resolução de problemas, permitindo uma abordagem sistemática na busca pelas causas fundamentais de um determinado problema ou situação indesejada. O Diagrama de Ishikawa, também conhecido como Diagrama de Espinha de Peixe, auxilia na identificação de diversas categorias de possíveis causas, enquanto os 5 Porquês incentivam a investigação profunda das razões subjacentes por trás de um problema, questionando repetidamente "por que" algo ocorreu. A Análise de Pareto, por sua vez, ajuda a priorizar as causas identificadas, concentrando-se nas que têm o maior impacto (Chokkalingam *et al.*, 2021).

A vantagem da ARA reside em sua capacidade de descrever não apenas as causas imediatas de um problema, mas também as causas subjacentes e suas interconexões. Ela permite a exploração das relações de causa e efeito de forma

hierárquica, demonstrando como fatores mais amplos podem influenciar os elementos mais específicos do sistema.

Neste trabalho, a ARA foi selecionada devido à sua capacidade singular de oferecer uma representação visual abrangente das relações de causa e efeito em sistemas complexos. Enquanto outras ferramentas se destacam em abordagens específicas, como o Diagrama de Ishikawa e os 5 Porquês, a ARA se destaca ao possibilitar uma análise profunda das interconexões entre variáveis, permitindo compreender as causas subjacentes de maneira hierárquica e holística. Sua capacidade de identificar pontos de alavancagem em cenários complexos a torna uma escolha proeminente para análises embasadas em dados e estratégias de resolução de problemas abrangentes.

Dessa forma, o processo de construção do mapa cognitivo da ARA foi realizado em etapas distintas. Primeiramente, os 13 desafios foram minuciosamente listados e inseridos em caixas de texto específicas, cada uma com uma cor correspondente às quatro categorias identificadas. Em seguida, os desafios foram relacionados em termos de suas causas e efeitos, respeitando os fatores de associação entre eles, o que permitiu organizá-los logicamente no formato de uma sequência efeito-causa-efeito.

Ao completar essa fase, os efeitos considerados como raízes do problema foram destacados na base da árvore, representando os pontos de maior risco potencial para o desempenho adequado do sistema, assim como o Efeito Indesejável Principal foi identificado no topo da árvore.

Após todas as contribuições serem devidamente consideradas e incorporadas ao mapa cognitivo, a reunião foi encerrada, concluindo-se o processo de mapeamento e análise dos desafios da ARA.

### **3.2.4 Etapa 3 – Proposição de diretrizes e estratégias para a implementação e operacionalização do SLR de REEE em municípios brasileiros de pequeno porte**

Para proposição de diretrizes e estratégias para a implementação e operacionalização do SLR de REEE em municípios brasileiros de pequeno porte foi realizada uma pesquisa documental de suporte e análise do mapa cognitivo da ARA.

Para a pesquisa documental, o Quadro 2 descreve as bases de dados que foram consultadas e os termos de busca que foram utilizados.

Quadro 2 - Detalhamento da pesquisa documental.

Ferramenta	Base de dados	Termos de busca	Lapso temporal
Pesquisa documental	Planos Municipais de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos (PMGIRS), Planos Estaduais de Resíduos Sólidos, Plano Nacional de Resíduos Sólidos, planos internacionais relacionados aos Resíduos Sólidos, leis, políticas, Termos de Referência, decretos, resoluções e publicações de órgãos governamentais, bancos de dados de prefeituras e institutos de pesquisa, portais de transparência governamental, relatórios anuais, entidades de classe e órgãos da administração pública	“resíduo eletroeletrônico”, “lixo eletrônico”, “resíduo de equipamento eletroeletrônico”, “equipamento eletroeletrônico”, “implementação”, “logística reversa”, “sistema de logística reversa”, “logística reversa de resíduos eletroeletrônicos”, “responsabilidade compartilhada”	1990-2022

Fonte: Autoria própria.

Destacam-se que as diretrizes e estratégias são com enfoque nos desafios e aspirações apontados ao longo de todas as etapas anteriores: revisão sistematizada da literatura, *Survey*, Grupo de Foco e ARA. Dessa forma, constituem-se não como um conjunto geral de diretrizes, mas sim como um conjunto voltado para aqueles desafios identificados, considerando todas as aspirações apontadas.

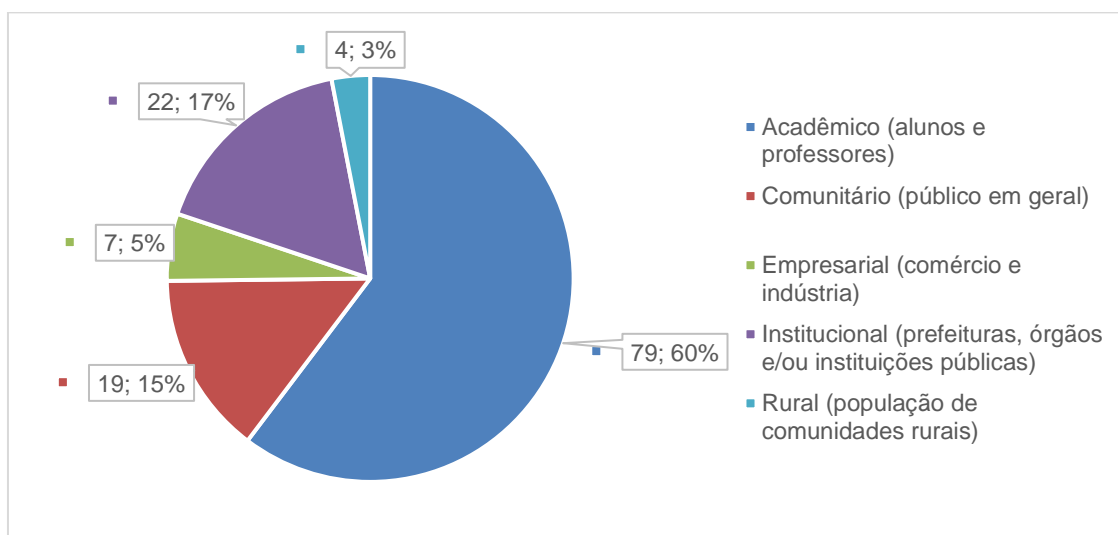
Além disso, ressalta-se que, dado que já existem diretrizes incorporadas em várias esferas, especialmente na esfera federal, esta pesquisa não se trata somente da proposição de novas diretrizes, mas sim do ajuste das já existentes, consolidando-as para aplicação em municípios de pequeno porte.

### 3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.3.1 Etapa 1 – Validação de desafios relacionados a implementação e operacionalização do SLR de REEE

A Figura 3 apresenta a distribuição dos setores representados pelos participantes do questionário. Destaca-se que o rótulo das partições traz o número de participantes e a porcentagem representada por cada um, respectivamente.

Figura 3 - Distribuição dos setores representados pelos participantes do questionário.



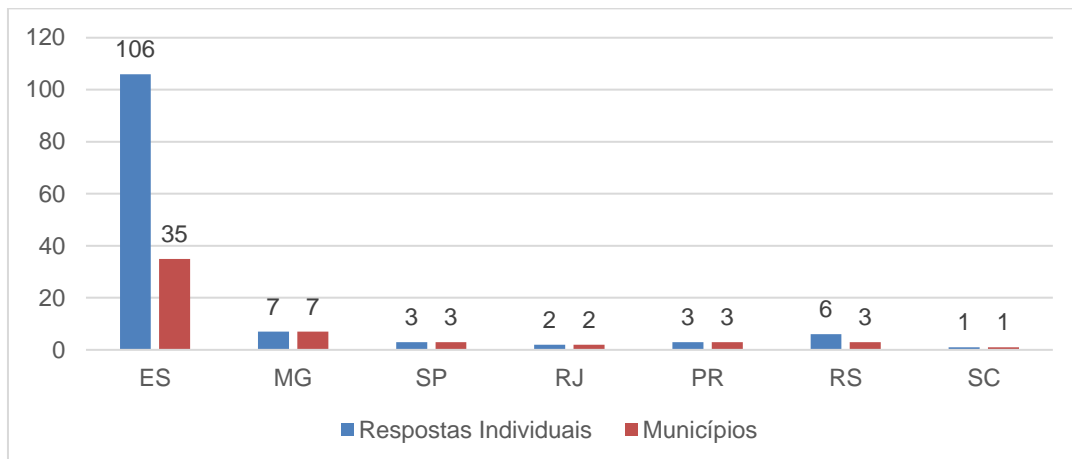
Fonte: Autoria própria.

Nota-se que a Figura 3 evidencia que o setor Acadêmico se posicionou como o participante mais representado, compreendendo um percentual significativo de 60%. Tal predomínio encontra sua explicação no contexto singular desta pesquisa, circunscrita no seio de uma instituição universitária. Nesse ambiente, naturalmente se acentuou a disseminação da investigação, projetando involuntariamente uma luz marcante sobre esse estrato. Cumpre salientar que, nesse contexto, tanto os docentes quanto os discentes emergem como agentes potencialmente contributivos, muitos deles provenientes de campos disciplinares específicos, cujos conhecimentos podem arrojar perspectivas valiosas.

De forma adicional, é fundamental enfatizar que, apesar dessa inclinação proeminente, constataram-se respostas oriundas de todos os espectros setoriais examinados. As categorias Comunitário (15%), Empresarial (5%), Institucional (17%) e Rural (3%) convergiram no mosaico de participação. Ainda que em proporções menores, é crucial internalizar que cada um desses grupos contribuiu para o panorama geral.

Sobre a distribuição geográfica delineada na Figura 4, as respostas agregaram um espectro amplo, alcançando 55 municípios brasileiros distribuídos por 7 estados do território nacional. Esta diversidade geográfica englobou predominantemente as regiões Sul e Sudeste.

Figura 4 - Distribuição dos municípios representados pelos participantes do questionário.



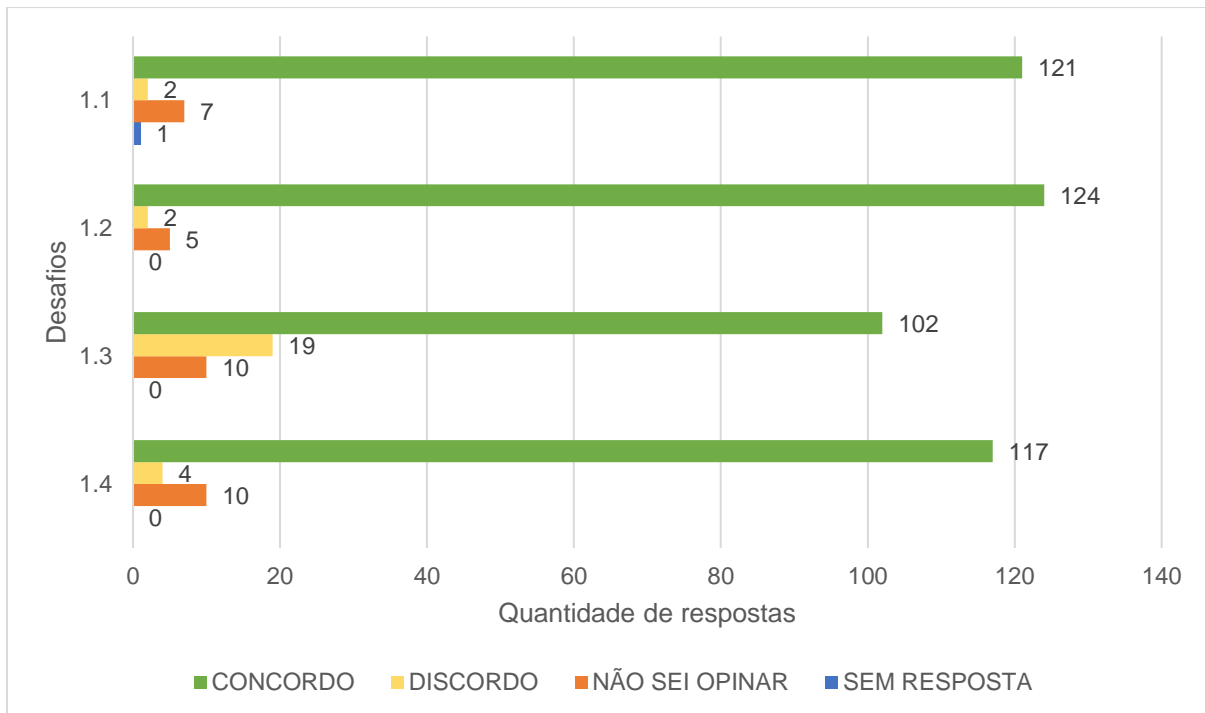
Fonte: Autoria própria.

Destaca-se, com especial relevo, a inclusão de 26 municípios brasileiros classificados nessa pesquisa como de pequeno porte dentre essa amostragem. A representação dessas localidades à pesquisa atesta a validação e a aplicabilidade das diretrizes e estratégias propostas, direcionando-se de maneira específica às realidades e desafios inerentes a municípios dessa natureza.

Observa-se ainda que na Figura 4, a concentração expressiva de respostas do Espírito Santo, em virtude de este ser o Estado de origem do grupo de pesquisa proponente, objeto de intensa divulgação.

Adentrando na parte técnica, as Figura 5, Figura 6, Figura 7 e Figura 8 apresentam a quantidade e distribuição das respostas para cada pergunta/desafio (1.1, 1.2 etc.) por etapa operacional, onde as opções de resposta eram “Concordo”, “Discordo”, “Não sei opinar” ou deixar em branco que é o caso do “Sem Resposta”, já que as perguntas não eram obrigatórias.

Figura 5 - Número e distribuição de respostas do questionário para os desafios da etapa de descarte do SLR de REEE.



Fonte: Autoria própria.

Legenda: 1.1 Ausência ou quantidade insuficiente de programas de capacitação e conscientização da população e dos entes dos SLR; 1.2 Descarte inadequado de REEE; 1.3 Dificuldade de classificação e segregação dos REEE; 1.4 Distribuição inadequada de pontos de descarte de REEE.

Os resultados na Figura 5 indicam um elevado grau de concordância entre os desafios 1.1 *Ausência ou quantidade insuficiente de programas de capacitação e conscientização da população e dos entes dos SLR*, 1.2 *Descarte inadequado de REEE* e 1.4 *Distribuição inadequada de pontos de descarte de REEE*, somando expressivos 92,1% das respostas. Isso contrasta com uma taxa de discordância relativamente baixa, representando apenas 2% das opiniões, enquanto 5,6% dos participantes afirmaram não ter uma opinião formada sobre o assunto. Esta tendência, em grande parte, atesta a validade e a pertinência dos desafios elencados, sobretudo à luz das experiências e perspectivas dos participantes.

A carência de conscientização é um problema que transcende fronteiras. (Dagiliūtė et al., 2019) evidenciaram que indivíduos com menor familiaridade em relação aos locais de coleta tendem a realizar o descarte incorreto de alguns REEE com maior frequência, seja incluindo-os no resíduo doméstico ou armazenando-os em suas residências. Além disso, os autores observaram que fatores como idade, nível

educacional e renda estão correlacionados a esses comportamentos de descarte inadequado. Além dos consumidores, também é possível identificar uma falta de consciência e informação entre outros participantes da cadeia de logística reversa, sobretudo entre os pequenos comerciantes locais que não fazem parte de redes comerciais com estratégias de marketing verticalizadas (Dagiliūtė et al., 2019), uma situação comum em municípios de pequeno porte.

Em áreas rurais, por exemplo, a disseminação de campanhas de conscientização ambiental pode ser extremamente desafiadora devido à dispersão geográfica da população (Bucur, 2020). Além disso, o acesso limitado à internet e a infraestrutura precária de comunicação podem dificultar a divulgação de informações sobre o SLR de REEE (Zhang *et al.*, 2023). Isso destaca a importância de estratégias de conscientização adaptadas a contextos rurais, como a realização de palestras em comunidades locais, parcerias com associações rurais e o uso de veículos itinerantes de informação.

O orçamento restrito das prefeituras em municípios de pequeno porte também é um desafio significativo. A alocação de recursos para programas de educação ambiental e infraestrutura de coleta de REEE pode ser limitada, o que exige soluções criativas, como parcerias com empresas privadas, captação de recursos externos e a busca por financiamentos específicos para projetos de SLR.

Outro ponto importante é a falta de professores capacitados para abordar questões relacionadas ao meio ambiente nas escolas. A capacitação de educadores e a inclusão de temas ambientais no currículo escolar podem desempenhar um papel fundamental na conscientização das gerações futuras sobre a importância da gestão adequada de resíduos (Calıs e Ergul, 2015).

A localização inadequada de pontos de descarte pode dificultar o acesso da população a esses locais, tornando a coleta seletiva de REEE ineficaz. Quando os pontos de descarte não estão convenientemente localizados, os consumidores podem optar por descartar seus REEE de maneira irregular, contribuindo para a poluição ambiental e a degradação da paisagem.

Além disso, essa situação pode levar a uma baixa participação da população no SLR de REEE, especialmente em áreas rurais onde as distâncias até os pontos de descarte podem ser maiores (Sari, Masrurroh e Asih, 2021). Como resultado, os

objetivos de reciclagem e gestão adequada de REEE podem não ser alcançados. Quando os consumidores não têm acesso fácil a esses locais, podem não compreender plenamente a relevância do processo de logística reversa e a necessidade de participar ativamente.

Outrossim, a localização inadequada dos pontos de descarte exerce um impacto negativo no comportamento de descarte por parte dos consumidores. O varejo assume uma função de destaque na logística reversa de REEE, visto que representa a etapa mais próxima do consumidor. Pequenos comerciantes locais, muitas vezes, não estão cientes das diretrizes e regulamentações relacionadas aos REEE. Para assegurar uma abrangência geográfica abrangente, torna-se essencial não apenas dispor de uma quantidade suficiente de pontos de descarte, mas também posicioná-los estrategicamente, oferecendo treinamentos e informações específicas para esses atores da cadeia de logística reversa, incentivando sua participação ativa no sistema. (Sari, Masruroh e Asih, 2021).

A localização inadequada dos pontos de descarte também implica em custos operacionais elevados para a coleta de REEE (Sari, Masruroh e Asih, 2021). As autoridades locais precisam alocar recursos suficientes para coletar REEE em locais distantes, incluindo gastos com combustível, mão de obra e manutenção de veículos de coleta. Isso pode sobrecarregar as finanças municipais e limitar a capacidade de expansão do SLR.

É pertinente destacar, entretanto, um elemento de notável divergência: o desafio *1.3 Dificuldade de classificação e segregação dos REEE*. Nesse cenário, 14,5% dos participantes manifestaram discordância, embora ainda tenhamos registrado uma significativa concordância de 77,9% em relação a esse desafio. Tal disparidade pode ser interpretada considerando-se a contextualização das peculiaridades do cenário nacional.

Esse desafio não necessariamente se acentua em pequenos municípios em comparação com municípios maiores. Pelo contrário, o conhecimento geral de que um item é eletrônico tende a ser uma informação amplamente disseminada e não tão influenciada pelo porte do município. Essa é uma percepção compartilhada por muitos, destacando que a identificação de um REEE como tal é, em grande parte, uma questão de conhecimento geral e menos dependente do tamanho da localidade.



No entanto, a discordância mencionada em relação a esse desafio pode estar mais relacionada à acessibilidade à informação. Em pequenos municípios, onde os recursos podem ser mais limitados e as campanhas de conscientização podem ser menos frequentes, as pessoas podem ter menos acesso a informações específicas sobre como descartar e lidar com diferentes tipos de REEE.

Portanto, a discordância observada pode não ser uma consequência direta do tamanho do município, mas sim da disponibilidade de informações claras e orientações sobre a gestão adequada de REEE.

Uma distinção que merece destaque é a presença das organizações de catadores de materiais recicláveis (OCMR) no Brasil. Essas organizações desempenham um papel significativo na gestão de resíduos coletando, triando e comercializando materiais recicláveis, além de contribuir para a prática da logística reversa e a promoção da economia circular (GUARNIERI, CERQUEIRA-STREIT e BATISTA, 2020). Essa realidade no contexto brasileiro pode ter contribuído para alguma discordância entre os participantes, pois essas associações se inserem informalmente no gerenciamento de REEE, com exceção das poucas que integram formalmente o SLR.

Por um lado, as associações de catadores são fundamentais para a destinação final de REEE, mas por outro lado, a falta de padronização e regulamentação (Yamane, Siman e Dutra, 2023) nas operações dessas associações pode criar desafios na identificação correta dos componentes dos REEE e na triagem adequada para o tratamento subsequente. Isso pode levar a uma classificação inadequada dos REEE, comprometendo a eficiência do processo de reciclagem.

A presença e a atuação das OCMR em municípios de pequeno porte podem ser influenciadas por fatores como a região geográfica, a legislação local e a conscientização da comunidade em relação à reciclagem (Nogueira Zon et al., 2020). Não há um panorama único que se aplique a todos os municípios, e a realidade pode variar amplamente de uma localidade para outra.

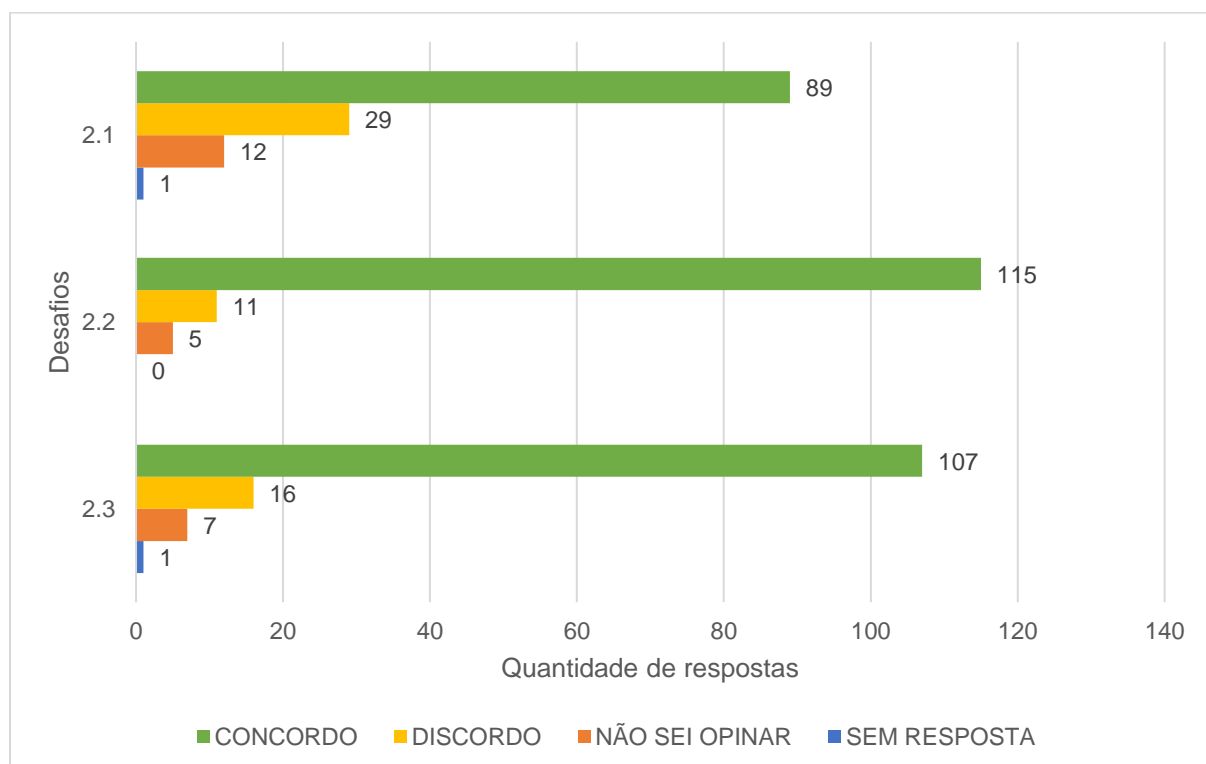
Em algumas regiões, as OCMR podem estar mais bem estabelecidas e ativas, desempenhando um papel fundamental na coleta seletiva e na gestão de resíduos. Isso pode ser impulsionado pela existência de políticas de apoio à reciclagem, parcerias com governos locais e uma comunidade engajada.

Por outro lado, em áreas onde as políticas e os programas de reciclagem são menos desenvolvidos ou onde a conscientização sobre a importância da reciclagem é menor, a presença das OCMR pode ser limitada (Ibelli-Bianco *et al.*, 2022). A falta de recursos e de apoio governamental pode tornar desafiador o trabalho dessas organizações em municípios de pequeno porte.

Portanto, ao abordar o desafio da dificuldade de classificação e segregação dos REEE no Brasil, é imperativo levar em consideração as nuances e complexidades que surgem da presença das associações de catadores.

Já na Figura 6, é possível observar que os desafios 2.2 *Centrais de recebimento e triagem de REEE insuficientes* e 2.3 *Sistemas inteligentes de coleta de REEE inaplicados* apresentaram uma concordância significativa de 81,9% entre os participantes, enquanto a discordância se manteve em 12,5%.

Figura 6 - Número e distribuição de respostas do questionário para os desafios da coleta e recebimento do SLR de REEE.



Fonte: Autoria própria.

Legenda: 2.1 Taxa de coleta de REEE incipiente e Pontos de coleta/descarte de REEE incipiente; 2.2 Centrais de recebimento e triagem de REEE insuficientes; 2.3 Sistemas inteligentes de coleta de REEE inaplicados.

As deficiências presentes nas centrais de recebimento e triagem de REEE, juntamente com a inviabilidade da aplicação de sistemas inteligentes de coleta são desafios inegáveis que caracterizam o contexto brasileiro e requerem uma abordagem vigorosa. Conforme Gunarathne, Alwis e Alahakoon (2020) e Okwu et al. (2022) argumentam, a carência de centrais de recebimento e triagem de REEE bem estabelecidas resulta em problemas como a contaminação dos REEE por outros tipos de resíduos, criando uma complicação não apenas na fase de coleta, mas também no subsequente tratamento desses resíduos.

Adicionalmente, de acordo com as observações de Kazancoglu et al. (2020), existe uma notável lacuna, sobretudo no processo de coleta de REEE, no que diz respeito à adoção de tecnologias de rastreamento e uso de sistemas inteligentes. Esses autores ressaltam que a digitalização deve ser concebida como uma ferramenta que pode oferecer apoio e concretiza benefícios sociais, econômicos e ambientais, tais como a redução da poluição atmosférica, a melhoria das condições de trabalho, a minimização do desperdício e a incorporação de novas tecnologias nos SLR de REEE.

É importante ressaltar que essas deficiências podem ter um impacto mais significativo em municípios de pequeno porte. Isso ocorre porque essas áreas podem ter menos recursos financeiros e infraestrutura limitada para investir em instalações de triagem e tecnologias avançadas de coleta e disseminação de informação.

Nesse contexto, a ausência de centrais de recebimento e triagem de REEE bem estabelecidas pode levar a problemas como a contaminação dos REEE por outros tipos de resíduos (Gunarathne, Alwis, de e Alahakoon, 2020), tornando o processo de gestão dos REEE mais complexo e dispendioso. A falta de recursos para aprimorar essas instalações e implementar tecnologias de triagem eficientes pode agravar ainda mais esse desafio.

Da mesma forma, a dificuldade de aplicação de sistemas inteligentes de coleta de REEE pode ser mais pronunciada em municípios de pequeno porte, onde a infraestrutura de comunicação e a capacidade tecnológica podem ser limitadas.

A busca de soluções adaptadas às condições específicas dessas comunidades pode envolver parcerias com organizações externas, busca de financiamentos específicos para projetos de gestão de REEE e programas de conscientização direcionados para

educar a população sobre a importância da gestão adequada dos resíduos eletrônicos.

Entretanto, o desafio *2.1 Taxa de coleta de REEE incipiente e Pontos de coleta/descarte de REEE incipiente* como obstáculo para a etapa de coleta e segregação se destaca por apresentar uma discordância mais substancial, totalizando 22,1%, acompanhada por uma concordância de 67,9% e um maior nível de respostas "*não sei opinar*" (9,2%). Essa variedade de respostas sugere uma considerável complexidade subjacente. A discordância expressa nesse ponto pode ser associada à discrepância entre a abordagem internacional e a aplicação no Brasil, em especial em municípios de pequeno porte. A literatura internacional pode delinear um quadro mais idealizado e harmonioso com relação ao aspecto "cobrança" pelo manejo de resíduos, enquanto a realidade brasileira é atravessada por particularidades que podem inviabilizar ou dificultar a implementação eficaz das propostas apresentadas.

Do ponto de vista econômico, a baixa taxa de coleta e descarte de REEE em municípios de pequeno porte representa um obstáculo para a operacionalização de um SLR devido à falta de escala. Possivelmente, a entidade responsável por esses locais precisará estabelecer uma rede de logística reversa que abranja localidades vizinhas, a fim de adquirir uma quantidade mínima de REEE para tornar o processo economicamente viável. No Brasil, por exemplo, existem os consórcios públicos intermunicipais de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU), que exigem investimentos significativos e o apoio do governo federal e Estadual para sua formação e consolidação.

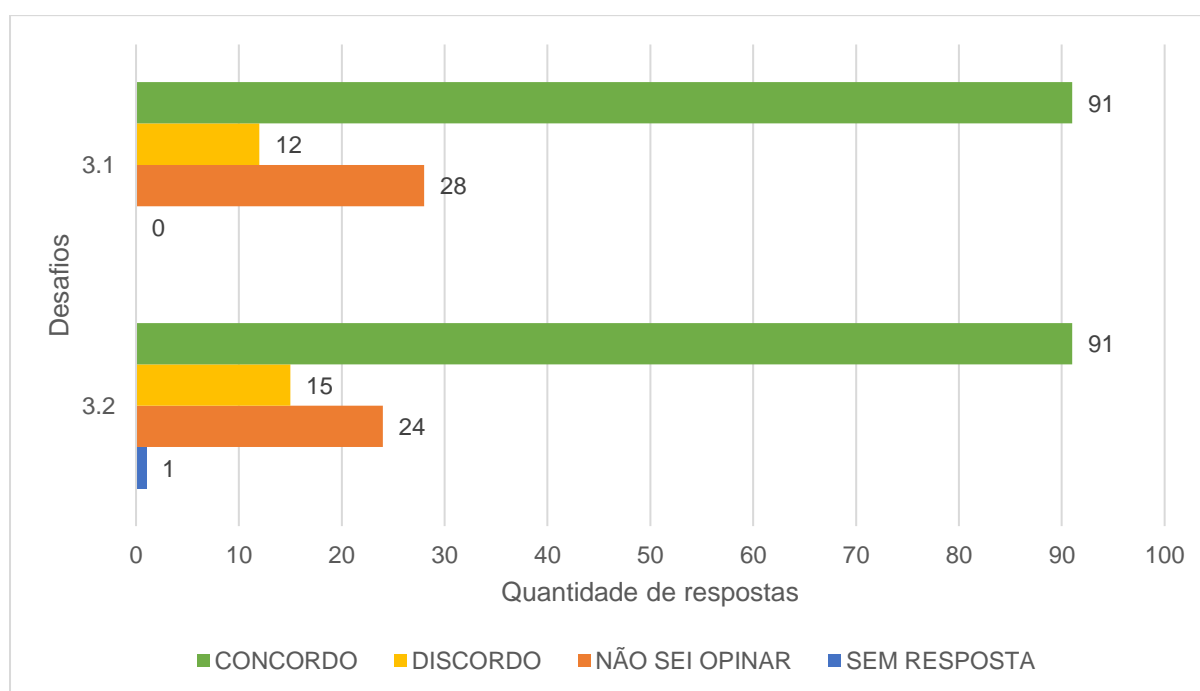
Conforme apontado por Ventura, Beatriz e Suquizaqui (2019), os municípios de pequeno porte são os que mais necessitam de atenção devido ao aumento do déficit na prestação de serviços de coleta. Os autores concluem que esses municípios geralmente carecem de recursos financeiros e de pessoal técnico qualificado para gerenciar adequadamente os resíduos sólidos urbanos.

Portanto, a diferença na Taxa de coleta de REEE e na disponibilidade de pontos de coleta/descarte de REEE reflete a complexidade da implementação da logística reversa no Brasil, que é agravada por desafios econômicos e estruturais, especialmente em áreas de menor escala, bem como informação e recursos

limitados. Isso destaca a necessidade de abordagens adaptadas às realidades locais, considerando as particularidades do país para promover uma gestão eficaz dos REEE e atender às demandas específicas das comunidades em todo o território nacional.

O nível maior de discordância pode ser atribuído também pelo entendimento errado do significado do termo “taxa de coleta/descarte”. Portanto, é fundamental esclarecer que, neste contexto, a taxa de coleta refere-se à proporção de REEE coletados em relação à quantidade total gerada, e não a uma taxa monetária. Essa distinção conceitual pode ter contribuído para a discordância registrada, destacando a importância da educação e da conscientização para um debate mais informado e eficaz sobre a gestão de REEE no Brasil.

Figura 7 - Número e distribuição de respostas do questionário para os desafios da etapa de transporte do SLR de REEE.



Fonte: Autoria própria.

Legenda: 3.1 Infraestruturas de transporte de REEE deficientes; 3.2 Distâncias extensas e onerosas.

Na etapa de Transporte (Figura 7), com os desafios 3.1 *Infraestruturas de transporte de REEE deficientes* e 3.2 *Distâncias extensas e onerosas*, nota-se que 19,9% dos participantes se abstiveram de expressar uma opinião, enquanto 10,3% manifestaram discordância e 69,5% concordaram. Acentua-se, na análise deste cenário, a notável proporção de respondentes que optaram por não emitir uma opinião concreta sobre o desafio em questão. Esta proporção significativa de respondentes que optaram por

não emitir uma opinião concreta sobre o desafio em questão sugere uma possível lacuna na compreensão do contexto.

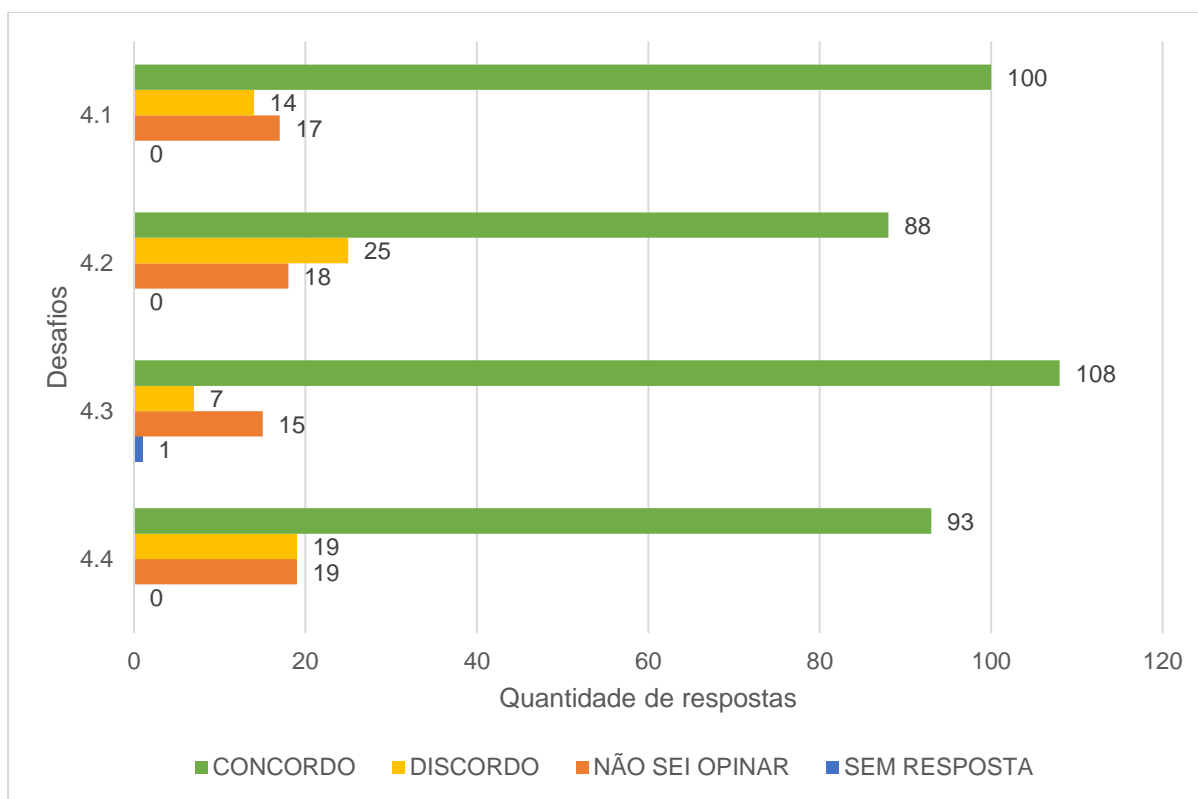
Uma pista elucidativa desse fato pode ser encontrada nas observações de Hansen et al. (2022), que destacam a falta de infraestruturas de transporte e reciclagem de resíduos como um potencial desafio para a inclusão da gestão de REEE nas decisões de investimento. Essa infraestrutura é insuficiente em muitos países em desenvolvimento, especialmente em áreas rurais, quando a economia proporcionada pelo ganho de escala se mostra mais presente. No entanto, essas observações não especificam o tipo de infraestrutura em questão, o que pode ter contribuído para a falta de clareza nas respostas dos participantes.

A relativa escassez de estudos dedicados aos desafios relacionados ao transporte pode gerar um efeito dominó, influenciando a capacidade dos participantes de se posicionar de maneira informada sobre essa dimensão específica. Quando a literatura existente não oferece um alicerce sólido, é compreensível que parte dos participantes se sintam insegura ao emitir juízos. Esse cenário realça a importância de promover uma abordagem mais profunda e ampla na investigação dos desafios logísticos ligados ao transporte, para que haja mais informações acessíveis e, conseqüentemente, opiniões mais informadas.

Em suma, a Figura 7 ilustra um panorama de desinformação e discordância mais notáveis na esfera do transporte, sugerindo o efeito da necessidade de ganho de escala como grande desafio para a logística reversa de REEE. É essencial que estudos mais aprofundados sejam realizados para explorar esta intrincada questão do transporte.

Nota-se que, na Figura 8, é perceptível que os desafios *4.1 Falta de capacitação técnica para atuar no setor de reciclagem de REEE* e *4.3 Ausência ou quantidade insuficiente de empresas recicladoras* receberam um índice de concordância de 79,4%, ao passo que 8,0% expressaram discordância e 12,2% optaram por não emitir uma opinião definitiva. Esses números denotam uma tendência de aceitação substancial desses dois desafios.

Figura 8 - Número e distribuição de respostas do questionário para os desafios da etapa de destinação de resíduos do SLR de REEE.



Fonte: Autoria própria.

Legenda: 4.1 Falta de capacitação técnica para atuar no setor de reciclagem de REEE; 4.2 Carência em P&D de tecnologias de reciclagem de REEE; 4.3 Ausência ou quantidade insuficiente de empresas recicladoras de REEE; 4.4 Composição heterogênea dificulta o tratamento.

Contudo, os desafios *4.2 Carência em P&D de tecnologias de reciclagem de REEE* e *4.4 Composição heterogênea dificulta o tratamento* apresentaram um índice de concordância de 69,1%, com 16,8% de discordância e 14,1% de respostas "não sei opinar". Este cenário denota uma disposição mais complexa de opiniões em relação a esses desafios.

A elevada taxa de concordância nos desafios 4.1 e 4.3 pode ser interpretada à luz da realidade nacional. A falta de capacitação técnica para atuar no setor de reciclagem de REEE e a insuficiência de empresas recicladoras são desafios que há muito tempo persistem no cenário brasileiro, tendo sido frequentemente ressaltados como obstáculos para o avanço da logística reversa, mesmo em municípios de grande porte. Isso pode explicar a resposta positiva e concordante dos participantes, que reconhecem a pertinência e a relevância dessas questões.

Araujo et al. (2017) trazem a aplicação do seu estudo numa ilha no Brasil e, devido à falta de profissionais para reparar dispositivos eletrônicos, novos equipamentos substituem rapidamente os equipamentos danificados, aumentando assim os problemas de gestão de REEE no local. Os REEE podem ficar acumulados na ilha por cerca de 3 meses antes de serem encaminhados para sua destinação final, que são unidades municipais de triagem e reciclagem em Pernambuco, Brasil

Além disso, Neto, Silva e Santos (2019) afirmaram que um dos principais desafios à logística reversa é que o Brasil carece de instalações adequadas para extrair metais preciosos, o que representa a fase de tratamento final do REEE. Afonso (2018) destaca que a gestão dos REEE no Brasil está ainda na sua infância, não há infraestrutura montada que atenda às diferenças regionais e à extensão territorial.

Em relação aos desafios 4.2 e 4.4, a divergência e as respostas "*não sei opinar*" podem estar relacionadas com a complexidade e a especificidade técnica desses temas. A carência em pesquisa e desenvolvimento de tecnologias de reciclagem de REEE e a dificuldade associada à composição heterogênea desses resíduos são áreas que demandam conhecimentos técnicos especializados, e dificilmente explorados em municípios de pequeno porte, pois em geral concentram-se em centros urbanos e regiões mais industrializadas. A falta de recursos, laboratórios especializados e profissionais altamente qualificados nessas áreas pode limitar a capacidade dos pequenos municípios de realizar pesquisas e desenvolver tecnologias específicas para o tratamento eficiente de REEE. Municípios de pequeno porte podem enfrentar desafios adicionais para se manterem atualizados com as mais recentes tecnologias de reciclagem e encontrar maneiras eficazes de lidar com a crescente variedade de REEE.

A discordância pode refletir as incertezas em relação à viabilidade técnica e econômica dessas soluções, enquanto as respostas "*não sei opinar*" podem ser atribuídas à falta de compreensão aprofundada desses desafios por parte de alguns participantes.

Santos e Ogunseitán (2022) destacam que a variabilidade dos REEE exige o uso de tecnologias avançadas para a recuperação de materiais críticos e elementos de terras raras. No Brasil, devido à falta de tecnologias e investimentos, o processo atualmente empregado se limita ao desmantelamento. Os processos de reciclagem capazes de



recuperar metais críticos e elementos de terras raras, que têm demanda global crescente, deveriam ser avaliados como oportunidades econômicas (Santos e Ogunseitan, 2022).

Adicionalmente, muitos países desenvolvidos enfrentam o desafio da separação de REEE devido à sua composição complexa, uma questão ainda mais complexa em países subdesenvolvidos (Rajesh, Kanakadhurga e Prabakaran, 2022). Em geral, o processo mecânico é empregado como pré-tratamento e envolve a separação mecânica de materiais, incluindo técnicas como moagem, separação eletrostática e magnética, classificação granulométrica, entre outras.

No Brasil, por exemplo, o pré-tratamento mecânico é o estágio mais avançado de tratamento, em grande parte devido à facilidade técnica e aos menores custos envolvidos. No entanto, a falta de capacitação técnica para operar no setor de reciclagem de REEE, como mencionado anteriormente, pode tornar esse processo complexo.

Em resumo, a complexidade técnica e a falta de capacitação especializada podem explicar as divergências e respostas indecisas em relação aos desafios 4.2 e 4.4. É fundamental reconhecer a necessidade de investimento em pesquisa e desenvolvimento tecnológico, bem como em treinamento e capacitação, para abordar eficazmente esses desafios complexos e promover uma gestão sustentável de REEE no Brasil.

Em relação as respostas obtidas nas questões abertas, estas proporcionaram *insights* valiosos e uma compreensão mais ampla dos desafios e preocupações dos participantes em relação à logística reversa de REEE. Muitas das contribuições reforçaram ou ampliaram os temas já abordados nos desafios descritos no questionário, realçando a sua relevância e a sua ressonância com a percepção dos entrevistados.

Uma das principais áreas de destaque foi a necessidade de apoio abrangente a todos os atores da cadeia de logística reversa, desde produtores até consumidores e recicladores. Além disso, houve um forte reconhecimento da importância da conscientização da população e da participação ativa na separação e entrega de materiais, bem como da disponibilidade de Pontos de Entrega Voluntária (PEVs), especialmente em municípios de pequeno porte.

A sugestão de estabelecer locais de descarte em lojas que comercializam dispositivos eletrônicos, tornando o descarte mais acessível, e a proposta de introduzir uma taxa de coleta na compra de dispositivos eletrônicos, como visto na Europa, demonstram o desejo de inovações práticas e financeiramente sustentáveis.

Por outro lado, questões como a falta de políticas públicas eficazes para o descarte, a necessidade de planejamento estratégico e a criação de parcerias com entidades para receber REEE destacam o papel crítico do governo e das parcerias público-privadas na criação de um ambiente regulatório favorável e na promoção de práticas sustentáveis.

No geral, as respostas nas questões abertas refletem a complexidade intrínseca da logística reversa de REEE no Brasil e sublinham a necessidade de uma abordagem multifacetada que considere não apenas os desafios técnicos, mas também as dimensões sociais, regulatórias e colaborativas para a criação de um sistema abrangente e eficaz de gerenciamento de REEE.

Por fim, um resumo geral das etapas mostra que, na etapa de Descarte, destaca-se uma significativa porcentagem de 88,55% em concordância com as propostas, demonstrando uma adesão notável. Por outro lado, 5,15% discordaram das colocações, enquanto 6,11% não souberam opinar e uma pequena parcela de 0,19% não ofereceu resposta. A etapa de Coleta e Recebimento apresentou uma concordância de 76,34%, sugerindo um apoio sólido às abordagens propostas. No entanto, a presença de 16,41% de discordância e 6,87% de incerteza evidencia nuances de opiniões e conhecimento entre os participantes.

Na etapa de Transporte, uma concordância de 69,47% foi identificada, com 10,31% discordando e 19,85% revelando não saber opinar. Este resultado ressalta a complexidade e a heterogeneidade das perspectivas no que diz respeito ao transporte na logística reversa de REEE. Por fim, na etapa de destinação de resíduos, a porcentagem de concordância foi de 74,24%, com 12,40% de discordância e 13,17% de indecisão, indicando uma divergência mais notável nesse contexto.

É notável que, apesar de algumas divergências, todos os desafios podem ser considerados validados para a próxima etapa, um sinal claro da sua relevância e pertinência. Embora a discordância tenha atingido seu ponto máximo em 22,1%, é importante ressaltar que a maioria dos entrevistados concordou com todos os

desafios. A média geral de discordância, que foi de 10,1% para os 13 desafios, sugere que, em média, os participantes encontraram uma base sólida para concordar com as propostas. A concordância geral alcançou 77,6%, refletindo um apoio abrangente aos desafios identificados.

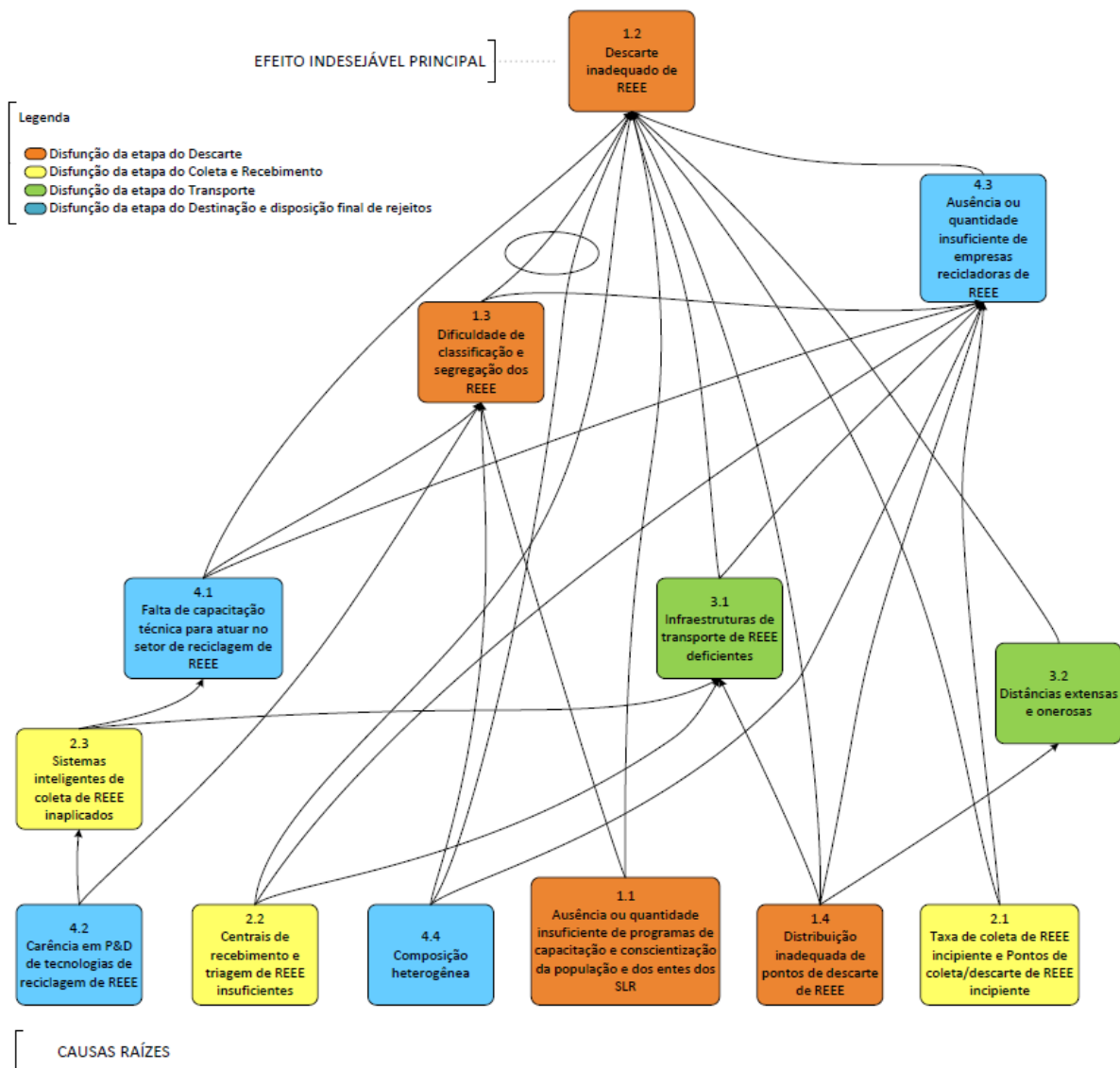
Portanto, a Etapa 1 desempenhou um papel crucial em validar os desafios identificados, demonstrando sua utilidade e aplicabilidade para a próxima fase da pesquisa, que se concentrou na organização desses desafios em municípios de pequeno porte.

A validação unânime reflete a semelhança notável da realidade brasileira nesse contexto, transcendendo as barreiras geográficas e destacando a relevância dos desafios em questão. Essa unanimidade de validação fortalece a base para a abordagem dos desafios identificados e o desenvolvimento de estratégias eficazes para a gestão de REEE no Brasil.

### **3.3.2 Etapa 2 – Identificação das causas raízes relacionadas a implementação e operacionalização do SLR de REEE através de Grupo de Foco e ARA**

A Figura 9 apresenta a ARA desenvolvida em colaboração com o Grupo de Foco, composta graficamente pelas 13 disfunções operacionais validadas na etapa anterior, as quais estão interligadas por flechas numa estrutura a ser lida de baixo para cima, evidenciando o efeito indesejado principal identificado: o desafio *2.1 de Descarte inadequado de REEE*.

Figura 9 - Árvore de Realidade Atual (ARA) desenvolvida em colaboração com o Grupo de Foco.



Fonte: Autoria própria.

Conforme observado na Figura 9, o efeito indesejável principal identificado foi o desafio 2.1 *Descarte inadequado de REEE* E está diretamente relacionado a outros 10 de 12 desafios restantes. A interconexão do efeito indesejável principal com tantos outros desafios destaca como a solução desse problema central pode ter um efeito cascata na resolução de muitos outros problemas relacionados.

Primeiramente, a relação com o desafio 1.1 mostra que a ausência de programas de capacitação e conscientização contribui diretamente para o problema do descarte inadequado. Quando não há programas educacionais adequados para informar a população e os entes envolvidos no SLR sobre os riscos e consequências do descarte

inadequado de REEE ocorre conseqüentemente a disposição inadequada de REEE, seja por ignorância ou falta de incentivos para o descarte correto.

Além disso, a carência de programas de conscientização contínuos pode resultar na falta de estímulo para a separação e coleta apropriada dos REEE, conectando-se diretamente ao desafio *1.3 Dificuldade na classificação e segregação de REEE*. A complexidade em distinguir e separar os diversos componentes eletrônicos dos REEE pode resultar em uma mistura inadequada de materiais, tornando o tratamento ainda mais desafiador. Esse cenário, por sua vez, pode desencorajar as pessoas a adotarem práticas de descarte adequado, agravando o problema do descarte inadequado de REEE.

Destaca-se a relação do efeito indesejável principal com o desafio 1.4 com o fato de que, quando há uma distribuição inadequada de pontos de descarte para REEE, torna-se mais difícil para a população acessar locais apropriados para descartar seus equipamentos eletrônicos usados, o que se agrava em municípios de pequeno porte com predomínio de áreas rurais em relação a urbanas. Essa falta de pontos de descarte convenientes pode levar as pessoas a realizarem o descarte em locais impróprios, como lixeiras comuns ou até mesmo em espaços públicos também aumentam o risco de contaminação ambiental decorrente do descarte inadequado de REEE, uma vez que os materiais eletrônicos contêm substâncias nocivas ao meio ambiente e à saúde humana.

A distribuição inadequada de pontos de descarte também dificulta a coleta eficaz desses resíduos, uma vez que as autoridades responsáveis pela gestão de resíduos têm dificuldade em monitorar e manter pontos de descarte suficientes e convenientes para a população.

A relação do efeito indesejável principal com o desafio 2.1 traz que, quando a taxa de coleta de REEE é incipiente, ou seja, quando apenas uma quantidade limitada desses resíduos é coletada de forma adequada, resulta em uma disponibilidade insuficiente de materiais para reciclagem ou tratamento apropriado, seja pela falta de volume consolidado para a venda quanto pela falta de estímulo para instalação de unidades de triagem e recebimento descentralizadas. Como resultado, muitos optam por descartar esses itens de maneira inadequada, contribuindo para o problema do descarte inadequado de REEE.

Por outro lado, o descarte inadequado de REEE agrava a falta de materiais disponíveis para reciclagem ou reutilização, perpetuando o ciclo de coleta incipiente. Isso ocorre porque os materiais eletrônicos contêm recursos valiosos que podem ser recuperados por meio da reciclagem, reduzindo a necessidade de mineração primária para a produção de novos dispositivos eletrônicos.

Em relação ao desafio 2.2, a insuficiência de centrais de recebimento e triagem pode dificultar o acesso das pessoas a locais apropriados para descartar seus equipamentos eletrônicos usados, a consolidação de volumes e a integração de organizações de catadores ao SLR, contribuindo para o problema do descarte inadequado de REEE. Além disso, a falta de infraestrutura adequada para receber e processar os REEE dificulta a recuperação eficiente de materiais valiosos, aumentando a pressão sobre os ecossistemas naturais devido à mineração.

Por fim, a infraestrutura de transporte inadequada para REEE dificulta a coleta inteligente desses resíduos, especialmente em áreas onde não existem sistemas de transporte dedicados para essa finalidade. A falta de veículos adequados e de uma rede de logística eficiente pode resultar em atrasos na coleta, armazenamento inadequado e, em última instância, no descarte impróprio dos REEE.

Ademais, quando as distâncias entre os locais de coleta e os pontos de processamento são extensas e onerosas, isso aumenta os custos associados ao transporte e logística de REEE. Esses custos adicionais podem desencorajar a adoção de práticas responsáveis de gestão de REEE, levando a alternativas mais baratas, como o descarte inadequado.

Como efeitos indesejáveis intermediários tem-se: *1.3 Dificuldade de classificação e segregação dos REEE, 2.3 Sistemas inteligentes de coleta de REEE inaplicados, 3.1 Infraestruturas de transporte de REEE deficientes, 3.2 Distâncias extensas e onerosas, 4.1 Falta de capacitação técnica para atuar no setor de reciclagem de REEE e 4.3 Ausência ou quantidade insuficiente de empresas recicladoras de REEE.* Destaca-se que todas as etapas do SLR estão representadas nestes efeitos.

Ao final, identificou-se que o efeito indesejável principal, *Descarte inadequado de REEE* possui 6 causas raízes. Essas disfunções são raízes primárias que causam efeitos sobre os desafios validados durante o desenvolvimento do trabalho e apresentados na ARA, sendo distribuídas entre as Etapas I, II e IV do SLR de REEE.

O desafio *Ausência ou quantidade insuficiente de programas de capacitação e conscientização da população e dos entes dos SLR* é causa raiz pois a ausência de conscientização da população sobre a importância da separação e coleta adequada dos REEE pode levar a um comportamento inadequado de descarte por parte dos cidadãos. Conforme já exposto, sem um entendimento claro dos riscos ambientais e da necessidade de reciclar ou descartar os REEE corretamente, as pessoas podem optar pelo descarte inadequado, contribuindo diretamente para o problema do desafio 2.1.

Além disso, a falta de programas de capacitação pode resultar em dificuldades na classificação e segregação dos REEE (ligação desafio 1.1-1.3). Apesar do amplo reconhecimento de que o comportamento de descarte e a conscientização dos consumidores desempenham um papel fundamental em intervenções bem-sucedidas de gerenciamento de REEE, uma constatação relevante é que poucos consumidores possuem conhecimento sobre a importância da reciclagem de REEE, dos riscos associados a esses resíduos e dos locais de descarte disponíveis. Como resultado, é comum que muitos consumidores descartem incorretamente seus REEE junto com o resíduo domiciliar, independentemente de residirem em densos centros urbanos ou em vilas remotas (Andeobu, Wibowo e Grandhi, 2021b; Araujo *et al.*, 2017; Imran *et al.*, 2017; Jangre, Prasad e Patel, 2022; Kumar, 2019; Okwu *et al.*, 2022; Santos e Ogunseitan, 2022).

O desafio *Distribuição inadequada de pontos de descarte de REEE* é uma causa raiz que está intrinsecamente relacionada aos desafios referentes à infraestrutura de transporte e às distâncias envolvidas. O desafio 3.1, que diz respeito às *Infraestruturas de transporte de REEE deficientes*, ressalta a importância de sistemas logísticos eficazes para o transporte dos REEE dos pontos de coleta até as centrais de tratamento ou reciclagem. Quando os pontos de descarte estão distribuídos de maneira desigual, a infraestrutura de transporte torna-se ineficiente e dispendiosa, tornando ainda mais desafiadora a gestão adequada desses resíduos.

De forma similar, o desafio 3.2, que trata das *Distâncias extensas e onerosas*, enfatiza como as distâncias entre os pontos de coleta, tratamento e reciclagem podem aumentar os custos e a complexidade do transporte de REEE. Como argumentado por Kazancoglu *et al.* (2020), o custo de transporte é um critério crucial na

determinação da localização de um centro de triagem. No contexto do transporte de resíduos perigosos, dois objetivos fundamentais são considerados: custo e risco. Nesse contexto, a rota mais curta é também a rota mais rápida para as empresas transportadoras (Liang *et al.*, 2020).

De acordo com Costa, Nascimento e Ometto (2020), em muitos municípios brasileiros, o transporte e a destinação final de resíduos são frequentemente realizados de forma aleatória, sem uma análise aprofundada para reduzir a extensão das rotas. Isso resulta no consumo excessivo de combustível, elevando os custos associados ao processo. Portanto, a inadequada distribuição de pontos de descarte de REEE, juntamente com os desafios relacionados à infraestrutura de transporte e às distâncias envolvidas, formam um conjunto interconectado de obstáculos que precisa ser abordado para melhorar a gestão de REEE no Brasil.

Por fim, a distribuição inadequada de pontos de descarte de REEE também está relacionada ao desafio *4.3 Ausência ou quantidade insuficiente de empresas recicladoras de REEE*. Quando os pontos de descarte estão concentrados em áreas com poucas empresas recicladoras, pode haver um desequilíbrio entre a oferta e a demanda de serviços de reciclagem, o que dificulta o tratamento adequado dos REEE.

É importante notar que a falta de instalações formais de tratamento de REEE foi identificada como um desafio de infraestrutura tanto por Kumar e Dixit (2018b) quanto por Sharma, Joshi e Govindan (2021). Esses desafios de infraestrutura englobam a escassez de instalações para armazenamento, transporte, tratamento e descarte de REEE, bem como limitações no planejamento e na previsão da geração de REEE.

O desafio *Taxa de coleta de REEE incipiente e Pontos de coleta/descarte de REEE incipiente* é causa raiz pois tem um impacto direto na viabilidade e no desenvolvimento das empresas recicladoras de REEE. Quando a taxa de coleta de REEE é insuficiente e há escassez de pontos de coleta/descarte disponíveis, a quantidade de materiais REEE disponíveis para reciclagem diminui significativamente. Isso cria um cenário desafiador para as empresas recicladoras de REEE, uma vez que não têm acesso a uma quantidade suficiente de matéria-prima para justificar seus investimentos em infraestrutura e tecnologia. Como resultado, muitas empresas podem hesitar em ingressar no mercado de reciclagem de REEE, o



que contribui para a *Ausência ou quantidade insuficiente de empresas recicladoras de REEE* (4.3).

Além disso, como destacado por Bouvier e Wagner (2011), um desafio associado ao sistema de coleta de REEE, seja por meio de locais de entrega voluntária, empresas privadas e/ou centros de doação sem fins lucrativos, é a falta de acesso a instalações convenientemente localizadas. Isso dificulta a disposição adequada dos REEE por parte dos consumidores e, conseqüentemente, contribui para a *Taxa de coleta de REEE incipiente e a falta de Pontos de coleta/descarte de REEE adequados*.

Por outro lado, Nnorom, Osibanjo e Ogwuegbu (2011) concluíram que um dos principais desafios para uma gestão eficaz de REEE em países em desenvolvimento é a indisponibilidade de infraestrutura formal de reciclagem. A gestão de REEE é notoriamente desafiadora nesses países devido à carência de instalações adequadas e seguras para a reciclagem de REEE. Isso frequentemente leva ao acúmulo de resíduos nas residências e/ou ao descarte inadequado dos REEE, contribuindo para o desafio da *Taxa de coleta de REEE incipiente e da falta de Pontos de coleta/descarte de REEE adequados*.

O desafio *Centrais de recebimento e triagem de REEE insuficientes* é causa raiz porque sua falta de adequação compromete diretamente a eficácia de todo o processo de gestão de REEE. Sem uma infraestrutura adequada para processar e triar os REEE, as empresas recicladoras enfrentam dificuldades significativas em obter materiais de qualidade para seus processos de reciclagem. Isso pode desencorajar novos investimentos no setor de reciclagem de REEE e limitar a expansão das empresas já existentes. Chen, Faibil e Agyemang (2020) destacam que a disponibilidade de um sistema de infraestrutura desempenha um papel significativo no estímulo a práticas de gerenciamento na indústria de REEE.

Além disso, a falta de infraestrutura de recebimento e triagem também está interligada ao desafio *3.1 Infraestruturas de transporte de REEE deficientes*. A inadequação das centrais de recebimento e triagem dificulta o processo de transporte de REEE para essas instalações. Isso pode resultar em distâncias mais longas e custos mais elevados de transporte, o que, por sua vez, impacta negativamente o sistema de gestão de REEE como um todo.

Xavier et al. (2020) destacam que, para a segurança da desmontagem não-destrutiva de REEE, são necessárias: disposição do espaço para a recepção e acondicionamento dos REEE, acomodação das estações de trabalho (*workstations*) e ferramentas, além de um espaço próprio para a alocação dos diferentes materiais obtidos durante a desmontagem, parâmetros dificilmente encontrados em municípios de pequeno porte por conta da falta de instalações ou instalações de pequeno porte.

Já o desafio *Carência em P&D de tecnologias de reciclagem de REEE* é causa raiz, pois limita a capacidade de realizar um tratamento eficiente ou ainda dentro do território nacional. Sem tecnologias específicas para lidar com componentes eletrônicos não é possível recuperar materiais valiosos e reduzir a contaminação por resíduos perigosos contendo retardantes de chama, metais pesados, dentre outros. Isso cria um ciclo negativo em que a falta de tecnologias de reciclagem eficazes contribui para a ineficiência na gestão de REEE.

De acordo com Işildar et al. (2019), nos últimos anos, esforços consideráveis de investigação têm sido realizados para desenvolver processos biotecnológicos ecológicos para reciclagem de REEE. A seletividade em relação a metais individuais, a relação custo-benefício e a eco inovação são as vantagens potenciais destes processos.

Sem investimentos adequados em P&D para desenvolver tecnologias apropriadas, a classificação e segregação de REEE tornam-se um desafio ainda maior. Os materiais presentes no REEE possuem características físicas e químicas distintas, tornando essencial a implementação de processos de classificação e segregação específicos para cada tipo de material. Isso inclui a separação de componentes valiosos para a reciclagem, como metais preciosos, dos demais materiais, bem como a identificação e tratamento de componentes contendo substâncias tóxicas.

Kazançoglu et al. (2020) destacam que, ao contrário dos países desenvolvidos, nas economias emergentes, os REEE são coletados e reciclados (quando encaminhados para tratamento) sem qualquer classificação, e assim as peças úteis e valiosas, componentes e até produtos passíveis de reuso são incinerados (de forma irregular) ou dispostos em aterros sanitários.

Adicionalmente, a carência de tecnologias adequadas para a reciclagem também está intrinsecamente relacionada ao desafio *2.3 Sistemas inteligentes de coleta de REEE*

*inaplicados*. A eficácia dos sistemas inteligentes de coleta de REEE depende da capacidade de reciclar e reutilizar de forma eficiente os materiais coletados. Sem tecnologias avançadas de reciclagem, a implementação de sistemas inteligentes de coleta de REEE se torna inviável, uma vez que os materiais coletados teriam um destino limitado e inadequado.

Um estudo conduzido por Popa et al. (2017) destacou a falta de um sistema de coleta de resíduos totalmente automatizado, capaz de separar diferentes tipos de resíduos, juntamente com uma plataforma de cidade inteligente dedicada a esse tipo de sistema. Essa lacuna na literatura especializada e nas patentes examinadas nos Estados Unidos e na União Europeia ressalta a necessidade premente de desenvolver sistemas de reciclagem adequados para a coleta, segregação, reciclagem/reutilização e recuperação de REEE em especial em municípios de pequeno porte que demandam soluções otimizadas.

Conforme observado por Rene et al. (2021), as futuras pesquisas na área de recuperação de recursos a partir de REEE podem se concentrar no desenvolvimento de novas tecnologias, na otimização de processos, na compreensão dos mecanismos dos processos de recuperação de metais mediados por biocatalisadores e na utilização de novos materiais e produtos químicos que possam promover uma economia biocircular. Isso impulsionaria não apenas a implementação de sistemas inteligentes de coleta de REEE, mas também a sustentabilidade e a eficiência global do ciclo de vida desses REEE.

O desafio *Composição heterogênea dificulta o tratamento* é causa raiz pois a composição heterogênea dos REEE torna desafiador o processo de classificação e segregação desses REEE, além de processos de reciclagem com elevada seletividade. Devido à variedade de componentes eletrônicos, substâncias químicas e materiais presentes nos equipamentos, é complexo separar seletivamente os elementos que podem ser recuperados dos que precisam ser tratados de forma separada. Isso resulta na mistura de materiais, o que, por sua vez, dificulta o tratamento adequado dos REEE e pode levar ao descarte inadequado desses resíduos, contribuindo para o problema do descarte inadequado (desafio 2.1).

Em diversos países desenvolvidos, a separação de REEE representa um desafio significativo, devido à sua composição intrincada (Rajesh, Kanakadhurga e

Prabaharan, 2022). Shahabuddin et al. (2022) observam que o manuseio e processamento dos REEE ainda são questões complexas, devido à diversidade de materiais presentes, que incluem elementos perigosos, preciosos e outros.

Além disso, a composição heterogênea dos REEE apresenta desafios para as empresas recicladoras (desafio 4.3). A falta de padronização nos equipamentos eletrônicos dificulta o desenvolvimento de processos eficazes de reciclagem. Cada dispositivo pode conter uma combinação única de materiais e componentes, exigindo abordagens de reciclagem personalizadas. A ausência de empresas recicladoras especializadas e equipadas no Brasil para lidar com essa diversidade torna o tratamento dos REEE ainda mais complicado e dispendioso.

Tipicamente, o processo de pré-tratamento mecânico é amplamente empregado, envolvendo a separação mecânica de materiais por meio de métodos como moagem, separação eletrostática, separação magnética e classificação granulométrica, entre outros. Em muitos casos, esse estágio inicial de pré-processamento é a única etapa de tratamento que ocorre em municípios de pequeno porte, devido à sua simplicidade técnica e menor custo. No entanto, é importante observar que a falta de capacitação técnica para atuar no setor de reciclagem de REEE, conforme mencionado anteriormente, pode inviabilizar ou tornar esse processo ainda mais complexo.

Por fim, conclui-se que a principal contribuição da ARA é direcionar os esforços para essas 6 causas raízes. A organização destas permite identificar qual deve ser eliminada ou minimizada prioritariamente. As causas raízes são as que originam outras e não são tão perceptíveis pela organização. Eliminando-as será possível perceber uma reação em cadeia sobre todas as outras disfunções consequentes a elas, podendo-se alcançar a solução do efeito indesejado principal, apresentado no topo da ARA.

No grupo de foco, através da dúvida de um participante, discutiu-se se o desafio 4.3 *Ausência ou quantidade insuficiente de empresas recicladoras de REEE* era a causa principal do desafio 2.1, que veio a ser o efeito indesejável principal, ou vice-versa. Essa questão levou todos os participantes do grupo a refletirem profundamente, mas eventualmente chegaram a um consenso sobre essa relação.

Além disso, durante a discussão, os participantes também identificaram e propuseram novos desafios que não eram de natureza operacional, como o impacto orçamentário

dos entes públicos, a contaminação ambiental e a concentração do mercado. Esses desafios adicionais, que envolviam preocupações financeiras, ambientais e competitivas, ampliaram ainda mais a compreensão do grupo sobre os problemas subjacentes e enfatizaram a complexidade das interações no cenário em questão. No entanto, é importante ressaltar que este estudo se concentra principalmente na parte operacional, sublinhando que o problema é muito mais abrangente.

### 3.3.3 Etapa 3 – Proposição de diretrizes e estratégias para a implementação e operacionalização do SLR de REEE em municípios brasileiros de pequeno porte

A parte documental que se segue desempenha um papel complementar à análise em curso, oferecendo suporte substancial às considerações em discussão. A estratégia delineada abarca a formulação de diretrizes e abordagens derivadas das conclusões das etapas anteriores do processo.

A análise conduzida nas Etapas 1 e 2 permitiu a identificação de seis causas raízes, cujo impacto é profundamente interligado aos desafios enfrentados. Estas causas raízes, ao constituir o centro das questões em pauta, servem como fundamento para as diretrizes e estratégias que serão apresentadas. A abordagem proposta foca diretamente nas áreas centrais destas preocupações, almejando a formulação de soluções pragmáticas e direcionadas capazes de abordar os desafios de forma holística e duradoura.

Dessa forma, o Quadro 3 apresenta as diretrizes propostas que a seguir são discutidas individualmente.

Quadro 3 - Diretrizes e estratégias propostas para a implantação do SLR de REEE.

Diretrizes	Estratégias
<p><i>D.1 Fortalecimento de programas de capacitação e conscientização para o SLR de REEE</i></p>	<p>E 1.1 Desenvolver programas abrangentes de capacitação e conscientização para diferentes públicos, adaptados às suas necessidades específicas</p> <p>E 1.2 Integrar a educação ambiental desde a infância nas escolas, abordando temas relacionados à gestão de REEE, consumo responsável, reciclagem e reutilização</p> <p>E 1.3 Oferecer capacitação técnica para profissionais envolvidos na gestão de REEE, focando em práticas seguras e sustentáveis</p> <p>E 1.4 Realizar campanhas regulares de conscientização pública por meio de diversos canais de comunicação</p> <p>E 1.5 Estabelecer parcerias com organizações locais e ONGs especializadas em educação ambiental e gestão de resíduos</p>

Diretrizes	Estratégias
	<p>E 1.6 Implementar um sistema de monitoramento e avaliação contínuo para medir a eficácia dos programas</p> <p>E 1.7 Disponibilizar informações claras sobre práticas de gerenciamento de REEE e benefícios da participação ativa</p>
<p><i>D.2 Estabelecimento de uma rede de pontos de descarte adequada para REEE</i></p>	<p>E 2.1 Realizar uma avaliação estratégica de localização para identificar regiões com alta demanda de pontos de descarte de REEE</p> <p>E 2.2 estabelecer parcerias público-privadas que permitam a otimização da infraestrutura de coleta de REEE</p> <p>E 2.3 Garantir uma ampla cobertura de pontos de descarte em áreas urbanas e rurais, abrangendo bairros residenciais, centros comerciais, escolas e outras localizações de grande circulação</p> <p>E 2.4 Utilizar tecnologias de monitoramento, como aplicativos móveis e sistemas de rastreamento, para fornecer informações em tempo real sobre a localização e disponibilidade dos pontos de descarte de REEE</p> <p>E 2.5 Implementar programas de reciclagem e reutilização para os REEE coletados nos pontos de descarte</p>
<p><i>D.3 Fortalecimento da coleta e expansão dos pontos de descarte de REEE</i></p>	<p>E 3.1 Ratificar acordos já estabelecidos para municípios de médio/grande porte, estendendo-os aos municípios de pequeno porte, visando à uniformidade nas ações de coleta e descarte de REEE em todas as regiões</p> <p>E 3.2 Estabelecer uma meta geográfica para a expansão da rede de coleta de REEE, definindo áreas específicas de atuação e garantindo que os pontos de descarte estejam estrategicamente distribuídos para abranger o maior número possível de municípios de pequeno porte</p> <p>E 3.3 Implementar programas de incentivo à coleta, oferecendo recompensas ou descontos para quem entregar REEE em pontos específicos</p> <p>E 3.4 Estabelecer colaborações com empresas do setor privado, incluindo varejistas de eletrônicos, fabricantes e distribuidores, para criar redes de coleta em suas instalações e aumentar a quantidade de REEE coletados</p> <p>E 3.5 Investir em infraestrutura de reciclagem, permitindo o desmonte seguro e a recuperação eficiente de materiais valiosos de REEE</p> <p>E 3.6 Implementar um sistema de monitoramento contínuo para acompanhar a quantidade de REEE coletados e a eficácia dos pontos de coleta</p>
<p><i>D.4 Fortalecimento das Centrais de Recebimento e Triagem de REEE</i></p>	<p>E 4.1 Realizar uma avaliação de demanda e cobertura para identificar lacunas geográficas e dimensionais nas centrais de recebimento e triagem em relação à demanda de coleta e processamento de REEE</p> <p>E 4.2 Desenvolver planos de expansão das infraestruturas das centrais de recebimento e triagem com base na avaliação</p> <p>E 4.3 Explorar parcerias público-privadas, incentivando a colaboração entre o setor público e empresas do setor de</p>

Diretrizes	Estratégias
	<p>reciclagem, fabricantes e varejistas de eletrônicos para investir em novas centrais de recebimento e triagem</p> <p>E 4.4 Introduzir tecnologia e automação avançadas nas centrais de processamento para otimizar a eficiência e aumentar a capacidade de lidar com grandes volumes de REEE</p> <p>E 4.5 Oferecer capacitação de mão de obra especializada para os trabalhadores das centrais de recebimento e triagem</p> <p>E 4.6 Implementar um sistema de monitoramento e auditoria contínuos para acompanhar a operação das centrais, avaliar a qualidade da triagem, monitorar o fluxo de resíduos e assegurar a conformidade com padrões ambientais</p> <p>E 4.7 Integrar as associações no sistema de logística reversa de reee, transformando-as em centros de recebimento e aproveitando a infraestrutura existente</p> <p>E 4.8 Investir nas associações e implementar programas de capacitação para melhorar suas instalações e capacidade de manusear os REEE</p> <p>E 4.9 Incluir a estratégia de gestão de REEE nos planos municipais de resíduos sólidos, garantindo revisões regulares, para manter a abordagem atualizada e alinhada com as necessidades locais</p>
<p><i>D.5 Estímulo à pesquisa e desenvolvimento de tecnologias de reciclagem de REEE</i></p>	<p>E 5.1 Fomentar a colaboração acadêmica e industrial para desenvolver conjuntamente tecnologias de reciclagem de REEE</p> <p>E 5.2 Criar centros de inovação especializados em tecnologias de reciclagem de REEE para servir como locais de pesquisa, testes piloto e desenvolvimento de protótipos</p> <p>E 5.3 Fomentar incentivos financeiros, subsídios e fundos de pesquisa para empresas e instituições se envolverem em projetos de P&amp;D voltados para a reciclagem de REEE</p> <p>E 5.4 Promover competições e desafios de inovação visando desenvolver soluções criativas para os problemas da reciclagem de REEE</p> <p>E 5.5 Estabelecer normas e padrões de qualidade para as tecnologias de reciclagem de REEE</p> <p>E 5.6 Criar redes de conhecimento e colaboração, como conferências e fóruns, onde especialistas, pesquisadores e empresas possam compartilhar descobertas, ideias e avanços tecnológicos na área de reciclagem de REEE</p>
<p><i>D.6 Desenvolvimento de tecnologias adaptáveis para o tratamento de composições heterogêneas de REEE</i></p>	<p>E 6.1 Desenvolver sistemas de classificação automatizada e avançada para identificar e separar diferentes tipos de materiais presentes nos REEE</p> <p>E 6.2 Conceber instalações de tratamento com módulos adaptáveis capazes de lidar com diferentes tipos de resíduos</p> <p>E 6.3 Desenvolver processos de tratamento multifásicos que possam recuperar materiais seletivamente</p> <p>E 6.4 Explorar tecnologias que permitam a valorização energética de resíduos heterogêneos</p>

Diretrizes	Estratégias
	<p>E 6.5 Alocar recursos significativos para pesquisa e desenvolvimento de tecnologias inovadoras que abordem a complexidade da composição heterogênea dos REEE</p> <p>E 6.6 Desenvolver padrões e normas que orientem a indústria na adoção de tecnologias de tratamento de resíduos heterogêneos</p>

Fonte: Autoria própria.

### ***D.1 Fortalecimento de programas de capacitação e conscientização para os SLR***

Uma das medidas-chave para essa diretriz é o desenvolvimento de programas abrangentes de capacitação e conscientização, direcionados a uma variedade de públicos. Esses programas devem ser adaptados às necessidades específicas de cada grupo, abordando diferentes aspectos do gerenciamento de REEE. Isso inclui residentes locais, trabalhadores da indústria, autoridades governamentais e o setor privado, todos desempenhando papéis cruciais na gestão adequada dos REEE.

Além disso, é vital integrar a educação ambiental desde a infância, incorporando temas relacionados à importância da gestão adequada dos REEE, redução do consumo, reciclagem e reutilização nas escolas. Essa abordagem ajuda a criar uma cultura de responsabilidade ambiental desde cedo, preparando as futuras gerações para lidar com os desafios ambientais.

Para garantir a eficácia desses programas, é necessário oferecer capacitação técnica para profissionais envolvidos na coleta, transporte, tratamento e disposição de resíduos. Isso inclui motoristas de caminhões de lixo, operadores de instalações de tratamento de resíduos e outros profissionais. A capacitação deve enfatizar práticas seguras, eficientes e ambientalmente sustentáveis.

Adicionalmente, é crucial realizar campanhas de conscientização pública regularmente, utilizando diversos canais de comunicação, como mídia tradicional, redes sociais e eventos comunitários. Essas campanhas devem destacar os impactos negativos da falta de gestão de resíduos e ressaltar a importância de atitudes responsáveis por parte da sociedade.

Colaborar com organizações locais, grupos comunitários e ONGs que tenham expertise em educação ambiental e gestão de resíduos é outra estratégia valiosa. Essas parcerias podem enriquecer os programas de conscientização, alcançar



públicos mais amplos e garantir uma abordagem holística na abordagem do problema.

Para medir o impacto das ações em curso, é essencial implementar um sistema de monitoramento e avaliação contínuos. Isso permite ajustar os programas conforme necessário e assegurar que os objetivos de conscientização e capacitação sejam alcançados de maneira sustentável.

Por fim, disponibilizar informações claras e acessíveis sobre práticas corretas de gerenciamento de REEE, regulamentos locais e nacionais, e os benefícios da participação ativa é fundamental. Isso pode ser alcançado por meio de sites, materiais impressos e plataformas interativas, tornando as informações facilmente acessíveis à população.

### ***D.2 Estabelecimento de uma rede de pontos de descarte adequada para REEE***

Em primeiro lugar, é essencial realizar uma avaliação estratégica de localização, que envolve uma análise detalhada das áreas geográficas e densidade populacional para identificar as regiões com maior demanda e concentração de REEE. Com base nessa análise, é possível definir estrategicamente a localização dos pontos de descarte, assegurando que eles estejam facilmente acessíveis à população.

Em particular, para municípios com áreas rurais, é importante adotar uma abordagem específica, considerando as características únicas dessas regiões. Ao invés de se basear apenas na densidade populacional, sugere-se a criação de pontos de descarte direcionados às áreas rurais e outros locais isolados, como favelas, escolas, igrejas, cooperativas, e associações de bairro.

Além disso, é fundamental que os planos municipais contemplem o aumento do número de pontos de descarte e melhorem a distribuição desses pontos para melhor atender às necessidades da comunidade. Essa abordagem requer uma colaboração efetiva entre a prefeitura, a sensibilização da população local e um diálogo contínuo para garantir o sucesso da gestão de REEE nesses locais específicos.

Além disso, estabelecer parcerias público-privadas é uma medida eficaz para otimizar a infraestrutura de coleta de REEE. A colaboração entre entidades governamentais, empresas privadas e organizações não governamentais permite compartilhar

recursos e conhecimentos, além de coordenar esforços para criar uma rede de coleta eficaz e eficiente.

a cobertura adequada de pontos de descarte é fundamental para garantir que todos os cidadãos tenham acesso conveniente a esses locais, independentemente de estarem em áreas urbanas ou rurais. Portanto, é necessário distribuir os pontos de descarte em bairros residenciais, centros comerciais, escolas e outras localizações de grande circulação, além da área rural.

Para garantir a eficácia do sistema de coleta é importante implementar campanhas de educação e conscientização. Essas campanhas têm o papel de informar a população sobre a importância do descarte correto de REEE, destacando os riscos associados ao descarte inadequado e os benefícios ambientais e econômicos da reciclagem de equipamentos eletrônicos.

A utilização de tecnologias de monitoramento, como aplicativos móveis e sistemas de rastreamento, pode fornecer informações em tempo real sobre a localização e disponibilidade dos pontos de descarte de REEE. Isso facilita a interação da população com a rede de coleta, tornando o processo de descarte mais eficiente e conveniente.

Por fim, a implementação de programas de reciclagem e reutilização eficazes é crucial para lidar com os equipamentos coletados nos pontos de descarte. Estabelecendo parcerias com empresas especializadas, é possível garantir o tratamento adequado dos resíduos, promovendo a recuperação de materiais valiosos e reduzindo o impacto ambiental.

### ***D.3 Fortalecimento da coleta e expansão dos pontos de descarte de REEE***

Uma abordagem fundamental para melhorar a taxa de coleta de REEE é a ratificação de acordos já estabelecidos para municípios de médio e grande porte. Esses acordos podem ser estendidos aos municípios de pequeno porte, garantindo uma abordagem uniforme em nível estadual. Essa medida promoverá uma coleta mais abrangente e eficaz, contribuindo para o aumento da taxa de coleta de REEE.

Além disso, é importante considerar a implementação de acordos em nível estadual. Os estados podem estabelecer metas tanto quantitativas quanto geográficas. Como exemplo, no estado de São Paulo, onde a Cetesb (Resolução SMA 45/2015) definiu

para cada setor uma meta quantitativa (percentual de coleta sobre a quantidade colocada no mercado paulista no ano anterior, em peso) e uma meta geográfica (percentual dos municípios do Estado). Essas metas estabelecidas em nível estadual podem servir como um modelo para outras regiões, assegurando que todos os municípios, independentemente de seu tamanho ou localização, contribuam para o aumento da taxa de coleta e, assim, cumpram com os regulamentos estabelecidos.

Por fim, é essencial estabelecer metas geográficas para a expansão da rede de coleta de REEE. Isso garantirá que os pontos de descarte estejam estrategicamente distribuídos para abranger o maior número possível de localidades.

A expansão estratégica dos pontos de coleta é fundamental para tornar o processo de descarte mais acessível à população em geral. Identificar áreas de alta densidade populacional e locais de grande circulação, como centros comerciais e escolas, para estabelecer novos pontos de coleta de REEE, é uma estratégia eficaz para atingir esse objetivo.

Além disso, a implementação de programas de incentivo à coleta é uma estratégia eficaz para aumentar a participação ativa da população. Oferecer recompensas ou descontos para aqueles que entregarem seus REEE em pontos de coleta designados motiva as pessoas a descartar seus equipamentos de maneira responsável, contribuindo para um aumento na quantidade de resíduos coletados.

A colaboração com o setor privado desempenha um papel importante na melhoria da coleta de REEE. Estabelecer parcerias com empresas do setor privado, especialmente varejistas de eletrônicos, fabricantes e distribuidores, cria redes de coleta em suas instalações, o que facilita o descarte adequado e aumenta substancialmente a quantidade de resíduos coletados.

Para garantir que os REEE sejam devidamente tratados após a coleta, é crucial investir em infraestrutura de reciclagem eficiente. Isso permite o desmonte seguro e a recuperação de materiais valiosos de equipamentos eletrônicos, maximizando a extração de recursos e minimizando a poluição.

Além disso, a implementação de um sistema de monitoramento contínuo é a chave para avaliar o progresso e identificar áreas que precisam de melhorias. Acompanhar

a quantidade de REEE coletados e a eficácia dos pontos de coleta ajuda a ajustar as estratégias conforme necessário, garantindo uma gestão mais eficaz dos REEE.

#### ***D.4 Fortalecimento das Centrais de Recebimento e Triagem de REEE***

Primeiramente, a expansão da infraestrutura de coleta e triagem de REEE é fundamental para lidar com a crescente quantidade de REEE. Isso requer uma avaliação cuidadosa da demanda e cobertura das atuais centrais de recebimento e triagem, identificando deficiências geográficas e dimensionais. Com base nessa avaliação, planos de expansão devem ser desenvolvidos, priorizando regiões com alta densidade populacional, zonas industriais e áreas de grande geração de REEE.

Além disso, parcerias público-privadas desempenham um papel crucial nesse contexto. A colaboração entre o setor público e empresas privadas, incluindo as do setor de reciclagem, fabricantes e varejistas de eletrônicos, pode trazer recursos financeiros e expertise técnica para investir em novas centrais de recebimento e triagem.

A introdução de tecnologias avançadas de triagem e automação nas centrais de processamento de REEE é outra medida importante. Isso otimiza a eficiência do processo e permite lidar com grandes volumes de REEE de maneira mais eficaz, melhorando a seleção, desmontagem e preparação para reciclagem.

Além disso, é essencial investir na capacitação da mão de obra que trabalha nas centrais de recebimento e triagem de REEE. Isso garante que os trabalhadores possuam as habilidades necessárias para lidar com diversos tipos de equipamentos eletrônicos, contribuindo para um processo de triagem eficaz.

O monitoramento contínuo da operação das centrais e auditorias regulares são necessários para assegurar que os padrões ambientais sejam cumpridos e que o processo de triagem seja de alta qualidade.

Adicionalmente, integrar associações no sistema de logística reversa de REEE, transformando-as em centros de recebimento, simplifica a coleta e aproveita a infraestrutura já existente. Investir nessas associações e implementar programas de capacitação é fundamental para garantir que elas possam lidar de forma eficaz com os REEE. Investimentos e programas de capacitação podem superar as dificuldades

técnicas. Além disso, a inclusão dessa estratégia nos planos de resíduos sólidos municipais é essencial para garantir sua implementação em longo prazo.

Cabral conclui que é fundamental ressaltar que o poder público tem a capacidade de desenvolver políticas públicas para promover o SLR, incluindo as OCMRR, e assim, promover a inclusão social dos catadores. Destaca ainda que as OCMRR ainda não estão adequadamente preparadas para serem integradas a esse processo, representando um desafio significativo, uma vez que há potencial nessas organizações para aprimorar o descarte de resíduos e, conseqüentemente, gerar renda para os catadores e impulsionar as indústrias de reciclagem (Cabral, 2023).

Por fim, incluir a estratégia de gestão de REEE nos planos municipais de resíduos sólidos, com revisões regulares, assegura que a abordagem seja atualizada e alinhada com as necessidades locais. Essas ações, quando implementadas em conjunto, fortalecerão significativamente a capacidade de coleta, tratamento e reciclagem de REEE, promovendo uma gestão mais eficaz e sustentável dos REEE, além de contribuir para a preservação do meio ambiente e o aproveitamento de recursos valiosos.

#### ***D.5 Estímulo à pesquisa e desenvolvimento de tecnologias de reciclagem de REEE***

A primeira ação destaca a importância da colaboração entre instituições acadêmicas e a indústria de eletrônicos. Ao fomentar parcerias, é possível aproveitar o conhecimento especializado de cientistas, engenheiros e especialistas em reciclagem para desenvolver tecnologias inovadoras de reciclagem de REEE. Essa abordagem colaborativa permite uma combinação de habilidades e recursos que podem acelerar o desenvolvimento de soluções eficazes.

A criação de centros de inovação é outra ação crucial. Esses centros especializados em tecnologias de reciclagem de REEE servem como locais de pesquisa, testes piloto e desenvolvimento de protótipos. Eles atraem investimentos e expertise técnica, proporcionando um ambiente propício para o desenvolvimento e aprimoramento de tecnologias avançadas de reciclagem.

A disponibilização de incentivos financeiros para pesquisa e desenvolvimento é essencial para estimular a inovação nessa área. Empresas e instituições que se

envolvem em projetos de P&D voltados para a reciclagem de REEE podem receber apoio financeiro, subsídios e fundos de pesquisa. Isso não apenas incentiva a inovação, mas também atrai investimentos para o setor de reciclagem de eletrônicos.

A promoção de competições e desafios de inovação é uma maneira criativa de envolver diversos setores da sociedade no desenvolvimento de soluções para os problemas da reciclagem de REEE. Essas competições podem atrair a participação de *startups*, empreendedores e estudantes, acelerando a descoberta de novas tecnologias e abordagens.

Estabelecer normas e padrões de qualidade é essencial para garantir que as tecnologias de reciclagem de REEE sejam seguras, eficientes e atendam aos requisitos ambientais. O desenvolvimento dessas normas e padrões cria uma base sólida para o avanço tecnológico e promove a adoção global de práticas de reciclagem de REEE mais sustentáveis e consistentes.

Além disso, a criação de redes de conhecimento e colaboração é uma abordagem valiosa para compartilhar informações e avanços na área de reciclagem de REEE. Conferências, fóruns e outras iniciativas que reúnem especialistas, pesquisadores e empresas permitem a troca de descobertas, ideias e experiências. Essas redes de colaboração ajudam a manter todos os stakeholders atualizados sobre os últimos desenvolvimentos tecnológicos e melhores práticas.

Em conjunto, essas ações representam um esforço abrangente para impulsionar a pesquisa e desenvolvimento de tecnologias de reciclagem de REEE. Elas têm o potencial de catalisar avanços significativos nesse campo, permitindo a recuperação mais eficiente de materiais valiosos de REEE, reduzindo o desperdício e o impacto ambiental.

Além disso, a inovação nesse setor pode criar oportunidades econômicas, gerar empregos e promover a sustentabilidade ambiental, contribuindo para a transição em direção a uma economia circular. Portanto, é crucial que governos, instituições acadêmicas, indústria e outros *stakeholders* colaborem ativamente na implementação dessas ações para enfrentar os desafios associados à gestão de REEE e promover soluções mais sustentáveis para esse crescente problema ambiental.

### ***D.6 Desenvolvimento de tecnologias adaptáveis para o tratamento de composições heterogêneas de REEE***

Em primeiro lugar é crucial o desenvolvimento de sistemas de classificação automatizada e avançada. Esses sistemas fazem uso de tecnologias como visão computacional, aprendizado de máquina e sensores para identificar e separar eficientemente os diferentes tipos de materiais presentes nos REEE. Essa ação visa melhorar a precisão da separação, tornando o processo de tratamento mais eficaz.

Uma abordagem importante para lidar com a composição heterogênea dos REEE é a concepção de instalações de tratamento com módulos adaptáveis e flexíveis. Esses módulos podem ser ajustados para lidar com diferentes tipos de resíduos, permitindo uma maior flexibilidade e eficiência no tratamento, mesmo quando a composição dos resíduos muda ao longo do tempo.

Além disso, é fundamental o desenvolvimento de processos de tratamento multifásicos que possam recuperar seletivamente materiais variados. Isso envolve a implementação de etapas de desmontagem, separação mecânica, tratamento químico e reciclagem específica para cada tipo de material, garantindo uma abordagem abrangente para o tratamento dos REEE.

Para minimizar o desperdício e aproveitar ao máximo os recursos presentes nos resíduos heterogêneos, é importante explorar tecnologias de valorização energética.

O investimento em pesquisa e desenvolvimento desempenha um papel crítico nesse contexto, com a alocação de recursos significativos para impulsionar o desenvolvimento de tecnologias inovadoras capazes de abordar a complexidade da composição heterogênea dos REEE. A colaboração entre setores acadêmicos, industriais e governamentais é fundamental para impulsionar esses avanços.

Finalmente, é essencial o desenvolvimento de padrões e normas que orientem a indústria na adoção de tecnologias de tratamento de REEE. Essas normas garantem que as soluções sejam seguras, eficientes e ambientalmente responsáveis, promovendo a conformidade e a qualidade na gestão de REEE.

### **3.4 CONCLUSÕES**

Na etapa do *Survey*, obteve-se 131 respostas e é notável que, apesar de algumas divergências, todos os desafios foram validados para a próxima etapa, um sinal claro

da sua relevância e pertinência. Embora a discordância tenha atingido seu ponto máximo em 22,1%, é importante ressaltar que a maioria dos entrevistados concordou com todos os desafios. A média geral de discordância, que foi de 10,1% para os 13 desafios, sugere que, em média, os participantes encontraram uma base sólida para concordar com as propostas. A concordância geral alcançou 77,6%, refletindo um apoio abrangente aos desafios identificados.

A elaboração da ARA mostrou que o efeito indesejável principal foi o desafio 2.1 *Descarte inadequado de REEE*, juntamente com 6 causas raízes, sendo: *Ausência ou quantidade insuficiente de programas de capacitação e conscientização da população e dos entes dos SLR, Distribuição inadequada de pontos de descarte de REEE, Taxa de coleta de REEE incipiente e Pontos de coleta/descarte de REEE incipiente, Centrais de recebimento e triagem de REEE insuficientes, Carência em P&D de tecnologias de reciclagem de REEE e Composição heterogênea dificulta o tratamento.*

Por fim, na última etapa conclui-se que o conjunto de diretrizes e estratégias propostas se apresentam como uma ferramenta para tomadores de decisão capaz de fomentar a implementação e operacionalização do SLR de REEE em municípios brasileiros de pequeno porte.



## **CAPÍTULO 4: CONCLUSÃO GERAL**

### **4.1 CONCLUSÕES**

Este estudo abordou os desafios relacionados à implementação e operacionalização do SLR de REEE. Foram identificados 13 desafios distribuídos nas diferentes etapas do SLR, abrangendo desde a coleta até o tratamento final desses resíduos.

Uma análise detalhada revelou a complexidade das questões envolvidas no gerenciamento de REEE, destacando desafios significativos, como a ausência de programas de conscientização e capacitação para a população e os envolvidos no SLR, o descarte inadequado de REEE, a falta de infraestruturas adequadas de transporte e a carência de tecnologias avançadas de reciclagem.

Também foi evidenciado que a implementação bem-sucedida do SLR de REEE é um desafio ainda mais significativo em municípios de pequeno porte, onde as limitações logísticas e financeiras podem ser mais acentuadas.

Ao envolver a comunidade acadêmica, profissionais da área e partes interessadas, a pesquisa validou a relevância desses desafios e obteve um amplo apoio para suas propostas de diretrizes e estratégias para a implementação eficaz do SLR de REEE em municípios brasileiros de pequeno porte.

Portanto, os resultados deste estudo fornecem um valioso conjunto de informações que pode orientar ações futuras no sentido de melhorar a gestão de REEE, promover a conscientização e capacitação da população e, em última instância, contribuir para a redução dos impactos ambientais causados pelos REEE.

O foco nas particularidades de municípios de pequeno porte é especialmente relevante, pois aborda desafios específicos que muitas vezes são negligenciados em estudos mais amplos. Dessa forma, este trabalho representa uma contribuição importante para a área de gerenciamento de REEE no contexto brasileiro e internacional.

### **4.2 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

Para pesquisas futuras, recomenda-se uma abordagem mais abrangente que vá além do foco estritamente operacional. É fundamental que estudos posteriores explorem os aspectos econômicos, ambientais e outros fatores relevantes relacionados à

gestão de REEE. Isso permitirá uma compreensão mais completa e holística do problema e das oportunidades associadas ao SLR de REEE.

Além disso, é importante que pesquisas futuras considerem a avaliação dos impactos socioeconômicos das estratégias de implementação do SLR de REEE, bem como o potencial de criação de empregos, o impacto nas cadeias de suprimentos e as implicações para a economia local e regional. A análise dos aspectos ambientais deve incluir uma avaliação detalhada do ciclo de vida dos REEE e das estratégias de gestão, considerando o uso eficiente de recursos, a redução da pegada de carbono e outros indicadores de sustentabilidade ambiental.

Além disso, futuras pesquisas podem se concentrar em questões regulatórias e políticas que afetam a implementação do SLR de REEE, identificando lacunas e oportunidades para melhorar o quadro normativo existente.

Em resumo, o avanço do conhecimento sobre a gestão de REEE requer uma abordagem interdisciplinar que leve em consideração não apenas os aspectos operacionais, mas também os aspectos econômicos, ambientais e políticos envolvidos. Isso permitirá o desenvolvimento de soluções mais eficazes e sustentáveis para lidar com esse desafio crescente.

## CAPÍTULO 5: REFERÊNCIAS

ABINEE. Relatório Anual ABINEE 2019.

ACQUAH, A. A. *et al.* A preliminary assessment of physical work exposures among electronic waste workers at Agbogbloshie, Accra Ghana. *International Journal of Industrial Ergonomics*, v. 82, p. 103096, 1 mar. 2021.

AFONSO, J. C. Resíduos de Equipamentos Eletroeletrônicos: O Antropoceno Bate à Nossa Porta. *Revista Virtual de Química*, v. 10, n. 6, p. 1849–1897, 1 nov. 2018.

ALMULHIM, A. I. Household's awareness and participation in sustainable electronic waste management practices in Saudi Arabia. *Ain Shams Engineering Journal*, v. 13, n. 4, p. 101729, 1 jun. 2022.

ANANDH, G. *et al.* Reuse assessment of WEEE: Systematic review of emerging themes and research directions. *Journal of Environmental Management*, v. 287, p. 112335, 1 jun. 2021.

ANDEOBU, L.; WIBOWO, S.; GRANDHI, S. A Systematic Review of E-Waste Generation and Environmental Management of Asia Pacific Countries. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 2021, Vol. 18, Page 9051, v. 18, n. 17, p. 9051, 27 ago. 2021a.

\_\_\_\_. An assessment of e-waste generation and environmental management of selected countries in Africa, Europe and North America: A systematic review. *Science of the Total Environment*. Elsevier B.V., 20 out. 2021b. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148078>>. Acesso em: 30 mar. 2023

AQUINO, Í. R. B. DE *et al.* The Proposition of a Mathematical Model for the Location of Electrical and Electronic Waste Collection Points. *Sustainability* 2021, Vol. 13, Page 224, v. 13, n. 1, p. 224, 29 dez. 2020.

ARAÚJO, A. DOS S. *et al.* Modais de transporte no Brasil. *Pesquisa e Ação*, v. 5, n. 2447– 0627, 2019.

ARAUJO, R. R. D. *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, p. 19703–19713, 2017.

ARYA, S.; KUMAR, S. E-waste in India at a glance: Current trends, regulations, challenges and management strategies. *Journal of Cleaner Production*, v. 271, p. 122707, 20 out. 2020.

AWASTHI, A. K. *et al.* Environmental pollution and human body burden from improper recycling of e-waste in China: A short-review. *Environmental Pollution*, v. 243, p. 1310–1316, 1 dez. 2018.

AWASTHI, A. K.; LI, J. Management of electrical and electronic waste: A comparative evaluation of China and India. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 76, p. 434–447, 1 set. 2017.

BAIDYA, R *et al.* Supply chain analysis of e-waste processing plants in developing countries. *Waste Management & Research*, v. 38, n. 2, p. 173–183, 2020.

BAKHIYI, B. *et al.* Has the question of e-waste opened a Pandora's box? An overview of unpredictable issues and challenges. *Environment International*, v. 110, p. 173–192, 1 jan. 2018.

BEREŽNI, I. *et al.* WEEE treatment and system management in Italy and Serbia: A comparison. *Waste Management and Research*, v. 39, n. 10, p. 1302–1316, 1 out. 2021.

BORTHAKUR, A.; GOVIND, M. Emerging trends in consumers' E-waste disposal behaviour and awareness: A worldwide overview with special focus on India. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 117, p. 102–113, 1 fev. 2017.

BORTHAKUR, A.; SINHA, K. Electronic waste management in India: A stakeholder's perspective. *Electronic Green Journal*, v. 1, n. 36, 2013.

BOUVIER, R.; WAGNER, T. The influence of collection facility attributes on household collection rates of electronic waste: The case of televisions and computer monitors. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 55, n. 11, p. 1051–1059, 1 set. 2011.

BOUZON, M.; GOVINDAN, K.; RODRIGUEZ, C. M. T. Evaluating barriers for reverse logistics implementation under a multiple stakeholders' perspective analysis using grey decision making approach. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 128, p. 315–335, 1 jan. 2018.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010 LEI Nº. Brasília: [s.n.]. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm)>.

\_\_\_\_\_. DECRETO Nº 10.240, DE 12 DE FEVEREIRO DE 2020. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2019-2022/2020/decreto/D10240.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2020/decreto/D10240.htm)>.

Acesso em: 31 ago. 2022.

BUCUR, A. D. Aspects of the Population Awareness Strategy for Improving the Quality of the Environment. Case Study in the Rural Area. *Procedia Manufacturing*, v. 46, p. 322–329, 1 jan. 2020.

CABRAL, L. M. A. Integração das organizações de catadores de materiais recicláveis ao sistema de logística reversa de resíduos de equipamentos eletroeletrônicos de uso doméstico. Vitória: UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO, 2023.

CALIS, S.; ERGUL, N. R. Determination of Science Teacher Candidates' Views on Electronic waste Pollution. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, v. 186, p. 261–268, 13 maio 2015.

CHEN, D.; FAIBIL, D.; AGYEMANG, M. Evaluating critical barriers and pathways to implementation of e-waste formalization management systems in Ghana: a hybrid BWM and fuzzy TOPSIS approach. 2020.

CHOKKALINGAM, B. *et al.* Identification of the Root Causes for Blowhole Defect in Castings Using Quantitative Risk Ishikawa Diagrams. <https://doi-org.ez43.periodicos.capes.gov.br/10.1142/S0219686722500081>, v. 21, n. 2, p. 367–392, 22 set. 2021.

CIOCOIU, C. N. *et al.* Management of waste electrical and electronic equipment in Romania: A mini-review. *Waste Management and Research*, v. 34, n. 2, p. 96–106, 1 fev. 2016.

CLARIVATE. Journal Citation Reports - Clarivate. Disponível em: <<https://clarivate.com/products/scientific-and-academic-research/research-analytics-evaluation-and-management-solutions/journal-citation-reports/>>. Acesso em: 30 mar. 2023.

COLE, C. *et al.* An assessment of achievements of the WEEE Directive in promoting movement up the waste hierarchy: experiences in the UK. *Waste Management*, v. 87, p. 417–427, 15 mar. 2019.

COLE, C.; COOPER, T.; GNANAPRAGASAM, A. Extending product lifetimes through WEEE reuse and repair: Opportunities and challenges in the UK; Extending product lifetimes through WEEE reuse and repair: Opportunities and challenges in the UK. *Electronics Goes Green 2016+(EGG)*, p. 1-9, 2016.

COSTA, N. R. M.; NASCIMENTO, V. F.; OMETTO, J. P. H. B. Vista do A história da coleta de resíduos em Novo Hamburgo, RS e uma proposta de uma nova

roteirização utilizando sistema de informações geográficas. *Oficina Do Historiador*, v. 13, n. 2, 2020.

DAGILIŪTĖ, R *et al.* Waste of electrical and electronic equipment: Trends and awareness among youths in Lithuania. *Waste Management & Research*, v. 37, n. 1, p. 95–101, 2019.

DIXIT, S.; BADGAIYAN, A. J. Towards improved understanding of reverse logistics – Examining mediating role of return intention. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 107, p. 115–128, 1 fev. 2016.

DOSKOČIL, R.; LACKO, B. Root Cause Analysis in Post Project Phases as Application of Knowledge Management. *Sustainability 2019*, Vol. 11, Page 1667, v. 11, n. 6, p. 1667, 19 mar. 2019.

DUTTA, D.; GOEL, S. Understanding the gap between formal and informal e-waste recycling facilities in India. *Waste Management*, v. 125, p. 163–171, 15 abr. 2021.

ELIA, V.; GNONI, M. G.; TORNESE, F. Designing a sustainable dynamic collection service for WEEE: an economic and environmental analysis through simulation. *Waste Management and Research*, v. 37, n. 4, p. 402–411, 1 abr. 2019.

ELSEVIER. Content Coverage Guide | Elsevier solutions. Disponível em: <<https://www.elsevier.com/solutions/scopus/how-scopus-works/content>>. Acesso em: 30 mar. 2023.

EUROPEAN UNION. 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)., 2012.

FAN, C. *et al.* Modeling computer recycling in Taiwan using system dynamics. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 128, p. 167–175, 1 jan. 2018.

FAVARIN, S.; AZIANI, A. The Global Waste Trafficking and Its Correlates. *Journal of Contemporary Criminal Justice*, v. 36, n. 3, p. 351–383, 1 ago. 2020.

FAVOT, M. *et al.* Regulation and competition in the extended producer responsibility models: Results in the WEEE sector in Europe. *Waste Management*, v. 145, p. 60–71, 15 maio 2022.

FEITOSA, M. M. D. S. Políticas de gestão e gerenciamento integrados dos resíduos sólidos urbanos no município de Água Branca-AL. UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS, 2020.

FORTI, V. *et al.* Quantities, flows, and the circular economy potential The Global E-waste Monitor 2020. 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).

GHARIB, B. *et al.* Sustainable management of electronic waste: Empirical evidences from a stakeholders' perspective. 2022.

GOLLAKOTA, A. R. K.; GAUTAM, S.; SHU, C. M. Inconsistencies of e-waste management in developing nations – Facts and plausible solutions. *Journal of Environmental Management*, v. 261, p. 110234, 1 maio 2020.

GUARNIERI, P.; CERQUEIRA-STREIT, J. A.; BATISTA, L. C. Reverse logistics and the sectoral agreement of packaging industry in Brazil towards a transition to circular economy. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 153, p. 104541, 1 fev. 2020.

GUNARATHNE, N.; ALWIS, A. DE; ALAHAKOON, Y. Challenges facing sustainable urban mining in the e-waste recycling industry in Sri Lanka. *Journal of Cleaner Production*, v. 251, p. 119641, 1 abr. 2020.

HANSEN, U. E. *et al.* Managing e-waste from off-grid solar systems in Kenya: Do investors have a role to play? *Energy for Sustainable Development*, v. 69, p. 31–40, 1 ago. 2022.

HAQUE, K. F. *et al.* An IoT Based Efficient Waste Collection System with Smart Bins. Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2020.

HONG, J.; CHU, Z.; WANG, Q. Transport infrastructure and regional economic growth: Evidence from China. *Transportation*, v. 38, n. 5, p. 737–752, set. 2011.

IBELLI-BIANCO, C. *et al.* Education and training: Key solution to self-management and economic sustainability of waste pickers organisations. *Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy*, p. 0734242X2210800, 8 mar. 2022.

IBGE. Panorama geral do Brasil.

IMRAN, M. *et al.* E-waste flows, resource recovery and improvement of legal framework in Pakistan. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 125, p. 131–138, 1 out. 2017.

IŞILDAR, A. *et al.* Biotechnological strategies for the recovery of valuable and critical raw materials from waste electrical and electronic equipment (WEEE) – A review. *Journal of Hazardous Materials*, v. 362, p. 467–481, 15 jan. 2019.

ISLAM, M. T. *et al.* A global review of consumer behavior towards e-waste and implications for the circular economy. *Journal of Cleaner Production*, v. 316, p. 128297, 20 set. 2021.

JAFARI, A.; HEYDARI, J.; KERAMATI, A. Factors affecting incentive dependency of residents to participate in e-waste recycling: a case study on adoption of e-waste reverse supply chain in Iran. *Environment, Development and Sustainability*, v. 19, p. 325–338, 2017.

JANGRE, J.; PRASAD, K.; PATEL, D. Environmental Science and Pollution Research Analysis of barriers in e-waste management in developing economy: an integrated multiple-criteria decision-making approach. *Environmental Science and Pollution Research*, p. 1–115, 2022.

KAZANCOGLU, Y. *et al.* A proposed sustainable and digital collection and classification center model to manage e-waste in emerging economies. *Journal of Enterprise Information Management*, v. 34, n. 1, p. 267–291, 19 jun. 2020.

KAZANÇOĞLU, Y. *et al.* Analysis of the barriers to urban mining for resource melioration in emerging economies. *Resources Policy*, v. 68, p. 101768, 1 out. 2020.

KHOSHAND, A. *et al.* Prediction of e-waste generation: Application of modified adaptive neuro-fuzzy inference system (MANFIS). *Waste Management and Research*, v. 41, n. 2, p. 389–400, 1 fev. 2023.

KITZINGER, J. The methodology of Focus Groups: the importance of interaction between research participants. *Sociology of Health & Illness*, v. 16, n. 1, p. 103–121, 1 jan. 1994.

KOGAWA, A. C.; NUNES SALGADO, H. R. Quality tools for a successful strategic management. *International Journal of Business Process Integration and Management*, v. 8, n. 3, p. 153–159, 2017.

KOSHTA, N.; PATRA, S.; SINGH, S. P. Estimation of E-waste at micro level for reverse logistics: A case of Delhi. *Journal of Cleaner Production*, v. 314, p. 128063, 10 set. 2021.

\_\_\_\_\_. Sharing economic responsibility: Assessing end user's willingness to support E-waste reverse logistics for circular economy. *Journal of Cleaner Production*, v. 332, p. 130057, 15 jan. 2022.



KUMAR, A. Exploring young adults' e-waste recycling behaviour using an extended theory of planned behaviour model: A cross-cultural study. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 141, p. 378–389, 1 fev. 2019.

KUMAR, A.; DIXIT, G. Evaluating critical barriers to implementation of WEEE management using DEMATEL approach. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 131, p. 101–121, 1 abr. 2018a.

\_\_\_\_\_. An analysis of barriers affecting the implementation of e-waste management practices in India: A novel ISM-DEMATEL approach. *Sustainable Production and Consumption*, v. 14, p. 36–52, 1 abr. 2018b.

LECLERC, S. H.; BADAMI, M. G. Extended producer responsibility for E-waste management: Policy drivers and challenges. *Journal of Cleaner Production*, v. 251, p. 119657, 1 abr. 2020.

LIANG, S. *et al.* Sustainable transportation system for electronic waste recycling from a social perspective. *IET Intelligent Transport Systems*, v. 14, n. 11, p. 1378–1387, 1 nov. 2020.

LIBRELATO, T. P. *et al.* A process improvement approach based on the value stream mapping and the theory of constraints thinking process. *Business Process Management Journal*, v. 20, n. 6, p. 922–949, 28 out. 2014.

LIU, L. *et al.* A review of waste prevention through 3R under the concept of circular economy in China. v. 19, p. 1314–1323, 2017.

LIU, W.; HUANG, M.; WANG, - HAIFENG. Same journal but different numbers of published records indexed in Scopus and Web of Science Core Collection: causes, consequences, and solutions. *Scientometrics*, v. 126, p. 4541–4550, 2021.

MAPHOSA, V.; MAPHOSA, M. E-waste management in Sub-Saharan Africa: A systematic literature review. *Cogent Business and Management*, v. 7, n. 1, 1 jan. 2020.

MARCZUK, A. *et al.* The research on effectiveness of the electronic and electrical waste selective collection system in Lublin city, Poland. *Archives of Environmental Protection*, v. 45, n. 3, p. 55–63, 2019.

MARINELLO, S.; GAMBERINI, R. toxics Multi-Criteria Decision Making Approaches Applied to Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE): A Comprehensive Literature Review. 2021.

MASUD, M. H. *et al.* Towards the effective E-waste management in Bangladesh: a review. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 6, p. 1250–1276, 2019.

MMEREKI, D.; LI, B.; LI'AO, W. Waste electrical and electronic equipment management in Botswana: Prospects and challenges. *Journal of the Air & Waste Management Association*, v. 65, n. 1, p. 11–26, 2015.

MOHAMMADI, E.; SINGH, S. J.; HABIB, K. How big is circular economy potential on Caribbean islands considering e-waste? *Journal of Cleaner Production*, v. 317, p. 128457, 1 out. 2021.

MORGANTI, M.; FAVARIN, S.; ANDREATTA, D. Illicit Waste Trafficking and Loopholes in the European and Italian Legislation. *European Journal on Criminal Policy and Research*, v. 26, n. 1, p. 105–133, 1 mar. 2020.

MUNIZ, F. A. *et al.* Valorização de resíduos: recuperação de metais de placas de circuitos eletrônicos. *Revista Engenharia*, v. 9, p. 65–79, 2017.

NETO, J. F. O.; SILVA, M.; SANTOS, S. M. A Mini-Review of E-Waste Management in Brazil: Perspectives and Challenges. 2019.

NNOROM, I. C.; OSIBANJO, O.; OGWUEGBU, M. O. C. Global disposal strategies for waste cathode ray tubes. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 55, n. 3, p. 275–290, 1 jan. 2011.

NOGUEIRA ZON, J. L. *et al.* Waste pickers organizations and municipal selective waste collection: Sustainability indicators. *Waste Management*, v. 118, p. 219–231, 1 dez. 2020.

NOWAKOWSKI, P. The influence of residents' behaviour on waste electrical and electronic equipment collection effectiveness. *Waste Management & Research*, v. 34, n. 11, p. 1126–1135, 2016.

NOWAKOWSKI, P. A proposal to improve e-waste collection efficiency in urban mining: Container loading and vehicle routing problems – A case study of Poland. *Waste Management*, v. 60, p. 494–504, 1 fev. 2017.

\_\_\_\_\_. Investigating the reasons for storage of WEEE by residents – A potential for removal from households. *Waste Management*, v. 87, p. 192–203, 15 mar. 2019.

NOWAKOWSKI, P.; MRÓWCZYŃSKA, B. Towards sustainable WEEE collection and transportation methods in circular economy - Comparative study for rural and urban settlements. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 135, p. 93–107, 1 ago. 2018.

NOWAKOWSKI, P.; PAMUŁA, T. Application of deep learning object classifier to improve e-waste collection planning. *Waste Management*, v. 109, p. 1–9, 15 maio 2020.

OKWU, O. *et al.* New Models to Reduce the Health Risks of Informal WEEE Recyclers in MTN Phone Village, Rumukurushi, Port Harcourt, Nigeria. 2022.

ORLINS, S.; GUAN, D. China's toxic informal e-waste recycling: local approaches to a global environmental problem. *Journal of Cleaner Production*, v. 114, p. 71–80, 15 fev. 2016.

PARANHOS, R. *et al.* Corra que o survey vem aí. Noções básicas para cientistas sociais. *Revista Latinoamericana de Metodología de la Investigación Social*, v. 6, n. 1853–6190, p. 07–24, 2013.

PÉREZ-BELIS, V. *et al.* Consumer attitude towards the repair and the second-hand purchase of small household electrical and electronic equipment. A Spanish case study. *Journal of Cleaner Production*, v. 158, p. 261–275, 1 ago. 2017.

POPA, C. L. *et al.* Smart City Platform Development for an Automated Waste Collection System. *Sustainability 2017*, Vol. 9, Page 2064, v. 9, n. 11, p. 2064, 10 nov. 2017.

POURHEJAZY, P. *et al.* Integrated E-waste transportation using capacitated general routing problem with time-window. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, v. 145, p. 102169, 1 jan. 2021.

RAJESH, R.; KANAKADHURGA, D.; PRABAHARAN, N. Electronic waste: A critical assessment on the unimaginable growing pollutant, legislations and environmental impacts. *Environmental Challenges*, v. 7, p. 100507, 1 abr. 2022.

RAUTELA, R. *et al.* E-waste management and its effects on the environment and human health. *Science of The Total Environment*, v. 773, p. 145623, 15 jun. 2021.

RENA *et al.* Eco-innovations and sustainability in solid waste management: An indian upfront in technological, organizational, start-ups and financial framework. *Journal of Environmental Management*, v. 302, p. 113953, 15 jan. 2022.

RENE, E. R. *et al.* Electronic waste generation, recycling and resource recovery: Technological perspectives and trends. *Journal of Hazardous Materials*, v. 416, p. 125664, 15 ago. 2021.

RIBEIRO, Á. A. A coleta seletiva: recapturando valores de materiais recicláveis e reduzindo o descarte de rejeitos no meio ambiente de uma cidade mineira. UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO, 2019.

RIZOS, V.; BRYHN, J. Implementation of circular economy approaches in the electrical and electronic equipment (EEE) sector: Barriers, enablers and policy insights. *Journal of Cleaner Production*, v. 338, p. 130617, 1 mar. 2022.

ROGERS, D. S.; TIBBEN-LEMBKE, R. S. *Going Backwards: Reverse Logistics Trends and Practices*, 1999.

SALHOFER, S. *et al.* WEEE management in Europe and China – A comparison. *Waste Management*, v. 57, p. 27–35, 1 nov. 2016.

SALMON, D. *et al.* A framework for modeling fraud in E-waste management. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 171, p. 105613, 1 ago. 2021.

SANTOS, S. M.; OGUNSEITAN, O. A. E-waste management in Brazil: Challenges and opportunities of a reverse logistics model. *Environmental Technology & Innovation*, v. 28, p. 102671, 1 nov. 2022.

SARI, D. P.; MASRUROH, N. A.; ASIH, A. M. S. Extended Maximal Covering Location and Vehicle Routing Problems in Designing Smartphone Waste Collection Channels: A Case Study of Yogyakarta Province, Indonesia. *Sustainability* 2021, Vol. 13, Page 8896, v. 13, n. 16, p. 8896, 9 ago. 2021.

SHAHABUDDIN, M. *et al.* A review of the recent development, challenges, and opportunities of electronic waste (e-waste). *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2022.

SHAHRASBI, A.; SHOKOUHYAR, S.; ZEIDYAHYAE, N. “Consumers’ behavior towards electronic wastes from a sustainable development point of view: An exploration of differences between developed and developing countries”. *Sustainable Production and Consumption*, v. 28, p. 1736–1756, 1 out. 2021.

SHARMA, M.; JOSHI, S.; GOVINDAN, K. Issues and solutions of electronic waste urban mining for circular economy transition: An Indian context. *Journal of Environmental Management*, v. 290, p. 112373, 15 jul. 2021.

SHARTS-HOPKO, N. C. Focus Group Methodology: When and Why? *Journal of the Association of Nurses in AIDS Care*, v. 12, n. 4, p. 89–91, 1 jul. 2001.

SHEVCHENKO, T. *et al.* recycling Communication Towards a Smart E-Waste System Utilizing Supply Chain Participants and Interactive Online Maps. 2021.

SHITTU, O. S.; WILLIAMS, I. D.; SHAW, P. J. Global E-waste management: Can WEEE make a difference? A review of e-waste trends, legislation, contemporary issues and future challenges. *Waste Management*, v. 120, p. 549–563, 1 fev. 2021.

SIDDIQUA, A ; *et al.* Citation: E-Device Purchase and Disposal Behaviours in the UAE: An Exploratory Study. 2022.

SIMAN, R. *et al.* Governance tools: Improving the circular economy through the promotion of the economic sustainability of waste picker organizations. *Waste Management*, v. 105, p. 148–169, 15 mar. 2020.

SINGH, S.; DASGUPTA, M. S.; ROUTROY, S. Evaluation of sustainable e-waste collection method for urban and rural region of India. *Waste Management and Research*, v. 40, n. 5, p. 545–555, 1 maio 2022.

SINGH, V. K. *et al.* The journal coverage of Web of Science, Scopus and Dimensions: A comparative analysis. *Scientometrics*, v. 126, n. 6, p. 5113–5142, 1 jun. 2021.

SINHA-KHETRIWAL, D.; KRAEUCHI, P.; SCHWANINGER, M. A comparison of electronic waste recycling in Switzerland and in India. *Environmental Impact Assessment Review*, v. 25, n. 5 SPEC. ISS., p. 492–504, 2005.

SIRISAWAT, P. *et al.* A study of reverse logistics practices: A case study of the computer parts industry in Thailand; A study of reverse logistics practices: A case study of the computer parts industry in Thailand. [s.l: s.n.].

SIRISAWAT, P.; KIATCHAROENPOL, T. Fuzzy AHP-TOPSIS approaches to prioritizing solutions for reverse logistics barriers. *Computers & Industrial Engineering*, v. 117, p. 303–318, 1 mar. 2018.

SONG, X. *et al.* An updated review and conceptual model for optimizing WEEE management in China from a life cycle perspective. *Frontiers of Environmental Science & Engineering* 2017 11:5, v. 11, n. 5, p. 1–12, 12 ago. 2017.

TANSEL, B. From electronic consumer products to e-wastes: Global outlook, waste quantities, recycling challenges. *Environment International*, v. 98, p. 35–45, 1 jan. 2017.

\_\_\_\_. Increasing gaps between materials demand and materials recycling rates: A historical perspective for evolution of consumer products and waste quantities. *Journal of Environmental Management*, v. 276, p. 111196, 15 dez. 2020.

TEMBHARE, SAURABH P *et al.* E-waste recycling practices: a review on environmental concerns, remediation and technological developments with a focus on printed circuit boards. *Development and Sustainability*, v. 24, p. 8965–9047, 2022.

THAKUR, P.; KUMAR, S. Metallurgical processes unveil the unexplored “sleeping mines” e- waste: a review. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 27, p. 32359–32370, 2020.

TIAN, X. *et al.* Design and simulation of a secondary resource recycling system: A case study of lead-acid batteries. *Waste Management*, v. 126, p. 78–88, 1 maio 2021.

TRAN, H. P. *et al.* Material flow analysis for management of waste TVs from households in urban areas of Vietnam. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 139, p. 78–89, 1 dez. 2018.

VENTURA, K. S.; BEATRIZ, A.; SUQUISAQUI, V. Aplicação de ferramentas SWOT e 5W2H para análise de consórcios intermunicipais de resíduos sólidos urbanos. *Ambiente Construído*, v. 20, n. 1, p. 333–349, 5 dez. 2019.

VIEIRA, B. DE O. *et al.* Prioritizing barriers to be solved to the implementation of reverse logistics of e-waste in Brazil under a multicriteria decision aid approach. *Sustainability (Switzerland)*, v. 12, n. 10, 1 maio 2020.

WATSON, K. J.; BLACKSTONE, J. H.; GARDINER, S. C. The evolution of a management philosophy: The theory of constraints. *Journal of Operations Management*, v. 25, n. 2, p. 387–402, 1 mar. 2007.

WILKER, W. *et al.* Rapid protocol proposal for visual inspection of wooden bridges. *Advances in Forestry Science*, v. 9, n. 2, p. 1761–1771, 29 jul. 2022.

XAVIER, L. H. DA S. M. *et al.* Resíduos de Equipamentos Eletroeletrônicos Guia de Desmontagem, 2020.

XAVIER, L. H.; OTTONI, M.; LEPAWSKY, J. Circular economy and e-waste management in the Americas: Brazilian and Canadian frameworks. *Journal of Cleaner Production*, v. 297, 15 maio 2021.

YAMANE, L. H.; SIMAN, R. R.; DUTRA, R. M. DE S. Assessment and perception of occupational risks in waste picker organizations: a portrait of waste pickers situation after formal integration. *Detritus*, v. 22, p. 13–26, 1 mar. 2023.

- YAO, L. *et al.* The integrated design and optimization of a WEEE collection network in Shanghai, China. *Waste Management and Research*, v. 31, n. 9, p. 910–919, 7 set. 2013.
- YLÄ-MELLA, J.; KEISKI, R. L.; PONGRÁCZ, E. Electronic waste recovery in Finland: Consumers' perceptions towards recycling and re-use of mobile phones. *Waste Management*, v. 45, p. 374–384, 1 nov. 2015.
- YONG, Y. S.; LIM, Y. A.; ILANKOON, I. M. S. K. An analysis of electronic waste management strategies and recycling operations in Malaysia: Challenges and future prospects. *Journal of Cleaner Production*, v. 224, p. 151–166, 1 jul. 2019.
- ZENG, X.; LI, J. Measuring the recyclability of e-waste: an innovative method and its implications. *Journal of Cleaner Production*, v. 131, p. 156–162, 10 set. 2016.
- ZHANG, H. *et al.* Assessing the effects of internet technology use on rural households' cooking energy consumption: Evidence from China. *Energy*, v. 284, p. 128726, 1 dez. 2023.
- ZHANG, S. *et al.* Challenges in legislation, recycling system and technical system of waste electrical and electronic equipment in China. *Waste Management*, v. 45, p. 361–373, 1 nov. 2015a.