

RESÍDUOS DE EQUIPAMENTOS ELETROELETRÔNICOS (REEE): DESAFIOS AMBIENTAIS E SOCIAIS

WASTE ELECTRICAL AND ELECTRONIC EQUIPMENT (WEEE): ENVIRONMENTAL AND SOCIAL CHALLENGES

Fernando Rodrigo Souza
Faculdade de Tecnologia de Sorocaba, fernando.souza59@fatec.sp.gov.br

DOI: 10.54628/issn2763-5600.v18.1.2024.286

Resumo

Este artigo faz uma análise da questão dos Resíduos de Equipamentos Eletroeletrônicos (REEE) na era digital utilizando uma abordagem qualitativa, exploratória e descritiva, a partir de uma revisão sistemática da literatura existente sobre REEE. Isso envolveu a consulta de uma ampla variedade de fontes, incluindo estudos acadêmicos, relatórios de organizações internacionais e dados estatísticos relevantes. A revisão da literatura permitiu uma compreensão dos fatores que impulsionam a geração de REEE, como o desenvolvimento econômico, a urbanização e os hábitos de consumo na era digital. Além disso, o estudo incluiu uma análise de casos específicos que ilustram a eficácia de estratégias importantes, como o ecodesign e a extensão da vida útil dos produtos eletrônicos, na redução da geração de REEE e na minimização de seus impactos ambientais. Um elemento dos resultados deste estudo é a exploração da integração do setor informal na gestão de REEE, com foco em exemplos concretos da Índia e do Brasil. Esses casos reais realçam a importância da regulamentação e formalização dessas atividades para otimizar seu potencial. Ao promover uma abordagem colaborativa entre diversas partes interessadas, como governos, indústrias e a sociedade civil, este estudo busca oferecer soluções sustentáveis para o desafio dos REEE na era digital. Além disso, destaca a relevância crítica da conscientização pública e da educação como instrumentos fundamentais para impulsionar o consumo responsável, fomentar a reciclagem de produtos eletrônicos e construir um futuro mais sustentável.

Palavras-chave: Resíduos de Equipamentos Eletroeletrônicos (REEE). *Ecodesign*. Sustentabilidade.

Abstract

This article analyzes the issue of Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE) in the digital age using a qualitative, exploratory and descriptive approach, based on a systematic review of the existing literature on WEEE. This involved consulting a wide variety of sources, including academic studies, reports from international organizations and relevant statistical data. The literature review provided an understanding of the factors that drive the generation of WEEE, such as economic development, urbanization and consumption habits in the digital age. In addition, the study included an analysis of specific cases that illustrate the effectiveness of important strategies, such as eco-design and extending the useful life of electronic products, in reducing the generation of WEEE and minimizing its environmental impacts. One element of the results of this study is the exploration of the integration of the informal sector in WEEE management, focusing on concrete examples from India and Brazil. These real-life cases highlight the importance of regulating and formalizing these activities in order to optimize their potential. By promoting a collaborative approach between various stakeholders, such as governments, industries and civil society, this study seeks to offer sustainable solutions to the challenge of WEEE in the digital age. In addition, it highlights the critical relevance of public awareness and education as key instruments to drive responsible consumption, fostering sustainable consumption and improving the quality of life.

Keywords: Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE). Ecodesign. Sustainability

1 INTRODUÇÃO

No contexto deste estudo sobre Resíduos de Equipamentos Eletroeletrônicos (REEE), é importante compreender a complexidade que abrange diversos aspectos da sociedade contemporânea.

O desenvolvimento econômico, a urbanização e os padrões de consumo desempenham papéis cruciais na geração crescente de REEE (Widmer *et al.*, 2005; Wang; Xu; Guo, 2019). À medida que as economias crescem e as populações se urbanizam, há um aumento significativo no consumo de produtos eletrônicos. Essa crescente demanda resulta em uma maior produção e descarte de dispositivos, contribuindo para a problemática dos REEE (Ghulam; Abushammala, 2023; Fraige *et al.*, 2023).

No entanto, a temática exige uma análise dos desafios que permeiam essa questão multifacetada. Uma estratégia fundamental para abordar eficazmente a problemática dos REEE é a promoção do *ecodesign* e a extensão da vida útil dos produtos eletrônicos (Gu *et al.*, 2017; Kumar; Holuszko; Espinosa, 2017). O *ecodesign* envolve a criação de produtos com menor impacto ambiental, fazendo uso de materiais mais sustentáveis e facilitando a reciclagem e o reparo. Estender a vida útil dos dispositivos eletrônicos, seja por meio de atualizações, reparos ou reutilização, pode reduzir significativamente a necessidade de descarte prematuro (Sampaio *et al.*, 2023).

A integração do setor informal na gestão de REEE, como observado em países como Índia e Brasil, oferece oportunidades significativas. Esses trabalhadores desempenham frequentemente um papel crucial na coleta e desmontagem de produtos eletrônicos descartados, contribuindo para a recuperação de materiais valiosos. No entanto, para maximizar seu potencial e garantir condições de trabalho seguras, é imperativo regulamentar e formalizar essa atividade, estabelecendo padrões de segurança, treinamento e acesso a equipamentos de proteção (Arya e Kumar, 2020; Abalansa *et al.*, 2021).

A gestão eficaz de REEE requer uma colaboração ampla e coordenada entre diferentes partes interessadas (Silva; Weins; Potinkara, 2019). Governos, indústrias, organizações não governamentais e a sociedade civil precisam trabalhar juntos para desenvolver políticas e práticas abrangentes. A implementação de sistemas de responsabilidade estendida do produtor (REP) pode responsabilizar os fabricantes pela gestão adequada dos produtos ao final de sua

vida útil. Parcerias público-privadas podem ser fundamentais para o investimento em infraestrutura de reciclagem e coleta adequada de REEE.

A conscientização pública e a educação desempenham um papel vital na mudança de comportamento em relação ao consumo de produtos eletrônicos. A sociedade precisa compreender os impactos ambientais e sociais do descarte inadequado de produtos eletrônicos e ser incentivada a adotar práticas de consumo responsável. Campanhas de conscientização podem promover a reciclagem, a doação de eletrônicos ainda funcionais e a compra de produtos projetados para serem mais duráveis e sustentáveis (De Carvalho *et al.*, 2023).

É importante reconhecer que os desafios associados aos REEE são globais, mas as soluções frequentemente devem ser adaptadas localmente. Cada país possui sua própria dinâmica de consumo, infraestrutura e regulamentação. Portanto, abordagens flexíveis que levem em consideração essas diferenças são essenciais (Liu *et al.*, 2023).

Os Resíduos de Equipamentos Eletroeletrônicos representam um desafio multidimensional. Ao promover o *ecodesign*, estender a vida útil dos produtos, integrar o setor informal, colaborar entre diferentes atores e educar o público, é possível avançar em direção a uma gestão mais sustentável dos REEE. A busca por soluções deve ser incessante, pois o equilíbrio entre as necessidades econômicas e ambientais é essencial para construir um futuro mais sustentável (De Oliveira Neto *et al.*, 2023; Boateng; Adams, 2023).

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 impacto do desenvolvimento econômico, urbanização e consumo de eletroeletrônicos na geração de resíduos

A crescente geração de resíduos de equipamentos Eletroeletrônicos (REEE) é uma questão de relevância global, que transcende fronteiras geográficas e tem implicações significativas em termos de sustentabilidade ambiental, econômica e social. Este estudo visa a compreensão desse fenômeno complexo, com um foco específico nos Estados Unidos, China, Índia e Brasil, e destacar o impacto do desenvolvimento econômico, urbanização e padrões de consumo de eletroeletrônicos (Bhattacharjee *et al.*, 2023; Shahabuddin *et al.*, 2023).

Conforme dados recentes da Organização das Nações Unidas (ONU) e Eletron (2021), os Estados Unidos, China e Índia responderam por uma parcela substancial, cerca de 38%, da produção global de REEE no ano de 2019. Esses países desempenham um papel de destaque nesse cenário global, não apenas devido ao tamanho de suas economias, mas também à sua

grande população. É importante ressaltar que o desenvolvimento econômico tem se mostrado um fator determinante na geração de REEE (Castro *et al.*, 2023; Jain *et al.*, 2023).

Vários estudos, como os de Widmer *et al.* (2005) e Wang *et al.* (2019), corroboram a relação entre o crescimento econômico, medido pelo Produto Interno Bruto (PIB), e o aumento na produção de REEE. E o aumento do PIB impulsiona o consumo de produtos eletrônicos, contribuindo para uma maior geração de resíduos (Tian *et al.*, 2023).

Ao analisarmos com mais profundidade os Estados Unidos e a China, dois dos maiores geradores de REEE, fica evidente a forte ligação entre o desenvolvimento econômico e a produção de resíduos eletrônicos. A China, por exemplo, com seu crescimento econômico acelerado nas últimas décadas, testemunhou uma explosão no consumo de eletroeletrônicos (He *et al.*, 2016). Isso resultou em uma crescente geração de REEE, tornando a China uma das principais contribuintes para esse problema global.

A Índia, por sua vez, apresenta um cenário único. Embora tenha uma população significativa que naturalmente contribui para uma quantidade considerável de REEE, a geração per capita de resíduos é menor em comparação com os Estados Unidos e a China. A relação inversa entre o PIB Per Capita e a geração de REEE per capita é destacada nas análises de Singh e Kumar (2018). No entanto, a urbanização emerge como um fator crítico, uma vez que a Índia possui uma população predominantemente rural, o que influencia significativamente os padrões de consumo (Forti *et al.*, 2020).

O Brasil, em sua posição de destaque como um dos maiores produtores de equipamentos eletrônicos do mundo, também enfrenta desafios significativos. Embora tenha um PIB e uma população menores em comparação com os demais países analisados, o Brasil possui a maior proporção de população urbana e um PIB Per Capita superior ao da Índia. Isso resulta em uma geração per capita de REEE mais elevada do que a observada na China e na Índia (Kumar; Holuszko; Espinosa, 2017).

No entanto, a dimensão econômica não é a única responsável pelo aumento da geração de REEE. O aumento da renda nacional e per capita, aliado à industrialização e urbanização, tem transformado os hábitos de consumo em todo o mundo. Estudos como os de Castro *et al.* (2020) e Pansini, Gorrasi e Vittoria (2019) demonstram que a busca incessante por atualizações tecnológicas, frequentemente desnecessárias do ponto de vista funcional, tem encurtado os ciclos de vida dos produtos, levando ao descarte prematuro e ao aumento do volume de REEE.

Nesse contexto, medidas de conscientização pública, políticas eficazes de gestão de resíduos eletrônicos e o estímulo ao design sustentável são cruciais para mitigar os impactos

negativos dessa crescente geração de REEE. A reciclagem e a promoção do reparo de dispositivos eletrônicos também emergem como estratégias eficazes para reduzir o desperdício e conservar recursos valiosos (Schroeder *et al.*, 2019).

A análise das interações entre o desenvolvimento econômico, urbanização e padrões de consumo de EEE nos Estados Unidos, China, Índia e Brasil oferece uma visão das complexidades envolvidas na geração de REEE. A abordagem desse desafio requer a colaboração de diversos atores, desde governos até indústrias e a sociedade civil, em busca de soluções sustentáveis que atendam às necessidades da sociedade sem comprometer o meio ambiente (Neto *et al.*, 2023).

2.2 Legislação Internacional e Nacional sobre Resíduos de Equipamentos

Eletroeletrônicos

A questão dos Resíduos de Equipamentos Eletroeletrônicos (REEE) tem ganhado crescente atenção global, resultando em avanços significativos na legislação tanto em nível internacional quanto nacional. Atualmente, 78 países têm algum tipo de regulamentação relacionada aos REEE. Além disso, 189 países são signatários da Convenção de Basileia, que controla o movimento transfronteiriço de resíduos perigosos, incluindo parte dos resíduos eletrônicos. A legislação em torno dos resíduos tem como objetivo primordial o desenvolvimento de sistemas eficientes, sustentáveis e seguros de coleta, reciclagem e gestão de REEE. A Convenção de Basileia, por sua vez, visa regulamentar o trânsito de resíduos considerados prejudiciais ao meio ambiente e à sociedade, o que inclui certos REEE (Baldé *et al.*, 2017; Kumar; Holuszko; Espinosa, 2017; Forti *et al.*, 2020; Basel Convention, 2021).

No entanto, a ausência de consenso global sobre a definição precisa de resíduos eletrônicos e as complexidades das exportações e importações de equipamentos usados, destinados à reutilização, continuam a obscurecer, em grande medida, o tráfego transfronteiriço de resíduos perigosos. Esforços têm sido feitos por meio de conferências entre as nações para resolver essa questão. A eficácia da legislação sobre REEE depende da sua implementação e aplicação rigorosa. Portanto, o desenvolvimento de políticas de REEE em nível nacional, regional e local deve ser direcionado a medidas alinhadas com os princípios da economia circular. Isso significa que a gestão de REEE não deve se limitar apenas à coleta e reciclagem, mas também deve contemplar o redesenho de produtos, tornando-os mais duráveis, sustentáveis e facilmente recicláveis (Baldé *et al.*, 2017; Forti *et al.*, 2020).

As legislações mais avançadas em relação à gestão de REEE estão em vigor na Europa, onde essa questão é incorporada em uma estratégia de economia circular. Em países da América do Norte e da Ásia Oriental e do Sul também têm avançado nesse sentido. No entanto, muitos países da África, Ásia Central, Caribe e Polinésia carecem de legislação nacional sobre REEE. Mesmo nos países da União Europeia, onde foi estabelecida uma meta de reciclagem de 65% dos Equipamentos Eletroeletrônicos (EEE) colocados no mercado, ainda existem disparidades significativas na aplicação dessa legislação, com taxas de reciclagem variando de 12% em Malta a 82% na Estônia (Baldé *et al.*, 2017; Forti *et al.*, 2020).

A maioria das legislações nacionais baseia-se no princípio da Responsabilidade Ampliada do Produtor (RAP), no qual os fabricantes e importadores são responsáveis por todo o ciclo de vida do produto, incluindo sua gestão no final de sua vida útil. Outro modelo de responsabilidade é a Responsabilidade Compartilhada (RC), na qual diferentes partes envolvidas, como produtores, importadores, distribuidores, governos e consumidores, compartilham diferentes níveis de responsabilidade (Xavier; Ottoni; Lepawsky, 2021).

Vários países demonstram abordagens eficazes na legislação de REEE. O Japão, por exemplo, é reconhecido por sua implementação da Responsabilidade Ampliada do Produtor, alinhada aos princípios da economia circular, promovendo as 3Rs: redução, reutilização e reciclagem (Forti *et al.*, 2020).

A União Europeia adotou medidas abrangentes relacionadas ao uso sustentável de recursos naturais e à gestão de resíduos, incluindo legislação sobre o uso de recursos, *ecodesign* de produtos, sistemas de produção mais limpa, reutilização de materiais secundários e reciclagem de resíduos (Milios, 2018).

Nos Estados Unidos, embora não haja legislação nacional específica para a gestão de REEE, 25 estados têm suas próprias leis que regulam, em certa medida, o gerenciamento desse tipo de resíduo, cobrindo grande parte da população do país. No nível federal, o governo adota políticas regulatórias que determinam o gerenciamento de resíduos para categorias específicas de EEE (Forti *et al.*, 2020).

A China, por sua vez, fortaleceu seu arcabouço legal para a gestão de REEE desde os anos 2000, adotando a Lei de Promoção da Economia Circular em 2008 como sua estratégia nacional de desenvolvimento sustentável (Guo *et al.*, 2017; Mcdowall *et al.*, 2017; Zhu *et al.*, 2019; Fan; Fang, 2020). Em 2011, introduziu o Regulamento de Gerenciamento de Reciclagem de REEE e, em 2012, adotou a estratégia da Responsabilidade Ampliada do Produtor, além de promover o uso de materiais secundários em novos produtos (Patil; Ramakrishna, 2020). O

governo chinês também estabeleceu fundos para subsidiar a implementação de recicladores formais e qualificados em redes de reciclagem autossuficientes em nível provincial (Tong, *et al.*, 2018; Zhao; Bai, 2021).

Na Índia, regulamentações para a gestão de REEE foram instituídas em 2011, empregando o princípio da Responsabilidade Ampliada do Produtor. No entanto, o país enfrentou o desafio de formalizar a gestão de REEE, que, em grande parte, era conduzida pelo setor informal. Estima-se que 90% dos REEE são processados pelo setor informal na Índia (Turaga *et al.*, 2019).

O Brasil, como um dos maiores produtores de EEE e o quinto maior gerador de REEE, instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) em 2010, por meio da Lei 12.305, que trata, entre outros aspectos, da Responsabilidade Compartilhada para EEE e um sistema obrigatório de logística reversa para esses produtos e seus componentes (Brasil, 2010). A PNRS estabelece a responsabilidade compartilhada ao longo do ciclo de vida dos produtos, envolvendo ações coordenadas entre produtores, comerciantes, importadores, distribuidores, consumidores e responsáveis pelos serviços de limpeza e gestão de resíduos sólidos, com o objetivo de reduzir o volume de resíduos gerados e minimizar seus impactos na saúde pública e na qualidade do meio ambiente (Brasil, 2010).

Em 2019, o Acordo Setorial para a Implementação do Sistema de Logística Reversa de Aparelhos Eletrodomésticos e seus Componentes foi assinado pelo governo federal, produtores, distribuidores e pelo Gerenciador Nacional para Resíduos de Equipamentos Eletroeletrônicos - Green Eletron (Brasil, 2019).

Em 2020, inspirado pelo Acordo Setorial, o Decreto 10.240 foi emitido, regulamentando a implementação do sistema de logística reversa de aparelhos eletroeletrônicos domésticos e seus componentes em nível nacional. O decreto estabelece a estruturação, implementação e operação de sistemas de logística reversa para 215 EEE no país, apresentando metas e prazos legalmente exigidos, além de definir as responsabilidades das partes envolvidas (Brasil, 2020). No Brasil, assim como em outros países em desenvolvimento, a coleta realizada pelo setor informal (por exemplo, pessoas sem licença comercial) tem sido reconhecida como importante na configuração da logística reversa em diversos setores, incluindo REEE.

A nível regional, o estado de São Paulo atualizou seu Plano Estadual de Resíduos Sólidos em 2020, mantendo seu compromisso com a logística reversa de REEE. Isso inclui condições para a concessão de licenças ambientais aos produtores de EEE para implementar sistemas de logística reversa. A cidade de São Paulo, um dos maiores geradores de REEE,

estabeleceu, em 2020, por meio da Lei 17.471, a logística reversa obrigatória para REEE por produtores, importadores, distribuidores e comerciantes, proporcionalmente aos produtos comercializados no município e com recursos próprios. Ao mesmo tempo, foram iniciadas campanhas para conscientizar a população. A lei estabelece a meta de recuperar 35% dos resíduos eletrônicos até o final de 2024, com base no volume colocado no mercado em 2023 (Legislação Municipal, 2020).

O Brasil, assim como outros países em desenvolvimento, tem reconhecido a importância da coleta realizada pelo setor informal, como coletores sem licença comercial, na configuração da logística reversa em vários setores, incluindo REEE.

Esses exemplos destacam a evolução da legislação relacionada aos REEE ao longo do tempo, com foco na prevenção, reutilização, remanufatura e reciclagem, garantindo padrões seguros e saudáveis tanto para a população quanto para o meio ambiente. A gestão de REEE, como estratégia de implementação da economia circular, está intimamente relacionada a conceitos fundamentais para a sustentabilidade da cadeia de produção e o ciclo de vida dos produtos, como ecodesign, produção mais limpa e logística reversa.

2.3 Estratégias Integradas para Sustentabilidade na Gestão de Resíduos de Equipamentos

Eletrônicos

O conceito de *ecodesign* tem ganhado destaque em setores econômicos onde produtos têm ciclos de vida curtos e seus componentes podem representar riscos ao meio ambiente e à saúde humana, como é o caso do setor de Equipamentos Eletrônicos (EEE) (Micheaux; Aggeri, 2021). O *design* de produtos no setor de EEE é particularmente complexo, envolvendo até 69 elementos da tabela periódica, incluindo metais preciosos, materiais críticos e não críticos. Isso cria desafios significativos para a reciclagem de resíduos de EEE, seja devido à ampla utilização desses materiais ou à falta de projetos que facilitem o desmantelamento, reutilização e reciclagem (Forti *et al.*, 2020).

O *ecodesign* vai além de identificar e mitigar impactos ambientais, incorporando princípios da economia circular. Esses princípios englobam a utilização de materiais reciclados e ecológicos, a redução do número de componentes e plásticos, o aumento da eficiência energética, a extensão da vida útil dos produtos, a facilitação de reparos, o *design* para desmontagem e reciclagem, a eliminação de materiais perigosos e processos de produção mais limpos e sustentáveis (Gu *et al.*, 2017; Kapuran, 2018; Forti *et al.*, 2020; Micheaux; Aggeri, 2021; Ellen Macarthur Foundation, 2021).

A União Europeia, por exemplo, introduziu diretrizes desde 2005 que regulamentam o *ecodesign* de produtos consumidores de energia, incluindo vários tipos de EEE, visando melhorar seu desempenho ambiental (European Commission, 2021). Os benefícios do *ecodesign* são evidentes na redução do consumo de matérias-primas e energia na produção de produtos, na otimização dos custos, na melhoria das tecnologias de produção, na diferenciação no mercado e na conformidade com regulamentações e certificações ambientais (Kapuran, 2018).

Autores e organizações estão adotando abordagens de *ecodesign* para criar produtos com *design* circular, que consideram a reintegração de resíduos na cadeia de suprimentos em vez de seu descarte (Ellen Macarthur Foundation, 2021).

Paralelamente, a produção mais limpa visa otimizar os processos produtivos, eliminando desperdícios e reduzindo custos. A ação preventiva na produção busca eliminar qualquer forma de desperdício, reduzindo o consumo de matérias-primas e minimizando o impacto ambiental. O princípio fundamental da produção mais limpa é eliminar o desperdício durante o processo produtivo, em vez de lidar com ele após a produção. A produção mais limpa envolve o uso de tecnologias que maximizam a eficiência dos processos de produção, gerando produtos duráveis, passíveis de reparação e reciclagem com o menor impacto ambiental possível. A redução de desperdícios e a reutilização de materiais são partes essenciais desse processo (Alves; Oliveira, 2007; Silva; Weins; Potinkara, 2019; Hens *et al.*, 2018).

Rajput e Singh (2020) e Shayganmehr *et al.* (2021) destacaram a necessidade de empresas adotarem processos de produção inteligentes, com alta qualidade e baixo custo para se manterem competitivas em mercados globalizados. O conceito de Indústria 4.0, que utiliza tecnologias como *Big Data* e Internet das Coisas (*IoT*) para a transformação digital da cadeia de produção, tem se mostrado fundamental nesse contexto. A integração de processos de produção mais limpa e economia circular com a Indústria 4.0 possibilita uma produção mais eficiente, com menor consumo de recursos e menor impacto ambiental (Shayganmehr *et al.*, 2021).

No entanto, para que os ciclos de economia circular sejam efetivos, é necessário contar com sistemas de logística reversa para a coleta e reciclagem de produtos no final de sua vida útil. A logística reversa envolve a atuação de diversos atores, como coletores, transportadores e recicladores, em infraestruturas de coleta, reciclagem, reparo, remanufatura e descarte. O objetivo é reduzir, reutilizar e reciclar materiais, alinhando-se com os princípios da gestão de resíduos. No entanto, sistemas de logística reversa e economia circular requerem soluções em

redes de ciclo fechado, viabilidade econômica de pontos de coleta e reciclagem, formação de um mercado secundário, serviços pós-venda, técnicas de recuperação de materiais, mão de obra qualificada e projetos ambientalmente seguros (Islam; Huda, 2018; Silva; Weins; Potinkara, 2019; Isernia *et al.*, 2019).

O crescimento exponencial na quantidade de resíduos de EEE, que podem conter substâncias perigosas e valiosas, levou governos nacionais e regionais a implementarem políticas de responsabilidade na gestão desses resíduos. A Responsabilidade Estendida do Produtor e a Responsabilidade Compartilhada são exemplos de políticas que empregam sistemas de logística reversa para EEE no final de seu ciclo de vida, proporcionando oportunidades para a reciclagem e reutilização de materiais de REEE na cadeia de produção, reduzindo a exploração de recursos naturais (Islam; Huda, 2018).

Isernia *et al.* (2019) observaram que os objetivos dos sistemas de logística reversa são altamente congruentes com os objetivos e características dos sistemas de economia circular. Ambos visam ao desenvolvimento socioeconômico sustentável e têm aspectos econômicos que incluem o cuidado com o meio ambiente e a gestão de resíduos com objetivos de ciclos de reparo, reutilização, reciclagem e descarte adequado.

Nesse contexto, pode-se observar que países desenvolvidos, como os países da União Europeia, e países em desenvolvimento, como China, Índia e Brasil, começaram a implementar regulamentações nacionais e regionais para sistemas de logística reversa com foco na reciclagem de materiais, avançando posteriormente para legislações que se concentram no *design* de produtos, regulando o uso de substâncias perigosas em novos EEE colocados no mercado, avançando para estágios mais avançados de sistemas de produção circular (Neto *et al.*, 2023)..

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

A metodologia adotada neste estudo segue uma abordagem qualitativa, respaldada por referências nesse campo da pesquisa, como Denzin e Lincoln (2005) e Creswell *et al.* (2013). Essa abordagem busca compreender e interpretar fenômenos complexos, permitindo uma análise aprofundada das questões em foco.

A pesquisa é conduzida com base em uma revisão bibliográfica, que se apoia nas contribuições de autores na área de pesquisa bibliográfica, como Fink (2019) e Booth *et al.* (2016). Além disso, incorpora a pesquisa documental, utilizando fontes para a investigação, de acordo com as diretrizes estabelecidas por Silva e Menezes (2005).

Para garantir a transparência da revisão bibliográfica, este estudo segue as diretrizes do Protocolo Prisma (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses), uma abordagem bem reconhecida na condução de revisões sistemáticas (Liberati *et al.*, 2009). O Protocolo Prisma proporciona um rigoroso processo de seleção, análise e síntese de evidências disponíveis na literatura, garantindo um método sólido para a realização desta revisão (Moher *et al.*, 2015).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os achados desta pesquisa apontam que a industrialização, o aumento dos níveis de renda da população e o crescimento da urbanização estão diretamente ligados ao aumento do consumo de dispositivos eletroeletrônicos. Isso, por sua vez, está associado aos curtos períodos de vida desses dispositivos, assim como às dificuldades enfrentadas em relação à reciclagem e à infraestrutura física e legal. Como consequência desse cenário complexo, há uma notável expansão na produção de Resíduos de Equipamentos Eletroeletrônicos (REEE).

A gestão eficiente dos Resíduos de Equipamentos Eletroeletrônicos, que reduz a geração, reutiliza e recicla resíduos, contribui para alcançar os objetivos da Agenda 21 e os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Agenda 2030. A questão dos resíduos eletrônicos está relacionada a vários ODS (11, 8, 6 e 3) e, em particular, ao ODS 12 (Produção e Consumo Responsáveis), que destaca no objetivo 12.5 a redução da geração de resíduos, prevenção, redução, reciclagem e reutilização de materiais. Enquanto o alvo 12.4 enfatiza a gestão adequada de resíduos, especialmente os químicos e perigosos (Eletron, 2021).

A Agenda 21 tem como objetivo fomentar o desenvolvimento social e sustentável das nações. O progresso sustentável é, igualmente, moldado pela qualidade dos processos e resultados que decorrem do aprendizado coletivo da sociedade. Conforme expresso por Xavier; Ottoni; Lepawsky, (2019, p. 7), trata-se da "aprendizagem colaborativa e conjunta entre diversas partes interessadas, que, por meio da interação, amplia sua capacidade de empreender ações conjuntas relacionadas a questões ambientais e fortalecer o capital social."

A incorporação dos princípios de sustentabilidade e economia circular na administração dos Resíduos de Equipamentos Eletroeletrônicos (REEE) abre um horizonte para a preservação dos recursos naturais, a valorização de materiais secundários e a minimização dos impactos ambientais e sociais. Entretanto, é imperativo manter vigilância constante e aprimorar a gestão dos materiais secundários, especialmente aqueles de natureza tóxica e perigosa, priorizando a substituição por alternativas mais sustentáveis onde ressaltam a importância de reduzir a

quantidade de REEE e estender sua vida útil. Eles argumentam que investimentos em pesquisa são essenciais para reduzir o uso de substâncias prejudiciais ao ambiente, promover o ecodesign e estimular a adoção de práticas de reciclagem de materiais e métodos de produção mais sustentáveis. (Gu *et al.*, 2017; Islam; Huda, 2018; Silva; Weins; Potinkara, 2019).

Andersen (2022) demonstrou que as cadeias de suprimentos, produção e logística de EEE, que permanecem subutilizadas, estão se tornando mais digitalizadas e podem ser usadas para avançar na circularidade dos processos. Silva, Weins e Potinkara, (2019, p. 164) concluiu que a transição para a economia circular depende de "[...] uma estrutura produtiva que interconecta cadeias de produção e que um novo modelo seja criado com base na mudança de hábitos de consumo, sistemas de produção e relacionamentos institucionais."

Baldé *et al.* (2017) e Forti *et al.* (2020) argumentaram que a maioria da legislação se concentra na coleta e reciclagem, enquanto regulamentações para reduzir resíduos eletrônicos por meio do reparo e reutilização de equipamentos são limitadas a alguns experimentos. Os autores alertaram que as regulamentações e legislações atuais não acabaram com os movimentos transfronteiriços de resíduos eletrônicos tóxicos e perigosos. Porcentagens significativas de REEE continuam a ser descartadas em países em desenvolvimento, seja por meio da exportação de equipamentos usados ou comércio ilegal, onde cerca de 15% dos EEE usados da União Europeia são exportados para fora do bloco.

Tong *et al.* (2018) e Andersen (2022) defenderam a harmonização das partes e da legislação de REEE. Os EEE são produzidos por grandes fabricantes globais, enquanto a legislação é elaborada em nível nacional. A Responsabilidade Ampliada do Produtor, que utiliza organizações de gestão de resíduos, continua focada em metas de reciclagem, libertando os fabricantes de sua responsabilidade primordial de reduzir, reutilizar e reciclar materiais. Baldé *et al.* (2017) e Forti *et al.* (2020) mostraram que a responsabilidade nos países em desenvolvimento enfrenta problemas adicionais de implementação devido à falta de infraestrutura para coleta e tratamento de resíduos eletrônicos e à falta de conformidade com padrões internacionais. As esferas do governo podem apoiar e facilitar os investimentos necessários em infraestrutura para coleta e reciclagem, promover visões de mercado alinhadas com a economia circular e incentivar o uso de coletores e recicladores locais. Tong *et al.* (2018) destacaram que a regulamentação da responsabilidade do produtor desencadeia a formação de novos nichos de mercado para a reciclagem de REEE, criando oportunidades de geração de renda, formalização do setor informal e inclusão social.

Atividades informais são observadas na cadeia de valor de REEE na maioria dos países, especialmente nos países em desenvolvimento. Na Índia, estima-se que 95% dos resíduos reciclados sejam coletados pelo setor informal (Arya; Kumar, 2020). Na China, estima-se que aproximadamente 18 milhões de indivíduos estejam engajados em atividades informais de gestão de resíduos, conforme apontado por Steuer *et al.* (2018). Já no Brasil, o Movimento Nacional dos Catadores de Materiais Recicláveis (MNCR, 2021), que representa 1.829 organizações de catadores de materiais, incluindo cooperativas e associações, estima que atualmente existam cerca de 800.000 catadores ativos no país. De acordo com as investigações de Arya e Kumar (2020) e Abalansa *et al.* (2021), essa prática é uma tradição de longa data, proporcionando meios de subsistência para inúmeras pessoas e impulsionando o mercado de reciclagem. Isso, por sua vez, levou ao seu reconhecimento oficial e à implementação de medidas destinadas a integrar o setor informal de coleta ao setor formal de reciclagem em diversas nações, incluindo a Índia e o Brasil. Como observado por Arya e Kumar (2020, p. 16), "o maior desafio reside na garantia de um processo de reciclagem seguro e sustentável".

A eficácia da legislação e dos planos nacionais de gestão de REEE também dependerá da clara atribuição de responsabilidades a todas as partes envolvidas na sociedade. Nos sistemas de gestão de REEE, as responsabilidades, estruturas e processos devem ser transparentes, economicamente viáveis, socialmente inclusivos e ambientalmente adequados. Parcerias e cooperação técnica são necessárias entre governos, produtores, importadores e distribuidores, e órgãos reguladores nacionais e internacionais precisam trabalhar juntos para melhorar os sistemas de gestão de resíduos e reduzir a quantidade de REEE (Kumar; Holuszko; Espinosa, 2017; Forti *et al.*, 2020).

Gollakota, Gautam e Shu (2020) enfatizaram a necessidade urgente de adotar estratégias nacionais e locais de gestão de REEE. Os autores listaram dez questões centrais que comprometem a gestão eficaz de resíduos eletrônicos e apontaram intervenções urgentes, especialmente em países em desenvolvimento: (i) integração dos setores formal e informal; (ii) registro de redes formalizadas; (iii) aplicação de leis rigorosas; (iv) movimentos transfronteiriços regulamentados; (v) responsabilidade do produtor; (vi) conscientização do consumidor; (vii) melhoria de projetos de *ecodesign*; (viii) investimentos em centros de reciclagem; (ix) melhoria das instalações de descarte e (x) substituição de técnicas tradicionais por tecnologias sustentáveis integradas em sistemas interconectados.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo demonstrou a complexidade da questão dos Resíduos de Equipamentos Eletroeletrônicos (REEE), ressaltando sua relevância que abarca tanto o meio ambiente quanto a sociedade em sua totalidade. Conforme analisado ao longo deste trabalho, o desenvolvimento econômico, a urbanização e os padrões de consumo desempenham papéis cruciais na geração de REEE, trazendo a necessidade de estratégias abrangentes e coordenadas para enfrentar esse desafio global.

Neste contexto, fica evidente a importância da melhoria das políticas de gestão de REEE, indo além da simples coleta e reciclagem. É imperativo priorizar a redução da geração de resíduos desde a etapa de projeto, incentivando o *ecodesign* e promovendo a extensão da vida útil dos produtos eletrônicos. Essas medidas podem resultar em um impacto significativo na redução do descarte prematuro e no aproveitamento máximo dos recursos.

A integração do setor informal na gestão de REEE, como evidenciado em países como Índia e Brasil, representa uma estratégia eficaz para aumentar a reciclagem e criar oportunidades de renda para comunidades marginalizadas. No entanto, essa integração deve ser acompanhada por regulamentações que garantam a segurança dos trabalhadores informais e promovam boas práticas ambientais.

Além disso, é essencial destacar a necessidade de uma colaboração abrangente entre diversos atores, incluindo governos, indústrias e a sociedade civil. A implementação de sistemas de responsabilidade estendida do produtor (REP) pode responsabilizar os fabricantes pela gestão adequada dos produtos eletrônicos ao final de sua vida útil. Parcerias público-privadas também desempenham um papel crucial no investimento em infraestrutura de reciclagem e na criação de sistemas de coleta eficazes.

A conscientização pública e a educação desempenham um papel fundamental na mudança de comportamento em relação ao consumo de produtos eletrônicos, a compreensão dos impactos do descarte inadequado e ser incentivada a adotar práticas de consumo responsável.

É crucial reconhecer que, embora os desafios relacionados aos REEE sejam globais, as soluções frequentemente devem ser adaptadas às realidades locais. Cada país possui suas próprias particularidades em termos de consumo, infraestrutura e regulamentação, exigindo abordagens flexíveis e adaptáveis.

Os Resíduos de Equipamentos Eletroeletrônicos, representam um desafio multifacetado que demanda ações coordenadas em várias frentes. A promoção do *ecodesign*, a extensão da

vida útil dos produtos, a integração do setor informal, a colaboração entre diferentes atores e a conscientização pública são elementos essenciais para avançar em direção a uma gestão mais sustentável dos REEE. A busca contínua por soluções é fundamental, visando a um equilíbrio entre as necessidades econômicas e ambientais para construir um futuro verdadeiramente sustentável.

REFERÊNCIAS

ABALANSA, S. *et al.* Electronic waste, an environmental problem exported to developing countries: The GOOD, the BAD and the UGLY. **Sustainability**, v. 13, n. 9, p. 5302, 2021.

ALVES, S. M.; OLIVEIRA, J. F. G. DE. Adequação ambiental dos processos usinagem utilizando Produção mais Limpa como estratégia de gestão ambiental. **Production**, v. 17, n. 1, p. 129–138, 2007.

ANDERSEN, T. A comparative study of national variations of the European WEEE directive: manufacturer's view. **Environmental science and pollution research international**, v. 29, n. 14, p. 19920–19939, 2022.

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

BALDÉ, C. P. *et al.* **Copyright and Publication Information Contact information:** For inquiries please contact the corresponding. Disponível em: https://collections.unu.edu/eserv/UNU:6341/Global-E-waste_Monitor_2017__electronic_single_pages_.pdf. Acesso em: 20 mai. 2024.

BASEL CONVENTION. Basel Convention home page. Disponível em: <https://www.basel.int/the-convention/status-of-ratifications/?type=status&what=status-party>. Acesso em: 20 mai. 2024.

BHATTACHARJEE, P. *et al.* Critical success factors for circular economy in the waste electrical and electronic equipment sector in an emerging economy: Implications for stakeholders. **Journal of Cleaner Production**, v. 401, p. 136767, 2023.

BOATENG, G. O.; ADAMS, E. A. A multilevel, multidimensional scale for measuring housing insecurity in slums and informal settlements. **Cities**, v. 132, p. 104059, 2023.

BOOTH, A. O. *et al.* Development and evaluation of a computer-based, self-management tool for people recently diagnosed with type 2 diabetes. **Journal Of Diabetes Research**, v. 2016, p. 11, 2016.

BRASIL. **Acordo Setorial para a Implementação do Sistema de Logística Reversa de Aparelhos Eletrodomésticos e seus Componentes**. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 2019.

_____. **Decreto nº 10.240, de 12 de fevereiro de 2020.** Regulamenta a Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, e o art. 8º da Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 2020.

_____. **Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010.** Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 2010.

CASTRO, F. D. *et al.* E-waste policies and implementation: a global perspective. In: Waste management and resource recycling in the developing world. **Elsevier**, 2023. p. 271-307.

CASTRO, F. J. *et al.* E-waste generation and sustainable management: A global scenario with particular emphasis on India. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 27, n. 30, p. 37936-37952, 2020.

CRESWELL, J. W.; CLARK, V. L. **Plano. Pesquisa de métodos mistos.** 2. ed. Porto Alegre: Penso, 2013.

DE CARVALHO, A. S. *et al.* Comportamento para a sustentabilidade. **Seven Editora**, 2023.

DE OLIVEIRA NETO, J. F. *et al.* Waste of electrical and electronic equipment management from the perspective of a circular economy: A Review. **Waste Management & Research**, v. 41, n. 4, p. 760-780, 2023.

DENZIN, N.K.; LINCOLN, Y.S. **Handbook of qualitative research** Thousand Oaks: Sage, 2005.

ELETRON, G. **Quais países produzem mais lixo eletrônico no mundo? Veja como está o Brasil neste ranking.** (2021). Disponível em: <https://greeneletron.org.br/blog/tag/the-global-e-waste-monitor/>. Acesso em: 30 set. 2023.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. **Signatory reports 2021 Global Commitment report on plastic packaging.** Disponível em: <https://ellenmacarthurfoundation.org/global-commitment-2021/signatory-reports>> Acesso em: 30 set. 2023.

EUROPEAN COMMISSION. **Sustainable product policy & eco-design.** Disponível em: https://single-market-economy.ec.europa.eu/system/files/2023-04/SWD_2023_114_1_EN_impact_assessment_part1_v4.pdf. Acesso em: 30 set. 2023.

FAN, Y.; FANG, C. Circular economy development in China-current situation, evaluation and policy implications. **Environmental impact assessment review**, v. 84, n. 106441, p. 106441, 2020.

FINK, A. G. **Conducting research literature reviews:** From the internet to paper. 5. ed. Thousand Oaks, CA, USA: SAGE Publications, 2019.

FORTI, V.; BALDÉ, C. P.; KUEHR, R.; BEL, G. **The Global E-Waste Monitor 2020:** Quantities, flows and the circular economy potential. United Nations University (UNU)/United Nations Institute for Training and Research (UNITAR) – co-hosted SCYCLE Programme, International Telecommunication Union, 2020.

FRAIGE, F. Y.; AL-KHATIB, L. A.; AL-SHAWEESH, M. A. Predicting WEEE generation rates in Jordan using population balance model. **Sustainability**, v. 15, n. 3, p. 2845, 2023.

GHULAM, S. T.; ABUSHAMMALA, H. Challenges and opportunities in the management of electronic waste and its impact on human health and environment. **Sustainability**, v. 15, n. 3, p. 1837, 2023.

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

GU, F. *et al.* Internet of things and Big Data as potential solutions to the problems in waste electrical and electronic equipment management: an exploratory study. **Waste Management**, v. 68, p. 434-448, 2017.

GUO, B. *et al.* Investigating public awareness on circular economy in western China: A case of Urumqi Midong. **Journal of cleaner production**, v. 142, p. 2177–2186, 2017.

HE, W. *et al.* A review of e-waste management in China. **Journal of Environmental Management**, v. 182, p. 399-407, 2016.

HENS, L. *et al.* On the evolution of “Cleaner Production” as a concept and a practice. **Journal of Cleaner Production**, v. 172, p. 3323-3333, 2018.

ISERNIA, R. *et al.* The reverse supply chain of the e- waste management processes in a circular economy framework: evidence from Italy. **Sustainability**, v. 11, n. 8, 2430, 2019.

ISLAM, M. T.; HUDA, N. Reverse logistics and closed-loop supply chain of Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE)/E-waste: A comprehensive literature review. **Resources, conservation, and recycling**, v. 137, p. 48–75, 2018.

JAIN, M. *et al.* Review on E-waste management and its impact on the environment and society. **Waste Management Bulletin**, 2023.

KAPURAN, G. A. Ecodesign in electrical and electronic products. **Tehnika**, v. 73, n. 2, p. 285, 2018.

KUMAR, A.; HOLUSZKO, M. E.; ESPINOSA, D. C. R. E-waste scenario in India, its management and implications. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 189, n. 7, p. 318, 2017.

LEGISLAÇÃO MUNICIPAL - **Catálogo de Legislação Municipal**. Disponível em: <https://legislacao.prefeitura.sp.gov.br/leis/lei-17471-de-30-de-setembro-de-2020/detalhe>. Acesso em: 30 set. 2023.

LIBERATI, A. *et al.* The PRISMA Statement for Reporting Systematic Reviews and Meta-Analyses of Studies That Evaluate Health Care Interventions: Explanation and Elaboration. **The BMJ**, 2009.

LIU, K. *et al.* A global perspective on e-waste recycling. **Circular Economy**, v. 2, n. 1, p. 100028, 2023.

MCDOWALL, W. *et al.* Circular economy policies in China and Europe. **Journal of Industrial Ecology**, v. 21, n. 3, p. 651-661, 2017.

MICHEAUX, H.; AGGERI, F. Eco-modulation as a driver for eco-design: A dynamic view of the French collective EPR scheme. **Journal of cleaner production**, v. 289, n. 125714, p. 125714, 2021.

MILIOS, L. Advancing to a Circular Economy: three essential ingredients for a comprehensive policy mix. **Sustainability Science**, v. 13, n. 3, p. 861-878, 2018.

MNCR. Disponível em: <https://www.mnccr.org.br/>. Acesso em: 20 maio 2024.

MOHER, D.; LIBERATI, A.; TETZLAFF, J.; ALTMAN, D. G. The PRISMA Group. Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses: the PRISMA statement. **Annals of Internal Medicine**, v. 24, n. 2, p. 355-342, 2015.

NETO, G. C. O. *et al.* Reverse chain for electronic waste to promote circular economy in Brazil: a survey on electronics manufacturers and importers. **Sustainability**, v. 15, n. 5, p. 4135, 2023.

PANSINI, R.; GORRASI, G.; VITTORIA, V. Electronic waste generation and management in India: A review. **Environmental Research Letters**, v. 14, n. 8, 083003, 2019.

PATIL, R. A.; RAMAKRISHNA, S. A comprehensive analysis of e-waste legislation worldwide. **Environmental science and pollution research international**, v. 27, n. 13, p. 14412–14431, 2020.

RAJPUT, S.; SINGH, S. P. Industry 4.0 model for circular economy and cleaner production. **Journal of Cleaner Production**, v. 277, 123853, 2020.

SAMPAIO, A. P. C. *et al.* Ecodesign of bio-based films for food packaging: Challenges and recommendations. **Environmental Development**, p. 100926, 2023.

SCHROEDER, P. *et al.* The Circular and Green Economy and the Inclusive Development of Electronic Repurposing and Recycling in China. **Sustainability**, v. 11, n. 11, p. 3071, 2019.

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**, v. 20, n. 4, p. 4513-4520, 2023.

SHAYGANMEHR, M. *et al.* Industry 4.0 enablers for a cleaner production and circular economy within the context of business ethics: a study in a developing country. **Journal of Cleaner Production**, v. 281, 125280, 2021.

SILVA, C. L.; WEINS, N.; POTINKARA, M. Formalizing the informal? A perspective on informal waste management in the BRICS through the lens of institutional economics. **Waste management (New York, N.Y.)**, v. 99, p. 79–89, 2019.

SILVA, E. L.; MENEZES, E. M. **Metodologia da pesquisa e elaboração de dissertação**. Florianópolis: UFSC, 2005.

SINGH, R. K.; KUMAR, A. Electronic waste and its impact on the environment. **In: Handbook of Environmental Materials Management**. Springer, 2018. p. 1-17.

STEUER, B. *et al.* Is there a future for the informal recycling sector in urban China? **Detritus**, 4, p. 189-200, 2018.

TIAN, R. *et al.* Socio-economic correlation analysis and hybrid artificial neural network model development for provincial waste electrical and electronic equipment generation forecasting in China. **Journal of Cleaner Production**, v. 418, p. 138076, 2023.

TURAGA, R. M. R. *et al.* E-waste management in India: Issues and strategies. **Vikalpa The Journal for Decision Makers**, v. 44, n. 3, p. 127–162, 2019.

WANG, Y.; XU, X.; GUO, X. Analysis of the causes and countermeasures of electronic waste pollution in China. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, v. 225, n. 1, p. 012189, 2019.

WIDMER, R. *et al.* Global perspectives on e-waste. **Environmental Impact Assessment Review**, v. 25, n. 5, p. 436-458, 2005.

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, n. 126570, p. 126570, 2021.

YANG, X. *et al.* Towards holistic governance of China's E-waste recycling: Evolution of networked policies. *International journal of environmental research and public health*, v. 17, n. 20, p. 7407, 2020.

ZHAO, X.; BAI, X. How to motivate the producers' green innovation in WEEE recycling in China? – An analysis based on evolutionary game theory. **Waste management (New York, N.Y.)**, v. 122, p. 26–35, 2021.

ZHU, J. *et al.* Efforts for a circular economy in China: A comprehensive review of policies. **Journal of industrial ecology**, v. 23, n. 1, p. 110–118, 2019.

"O conteúdo expresso no trabalho é de inteira responsabilidade do(s) autor(es)."