



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
Instituto de Ciência e Tecnologia
Câmpus de Sorocaba

GUSTAVO NOGUEIRA PAREJA GALVES

**ESTUDO SOBRE ASPECTOS DA GERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS
ELETROELETRÔNICOS, SUAS PROPRIEDADES E PRÁTICAS DE GESTÃO
ADOTADAS: COMPARAÇÃO ENTRE AS REALIDADES DA ÍNDIA, ÁFRICA,
BRASIL E EUROPA**

Sorocaba

2025

GUSTAVO NOGUEIRA PAREJA GALVES

**ESTUDO SOBRE ASPECTOS DA GERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS
ELETROELETRÔNICOS, SUAS PROPRIEDADES E PRÁTICAS DE GESTÃO
ADOTADAS: COMPARAÇÃO ENTRE AS REALIDADES DA ÍNDIA, ÁFRICA,
BRASIL E EUROPA**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Universidade Estadual
Paulista (UNESP), Instituto de Ciência e
Tecnologia, Sorocaba, como parte dos
requisitos para obtenção do grau de
Bacharel em Engenharia Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Sandro Donnini
Mancini

Sorocaba/SP

2025

G182e	Galves, Gustavo Nogueira Pareja Estudo sobre aspectos da geração de resíduos sólidos eletroeletrônicos, suas propriedades e práticas de gestão adotadas : comparação entre as realidades da Índia, África, Brasil e Europa / Gustavo Nogueira Pareja Galves. -- Sorocaba, 2025 51 p. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Engenharia Ambiental) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Ciência e Tecnologia, Sorocaba Orientador: Sandro Donnini Mancini 1. Aparelhos e materiais eletrônicos. 2. Reaproveitamento (Sobras, refugos, etc.). 3. Logística Reversa. 4. Economia Circular. I. Título.
-------	--

GUSTAVO NOGUEIRA PAREJA GALVES

**ESTUDO SOBRE ASPECTOS DA GERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS
ELETROELETRÔNICOS, SUAS PROPRIEDADES E PRÁTICAS DE GESTÃO
ADOTADAS:**

Comparação entre as realidades da Índia, África, Brasil e Europa

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto de Ciência e Tecnologia de Sorocaba, Universidade Estadual Paulista (UNESP), como parte dos requisitos para obtenção do grau de Bacharel(a) em Engenharia Ambiental.

Data de aprovação: 04/11/2025

Trabalho aprovado por meio de parecer, homologado pelo Conselho de Curso em reunião de 4 de Novembro de 2025.

RESUMO

Os resíduos eletroeletrônicos são alvos de estudos principalmente nas duas últimas décadas, consequência da produção acelerada dos aparelhos eletroeletrônicos, evidenciando a problemática do desenvolvimento tecnológico, obsolescência programada, a necessidade de reaproveitamento dos materiais e sistemas de gerenciamento para o reaproveitamento de componentes com alto valor. A partir do desenvolvimento das convenções internacionais estabelecidas pela ONU e OCDE, diversos países passaram a adotar estratégias institucionais e diretivas para o desenvolvimento de sistemas de gestão para resíduos eletroeletrônicos. A União Europeia, que possui caráter vanguardista devido a instituições mais sólidas, estabeleceu as primeiras Diretivas referentes aos Princípios de Responsabilidade Estendida do Produtor (EPR), Economia Circular e Teorias Comportamentais. Esses sistemas de gestão para resíduos eletroeletrônicos passaram a reverberar nos demais países, expressando nos estudos apresentados o desenvolvimento de arcabouços jurídicos no Brasil, Índia e no continente Africano. Nos artigos selecionados são verificados os principais mecanismos institucionais, ações governamentais, mecanismos institucionais, ferramentas para triagem, desmontagem e reaproveitamento dos materiais além das tecnologias presentes nesses países e regiões. O trabalho busca a comparação entre todos esses elementos, evidenciando profundas desigualdades entre as diferentes nações e continentes, persistindo problemas sérios com relação ao trabalho informal e insalubre, além do descarte incorreto dos mais variados tipos de materiais presentes em celulares, notebooks, eletrodomésticos, entre outros.

Palavras-Chave: Gestão de resíduos eletroeletrônicos; Logística Reversa; Economia circular.

ABSTRACT

Electrical and electronic waste has been the subject of studies mainly in the last two decades, as a result of the accelerated production of electrical and electronic devices, highlighting the problems of technological development, programmed obsolescence, the need to reuse materials and management systems for the reuse of high-value components. Following the development of international conventions established by the UN and the OECD, several countries began to adopt institutional strategies and directives for the development of management systems for electronic waste. The European Union, which is at the forefront due to its more solid institutions, established the first directives on the principles of Extended Producer Responsibility (EPR), Circular Economy and Behavioral Theories. These management systems for electronic waste began to reverberate in other countries, and the studies presented show the development of legal frameworks in Brazil, India and the African continent. The selected articles look at the main institutional mechanisms, government actions, institutional mechanisms, tools for sorting, dismantling and reusing materials, as well as the technologies present in these countries and regions. The work seeks to compare all these elements, highlighting profound inequalities between different nations and continents, with serious problems persisting in relation to informal and unhealthy work, as well as the incorrect disposal of the most varied types of materials present in cell phones, notebooks, household appliances, among others.

Keywords: Management of electronic waste; Reverse Logistics; Circular economy.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Gráfico de distribuição da utilização de dispositivos digitais.	12
Figura 2	Gráfico de tendência para utilização de computadores.	12
Figura 3	Gráfico de metais mais citados.	14
Figura 4	Sistema de economia circular e gerenciamento de resíduo eletroeletrônicos.	16
Figura 5	Estrutura para resíduos eletroeletrônicos com abordagem de inteligência de máquina.	18
Figura 6	Estrutura para mudança comportamental e intervenções para concepções ambientais.	30
Figura 7	Visão de categoria métrica com relação à sustentabilidade de um telefone celular.	35
Figura 8	Metodologia utilizada para combinação e comparação dos estudos, publicados em 2018 e 2022.	40
Figura 9	Distribuição de recicladoras consultadas.	41
Figura 10	Toneladas mensais processadas por recicladoras confirmadas, junto às categorias de instalação.	42

LISTA DE QUADROS

Quadro 1	Quadro com práticas atuais, de curto, médio e longo prazo.	36
-----------------	--	----

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	8
1.1	Resíduos eletroeletrônicos	9
2	OBJETIVOS	10
2.1	Objetivos Específicos	10
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	11
3.1	Consumo e produção de aparelhos eletroeletrônicos	11
3.2	Gerenciamento de resíduos eletroeletrônicos	14
4	MATERIAIS E MÉTODOS	19
5	RESULTADOS	20
5.1	E-Waste Management in India: Issues and Strategies, India (2019)	20
5.2	Behavioral change for the circular economy: A review with focus on electronic waste management in the EU, Vienna (2020)	27
5.3	Electrical and Electronic Waste Management Problems in Africa: Deficits and Solution Approach, Austria (2023)	31
5.4	Electronic waste in Brazil: Generation, collection, recycling and the covid pandemic, Brazil (2022)	38
5.5	Discussão	44
6	CONCLUSÃO	46
	REFERÊNCIAS	47

1. INTRODUÇÃO

Apesar da contemporaneidade do assunto e das consequências que vivemos na atualidade, a humanidade sempre produziu resíduos sólidos ao longo de muitos anos da sua existência, principalmente com o fim da era nômade. O desenvolvimento das cidades, vilas e a formação das civilizações ao longo dos séculos trouxeram à tona a importância da elaboração de políticas sanitárias, em especial após a Primeira Revolução Industrial. Os resíduos se tornaram um dos temas de grande preocupação internacional e passaram a ser centrais são realizados grandes eventos tais como as conferências de Estocolmo, ECO-92 e Tbilisi (Deus; Batistelli; Martins, 2015).

Dentro desse contexto, a sociedade moderna busca criar inúmeras ferramentas jurídicas e institucionais, a nível local e global, para que seja possível amenizar o impacto socioambiental negativo. A necessidade de consumo induz o cidadão a gerar um volume de resíduos sólidos que torna a sua destinação cada vez mais desafiadora (Silva; Oliveira; Martins, 2002).

A junção do consumo somado aos grandes aglomerados populacionais acarreta problemas tais como poluição do ar por material particulado, poluição dos corpos hídricos ocasionado pelos líquidos provenientes dos resíduos sólidos urbanos sem devida disposição. Dentro desse contexto, a Organização das Nações Unidas definiu em 1992, em uma conferência sobre Meio Ambiente e o Desenvolvimento, diversas estratégias que os países devem adotar para realizarem boas práticas envolvendo a gestão dos resíduos sólidos (Russo, 2003).

Considerando também a produção dos resíduos perigosos e não perigosos no contexto da produção industrial, a preocupação que acaba vindo à tona é a quantidade desperdiçada e a ineficiência produtiva, com relação direta à matéria prima e insumos. É a partir dessa situação que surgem tanto os Estudos de Impacto Ambiental, quanto os Sistemas de Gestão Ambiental, numa tentativa de empregar melhores tecnologias nos sistemas de gerenciamento e buscar internalizar as práticas ambientais no que diz respeito à performance e ações integradas no sistema de gestão (Toschetto, 2005).

Nesse contexto, o presente trabalho busca trazer uma série de informações a respeito dos resíduos, onde as componentes dos computadores e de toda a infraestrutura cibernética também passam por inúmeros desafios.

1.1 Resíduos Eletroeletrônicos

Segundo Formetin e Santos (2013) e Contador (2022), lixo eletrônico ou resíduos eletroeletrônicos ou até resíduos de equipamentos eletroeletrônicos (REEE), são aparelhos tais como computadores, celulares, teclados de computadores, componentes dos mais diversos tipos de aparelhos eletrônicos. Nesses equipamentos existe uma grande diversidade de materiais.

A geração de equipamentos eletrônicos acompanha a rápida velocidade de inovação dos mais diversos dispositivos (tais como computadores, notebooks, celulares, aparelhos de ressonância médica e dispositivos utilizados nos mais diversos tipos de segmentos das indústrias modernas) e acaba se configurando enquanto um problema global (Silva; Oliveira; Martins, 2007). Isso acontece por conta da tendência global de digitalização dos diversos países ao redor do mundo, com acentuação do consumo desse tipo de tecnologia que se tornou inovação fundamental para melhoria na cadeia de suprimentos (Bernardo; Souza; Demajorovi, 2013).

No Brasil, em 2022, cerca de 2,1 mil toneladas desse tipo de resíduo foram descartadas, com aproximadamente 3% de reciclagem. Há dificuldade de se estabelecer uma economia circular, programas de logística reversa e outras soluções para a disposição final desse tipo de resíduo (Acosta; Padula; Wegner, 2008). Existem inúmeros problemas da gestão pública e privada em lidar com o desenvolvimento tecnológico e expectativa por produtos que possuem diversas componentes em um contexto em que a população é estimulada a troca contínua, descartando boa parte de maneira ilegal, acarretando impactos ambientais (Bernardo; Souza; Demajorovi, 2020).

Nesse sentido, é necessário que implementem medidas legislativas em conjunto com as partes interessadas (stakeholders), envolvendo toda a sociedade com modelos plausíveis de logística reversa e economia circular, conscientizando corporações e a população, com incentivos e determinações judiciais. No Brasil, em 2010, foi implementada a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), buscando envolver empresas produtoras, importadoras e reconhecendo a importância da população catadora dentro desse processo.

2. OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é discorrer de maneira geral sobre a geração de resíduos sólidos eletroeletrônicos, suas propriedades e os principais aspectos na sua gestão, avaliando as práticas adotadas para destinação mais correta.

2.1 Objetivos específicos

- Realizar um levantamento bibliográfico sobre o consumo de resíduos eletrônicos através de diferentes fontes de informação acadêmica e geral.
- Analisar e avaliar a gestão desse tipo de resíduo em um cenário mundial e os aspectos que envolvem a composição comparando com diversos direcionamentos adotados pelos países no mundo.
- Comparar as diferentes experiências no mundo no que diz respeito à reutilização e o seu descarte.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

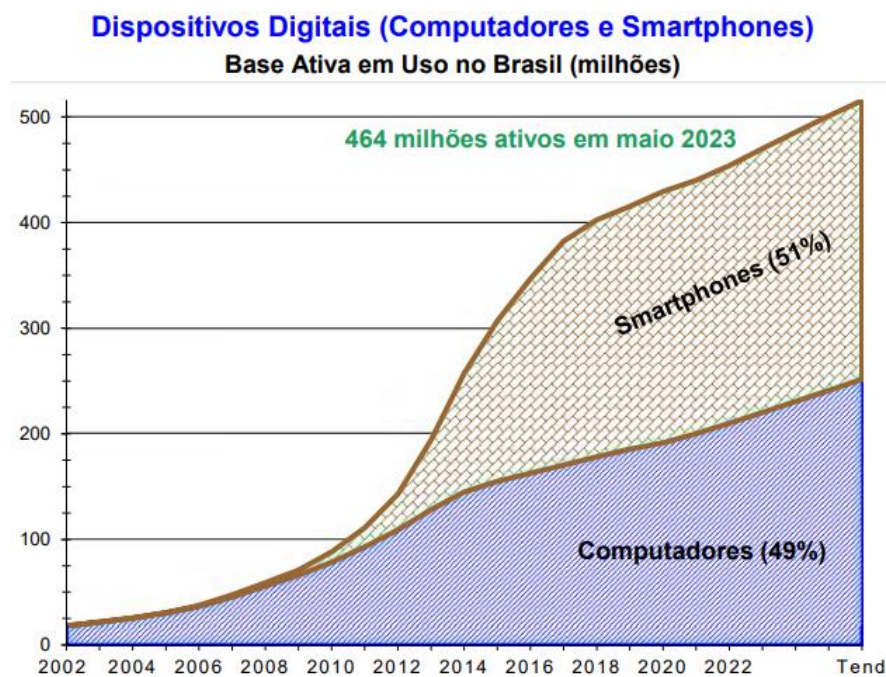
3.1 Consumo e produção de aparelhos eletroeletrônicos

Diversos minerais são utilizados tanto na fabricação dos próprios aparelhos quanto das componentes internas, é amplamente empregado o uso de ligas metálicas, utilizando os mais diversos tipos de minerais (Minas Jr., 2020). Em 2022, O mercado consumidor global de eletrônicos chegou no patamar de 762.22 bilhões de dólares, com a previsão de crescimento para 1100.66 bilhões de dólares no ano de 2030 (Vantage Market Research, 2023). No Brasil, o faturamento desse setor atingiu 218,2 bilhões de reais no ano de 2022, e o número de postos de trabalho nesse setor para esse ano foi de 267,7 mil no Brasil, com exportações principalmente para países da Aladi e Estados Unidos (ABINEE, 2022).

O Brasil possui aproximadamente 464 milhões de dispositivos digitais (computadores, smartphones, tablets e notebooks). Entre eles, são cerca de 249 milhões de celulares, cerca de 1,2 smartphones por habitante e 215 milhões de computadores (desktop, notebook e tablet), cerca de 1 dispositivo por habitante (FGV, 2023).

Entre os números totais de dispositivos, temos um share de 51% para smartphones e 49% para computadores, como podemos verificar na Figura 1:

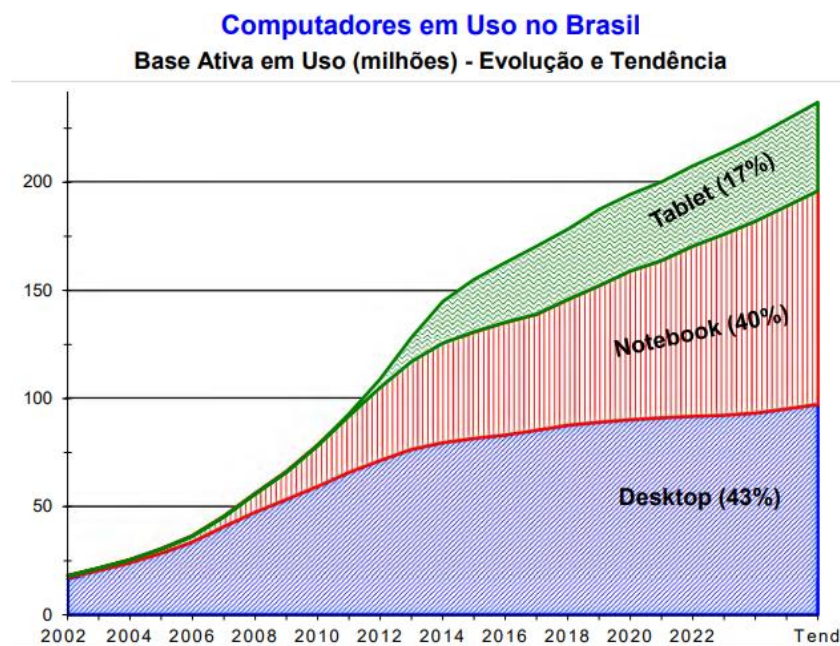
Figura 1 – Gráfico de distribuição da utilização de dispositivos digitais.



Fonte: FGV, 2023.

Entre os computadores, podemos observar uma share de 43% para desktops, 40% para notebooks e 17% para os tablets (corporativos e pessoais), como podemos observar na Figura 2:

Figura 2 – Gráfico de tendência para utilização de computadores.



Fonte: FGV, 2023.

O volume global de vendas nesse segmento foi de cerca de 240.38 milhões de peças no ano de 2022, com estimativa para 260,94 milhões de peças em 2028, para o mercado de varejo. Esse dado inclui receptores de televisão padrão, tais como projetores, monitores TVs LCD, LED e Plasma. No Brasil cerca de 11 milhões de aparelhos foram vendidos em 2022 (Statista, 2023).

No Brasil são produzidas ao ano para utilização doméstica cerca de três bilhões de pilhas e baterias, sendo 26% desse montante pilhas comuns. É estimado que anualmente circule 10 milhões de baterias de celulares, 12 milhões de baterias automotivas e 200 mil baterias industriais (ABINEE, 2022). Estima-se que o investimento global no armazenamento de baterias de lítio chegará a 20 bilhões de dólares em 2022 (IEA, 2023).

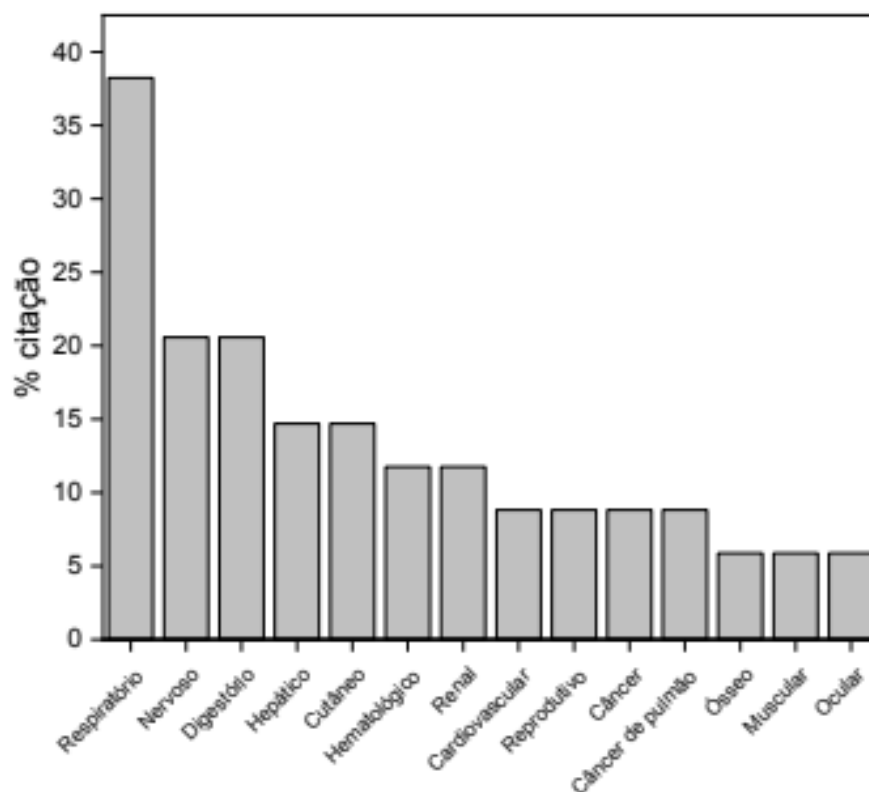
No trabalho de Castro (2021), verifica-se que o número crescente de novas tecnologias acompanha a redução da vida útil de inúmeros equipamentos eletrônicos. Segundo Kemerich (2013), mediante a escassez de informação da população sobre os impactos ambientais ocasionados pela destinação incorreta, fabricantes são forçados a tomar determinadas medidas para a disposição de seus produtos, uma vez que dispositivos legais, como a Política Nacional de Resíduos Sólidos, buscam a melhoria da gestão dos resíduos sólidos por entidades públicas e privadas, estabelecendo acordos setoriais no ano de 2020 que institui a logística reversa e suas atribuições, tais como coleta, acondicionamento, armazenamento, entre outros (Brasil, 2010).

Uma etapa considerável do impacto ambiental envolvendo equipamentos eletrônicos é a fabricação. Utiliza-se na fabricação de um computador com média de 24 quilos, 1,8 toneladas de materiais, entre eles produtos químicos e mais de mil litros de água (Kemerich, 2013). Outro exemplo importante são os smartphones: criados a partir de diversos recursos extraídos do ambiente, utilizando em média mais de 10 mil litros da água para a fabricação de um único dispositivo. No processo de produção das baterias de lítio, utiliza-se materiais como lítio, cobalto, níquel e manganês, que grandes consumidores de recursos e energia, podem provocar riscos à saúde quando manuseados (Castro, 2021).

O estudo de Franco (2021), traz um balanço dos metais mais citados em estudos bibliográficos (cerca de 34 publicações científicas), conforme a Figura 3. O chumbo é o metal mais citado, seguido do cádmio, mercúrio, arsênio, níquel e berílio.

Os autores também trazem um panorama sobre as doenças que podem ser causadas pelos metais a partir da quantidade de citações:

Figura 3 – Gráfico metais mais citados.



Fonte: Franco, 2021.

3.2 Gerenciamento de resíduos eletroeletrônicos

Na PNRS, destaca-se a importância do conceito de economia circular. Segundo Cosenza et al., economia circular é um modelo que busca a equalização do consumo de recursos com o seu desperdício, buscando a diminuição através do reaproveitamento de materiais em toda a cadeia de produção. No decreto 10240 do ano de 2020, foi instituída a logística reversa para os resíduos eletroeletrônicos no Brasil (Brasil, 2020). O conceito busca modelos sustentáveis na aquisição de matérias primas, melhoria em processos produtivos e distribuição melhorada, além da criação de mercados secundários com matérias primas reaproveitadas, para depois seguir a disposição final ou incineração, ocasionalmente com reaproveitamento de energia (Cosenza, 2020).

A concepção de selos de eficiência é amplamente utilizada em processos operacionais e design. A linearidade do processo de fabricação no setor eletroeletrônico tem como parte fundamental abordagem padrão com objetivo no “lucro”, com alta obsolescência, tornando necessário que o debate acerca de acreditação seja apenas etapa inicial do processo de construção dos processos mais sustentáveis, buscando mais eficiência ecológica. Evidencia-se a importância da melhoria do processo, pois o produto não tem capacidade de melhorar o desempenho ambiental após conclusão da produção, se caracterizando como portadores de fluxo de material, energia, desempenho e impacto ambiental. Nesse sentido, a utilização dos produtos enquanto chave para o progresso rumo à sustentabilidade se estrutura em melhorias no design, como sistemas integrais circulares em abordagem empréstimo-uso-retorno e não apenas métodos lineares, novos processos que incorporam o Design for the Environment (DfE). No Design for the Environment (DfE), ou ecodesign, prioriza-se reduzir o impacto ambiental através de estratégia integrada e multifuncional, melhorando o produto na fase de design. A etapa de pesquisa e desenvolvimento utilizando como base os impactos ambientais são fundamentais para o design também do produto, enquanto na aquisição e qualidade da matéria prima busca-se a conformidade em colaboração com os fornecedores, eliminando produtos tóxicos e possivelmente poluentes, melhor desmontagem, melhor peso e pegada de carbono menores (Herat, 2007).

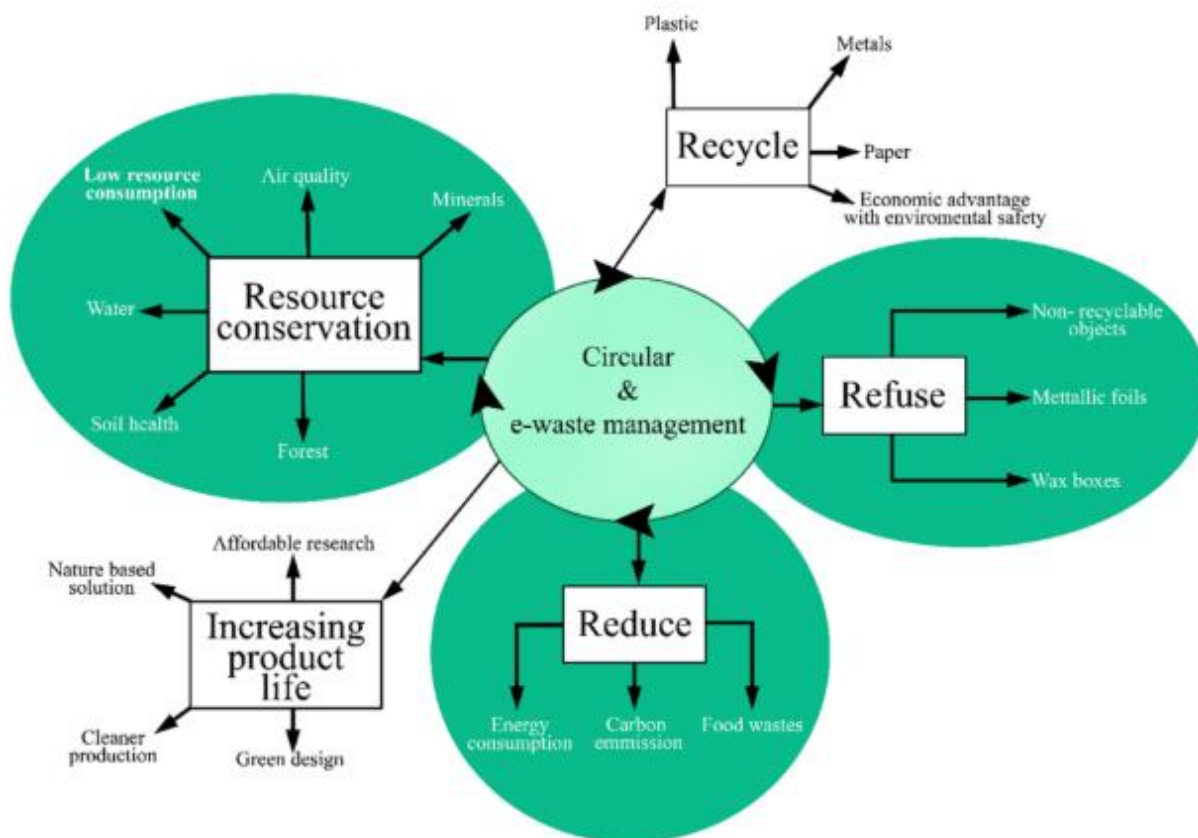
Utilizam-se diversos tipos de ferramentas para o gerenciamento de resíduos eletroeletrônicos, como por exemplo a utilização da pirólise, processo que recupera materiais valiosos com êxito através da decomposição da matéria orgânica em piro-óleos e piro-gases. Outra ferramenta para gerenciamento é a reciclagem dos resíduos eletroeletrônicos, processo no qual ocorre desmontagem de equipamentos no fim do ciclo de vida, obtendo componentes diferentes (plásticos, placas de circuito impresso e metais) que são posteriormente descaracterizados (Fawolee, 2023).

A recuperação de metais valiosos nos resíduos eletroeletrônicos traz vantagens nas oportunidades de negócios para empresas privadas, mas dentro desse processo de gestão, o transporte a granel desses resíduos gera alto custo, que podem ser diminuídos com unidades de micro reciclagem (coleta, segregação de materiais de lixo eletroeletrônico em pequenas fábricas e comunidades locais). Se aplica, nessa estratégia de gestão, redução de custos com transporte, matérias primas, combustíveis fósseis e produção de materiais reciclados de alto valor agregado. Nas

unidades de micro reciclagem obtém-se materiais com processo de aquecimento fracionado, separação de metais, polímeros e cerâmicas, com reações múltiplas utilizando processos de aquecimento fracionado para triagem de metais e ligas valiosos. Na geração de materiais valiosos inclui-se geração de metais, nanopartículas metálicas, ligas e nano cerâmicas. Nos conceitos de gestão como o da utilização de micro reciclagem, busca-se trazer valoração para materiais com utilidade para indústrias próximas (Sirivastav, 2022).

No conceito de economia circular no gerenciamento de resíduos eletroeletrônicos, busca-se a incorporação dos mais diversos elementos voltados à sustentabilidade, tecnologias verdes e novas culturas corporativas. Mudanças onde enraíza-se essa concepção são suscetíveis ao estilo de vida, moralidade, cultura, ética ambiental, psicologia e conscientização. Na Figura 4 encontra-se uma esquematização dos modelos de economia circular aplicados aos resíduos eletroeletrônicos (Sirivastav, 2022).

Figura 4 – Sistema de economia circular e gerenciamento de resíduo eletroeletrônico.

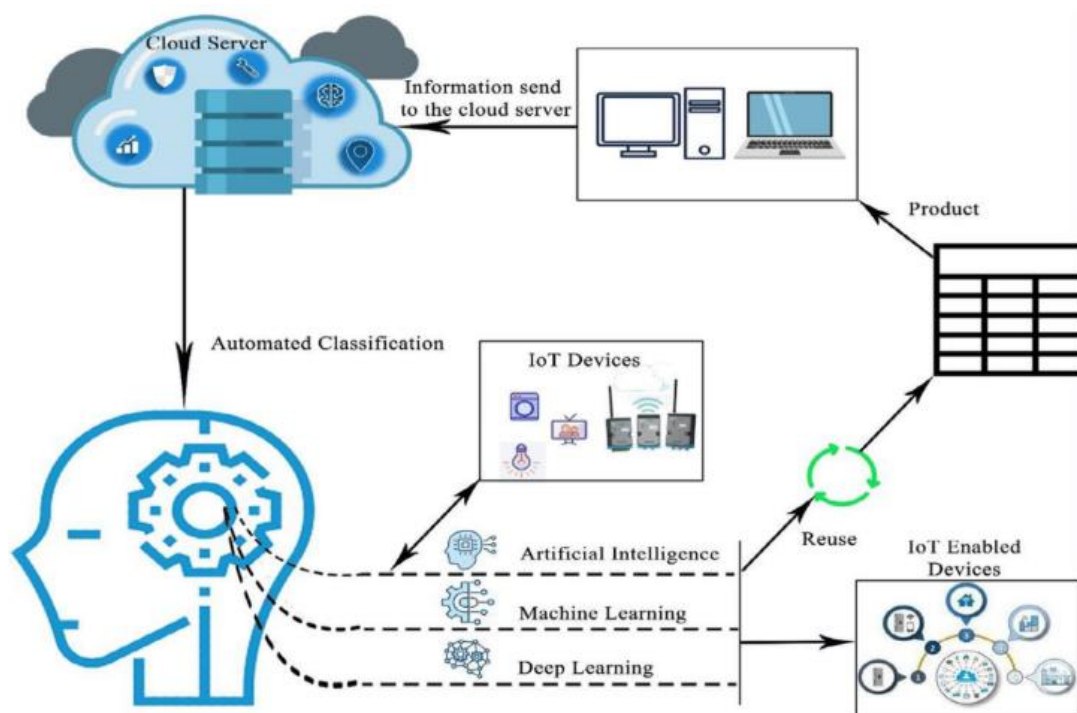


Fonte: Sirivastav, 2022.

Legenda: Circular & e-waste management = Gerenciamento circular & e-lixo; Refuse = Recusar; Non recyclable object = objetos não recicláveis; Metallica foils = folhas metálicas; Wax Boxes = caixa de cera; Reduce = Redução; Energy Consumption = Consumo e energia; Carbon emission = emissão de carbono; Food Waste = Desperdício de alimento; Increasing product life = aumento do tempo de vida; Green design = Design verde; Cleaner production = Produção limpa; Nature based solution = solução baseada na natureza; Affordable research = pesquisa acessível; Resource conservation = Conservação dos recursos; Forest = Floresta; Soil Health = saúde do solo; Water = Água; Low Resource Consumption = Consumo de recursos; Air quality = qualidade do ar; Minerals = minerais; Recycle = Reciclar; Plástico = plástico; Metal = metais; Paper = papel; Economic advantage with environmental safety = Vantagem econômica com segurança ambiental.

Segundo estudo de Alvarez-de-los-mozos (2017) avaliou-se a introdução de robôs colaborativos nas linhas de reciclagem junto aos operadores humanos, a automação e a programação dos robôs. O objetivo dos processos é a reutilização e reciclagem das diferentes peças e componentes utilizando diversas estações de trabalho compostas por ferramentas específicas. No processo robotizado busca-se materiais em, por exemplo, baterias, câmeras e outras partes dos celulares para obtenção de lítio, cobalto, ouro, cobre, alumínio e diversos outros tipos de materiais. Esses processos automatizados possuem inúmeros desafios, principalmente em aparelhos eletroeletrônicos maiores, produtos de linhas brancas e televisões com composição caracterizada por cabos, peças e componentes com maior dificuldade de identificação. Em sistemas de gerenciamento modernos para resíduos eletroeletrônicos utiliza-se a inteligência artificial. Transfere-se os dados obtidos para o servidor de nuvem (banco de dados). Os componentes dos produtos são separados, classificados e categorizados. Realiza-se a categorização através do aprendizado de máquina automatizado, seguido de filtragem e mensagem de alerta ao servidor, com a utilização de dispositivos voltados à Internet das Coisas para confecção das mensagens. Os resíduos eletroeletrônicos e os materiais verificados cadastrados nos dispositivos se configuram em uma lista de produtos atualizada com abordagens de inteligência da máquina com fins de retribuição, automação e aprendizado do histórico, com detecção de componentes reutilizáveis melhorada. Mecanismos de tratamentos de dados para redução de custos são importantes pois os custos são reduzidos quando se utiliza automação. O fluxograma apresentado na Figura 5 demonstra parte da estrutura referida por Srivastav (2022) a partir dos trabalhos de Elangovan (2021) e Alvarez-de-los-mozos (2017):

Figura 5 – Estrutura para resíduos eletroeletrônicos com abordagem de inteligência de máquina.



Fonte: Srivastav., 2017.

Legenda: IoT Devices = Dispositivos Internet das Coisas; Artificial Intelligence = Inteligência Artificial; Machine Learning = Aprendizado de máquina; Deep Learning = Aprendizado profundo; Automated Classification = classificação automática; Cloud server = Servidor da nuvem; Information send to the cloud server = Informação enviada para o servidor da nuvem; Product = produto; Reuse = Reutilização; IoT Enabled Devices = Dispositivos aptos à internet das coisas.

No estudo de Elangovan (2021) elencam-se os principais desafios para formação de uma estrutura de machine learning:

- Otimização de dados após coleta e processamento: levanta-se os dados, seguido de monitoramento, relatório e notificações sobre o lixo eletrônico. A coleta de lixo eletrônico e a solicitação é realizada utilizando aplicativos móveis e os produtos de lixo eletrônico com materiais listados e os dados extraídos.

- Abordagem de inteligência de máquina: o aprendizado de máquina torna-se fundamental para visão de máquina, com propósito de análise, extração, engenharia de recursos, rotulagem e classificação.

- Contêineres de lixo eletrônico com capacidade de detecção de materiais a partir dos dados coletados para processo de filtragem dos metais preciosos.

- Na última fase, notifica-se de maneira automatizada para o solicitante.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

A pesquisa consistiu em uma busca inicial por artigos, estudos, livros e outras referências voltadas à produção, consumo e gestão de resíduos eletroeletrônicos, sendo escolhidos 4 artigos datados do período de 2019 até 2023 relacionados ao Brasil, Índia, União Europeia e África. Os principais portais consultados incluem Google Scholar, Web of Science, Springer Nature e Elsevier (base de dados do Scopus e ScienceDirect), dados estatísticos de mercado, buscando as palavras chaves “Electronic Waste Management” e “Gestão de resíduos eletroeletrônicos”.

Os estudos utilizados para análise foram:

- E-Waste Management in India: Issues and Strategies (Turaga *et al.* (2019), Vikalpa: The Journal for Decision Makers) - Gestão de Resíduos Eletrônicos na Índia: Problemas e Estratégias.
- Behavioral change for the circular economy: A review with focus on electronic waste management in the EU (Parajuly *et al.* (2020), Resources, Conservation & Recycling) - Mudança comportamental para a economia circular: Uma revisão com foco na gestão de resíduos eletrônicos na UE.
- Electrical and Electronic Waste Management Problems in Africa: Deficits and Solution Approach (Massa, G. M.; Archodoulaki, V. M., (2023) Environments) - Problemas na Gestão de Resíduos Elétricos e Eletrônicos na África: Deficiências e Abordagens de Solução.
- Electronic waste in Brazil: Generation, collection, recycling and the covid pandemic (Dias *et al.* (2022), Cleaner Waste Systems) - Resíduos eletrônicos no Brasil: Geração, coleta, reciclagem e a pandemia de COVID.

5. RESULTADOS

5.1 E-Waste Management in India: Issues and Strategies, India (2019)

A Índia, em 2019, foi um dos maiores produtores de resíduos eletrônicos do planeta, com produção anual estimada em 2 milhões de toneladas, conquistando espaço entre os cinco maiores produtores. Considera-se o país uma economia emergente, ainda em desenvolvimento, onde há características semelhantes com relação a gestão de resíduos eletrônicos, como a alta participação do setor informal na gestão desse tipo de resíduos.

Na Índia, compreende-se que as primeiras legislações e regulamentações a respeito dos resíduos eletrônicos foram implementadas em 2011, utilizando a EPR. Estabeleceu-se que produtores de resíduos eletroeletrônicos devem criar centros de coleta e centros de informação aos consumidores, capacitando os mesmos a compreenderem o funcionamento dos centros de recolha dos produtos. Criou-se um ambiente de desmontagens formais e centros de reciclagem, mas as regras se mostraram ineficazes na melhoria das práticas de EPR. Seguiram, consecutivamente, implementando novas regras no ano de 2016 e 2018, estabelecendo a necessidade de recolher uma porcentagem de produtos vendidos no período anterior, com aumento da porcentagem em 70% a partir do ano de 2023. A partir dessas alterações, o setor de resíduos eletrônicos na Índia passa por dinâmicas de alterações, com maior desenvolvimento de tecnologias e organizações. As alterações promoveram a disseminação de novos centros de reciclagem e desmontagem, com metas de taxa para produtores contribuindo para o cumprimento das regulamentações.

Foram elencados também os principais desafios:

- Informações a respeito das taxas de geração de lixo eletrônico: dificuldades relacionadas à falta de inventários de resíduos, considerando que os dados de vendas de produtos eletrônicos não têm boa precisão, dificultando a estimativa. Os problemas envolvem também importação ilegal ou sem rastreabilidade.
- Setor informal não sustentável: as instalações formais são desmanteladas devido ao processamento de resíduos abaixo das capacidades. Baixa conscientização (risco de contaminação) e custos

elevados para devolução dos equipamentos eletrônicos, diminuindo a disposição dos consumidores para que retornem os resíduos ao setor formal.

- Produtos no final do ciclo de vida: falta de quantidades de lixo eletrônico dificultam a atuação de atores privados na implementação dos sistemas de gestão. O exemplo prático pode ser verificado com a necessidade de alto capital inicial sob a incerteza do fornecimento de quantidades adequadas de resíduos. Problemas com as informações voltadas a tecnologias de reciclagem e falta de informações sobre reciclagem.
- Elaboração e aplicação inadequada das regulamentações: sistemas de devolução obrigatória sem acompanhamento de metas acarretaram problemas e foram elaboradas novas práticas de gestão com pequenas melhorias (alterações de 2016), especificando metas graduais e mais rigorosas. As agências reguladoras mal equipadas acabam sobrecarregadas, dificultando as revisões de planos de EPR e pela captura regulatória por lobistas.

Outro desafio importante é a criação de um sistema robusto de resíduos eletroeletrônicos, com inclusão de avaliações de eficácia das medidas regulatórias. Considera-se importante para os avanços os seguintes passos:

- Setor informal: reconhecer o setor informal como parte essencial na gestão de resíduos eletrônicos, entendendo seus incentivos e desafios. Envolver esses trabalhadores e grupos, garantindo seus direitos e criando confiança, é crucial para desenvolver soluções compartilhadas.
- Instrumentos políticos no âmbito da Responsabilidade Estendida do Produtor: sugere alternativas à devolução obrigatória, como taxas avançadas de reciclagem ou descarte sobre produtos vendidos. Essas taxas, direcionadas a um fundo específico, poderiam subsidiar consumidores para depósito em centros designados, financiar recicladores ou entidades privadas, e apoiar a capacitação e segurança social de trabalhadores informais. A definição da taxa ideal deve considerar o custo marginal externo do descarte, incentivando práticas sustentáveis no design de produtos e a reciclagem ambientalmente segura. A longo prazo, a taxa poderia variar conforme a facilidade de desmontagem, reciclabilidade e impacto ambiental dos materiais. O

quadro político deve ainda focar no desenvolvimento ou transferência de tecnologias ecológicas para a reciclagem de lixo eletrônico.

- Aplicação da regulamentação: facilita-se a transição para uma economia mais sustentável, com foco na gestão de resíduos eletrônicos. Ele propõe a transferência do Fundo de Desenvolvimento de Aplicações para produtos eletrônicos, aliviando a carga regulatória sobre os produtores. A experiência na arrecadação de impostos pode ajudar nesse processo. Os órgãos responsáveis continuarão a monitorar e garantir o cumprimento dos padrões para centros de coleta, desmontagem e reciclagem.
- Importação de resíduos: a prática é adotada para fins de reutilização e reciclagem, com alta restrição para fins de descarte. Os dados devem ser integrados com os inventários de lixo eletrônico.
- Informação e conscientização: as regulamentações atuais sobre lixo eletrônico exigem que os produtores divulguem informações sobre impactos ambientais, práticas de descarte adequadas e realizem campanhas de conscientização regularmente. Sugere-se a implementação de diretrizes mais rígidas sobre a frequência e o modo dessas campanhas, ou a obrigatoriedade de os produtores realizarem-nas em parceria com organizações de base especializadas em lixo eletrônico.

A promulgação de uma regulamentação nacional para a gestão de lixo eletrônico, baseada no princípio da Responsabilidade Estendida do Produtor, em 2011, representou um avanço significativo na busca por um sistema mais organizado e sustentável para o manejo desses resíduos. No entanto, a implementação efetiva dessa regra ainda enfrenta desafios consideráveis, revelando uma realidade complexa e multifacetada no cenário prático. Embora a legislação tenha sido concebida com base na integridade e na responsabilidade das partes interessadas, atribuindo ao Estado o papel de agência monitoradora, a execução no terreno tem se mostrado mais complicada do que o previsto.

Um dos principais obstáculos à efetiva implementação da regulamentação é a existência do setor informal, que não foi devidamente incluído no marco regulatório atual. Por um lado, os produtores, identificados como os principais responsáveis pelo

cumprimento das obrigações de EPR, frequentemente utilizam a presença do setor informal como justificativa para não assumirem suas responsabilidades. Por outro lado, a competição entre os setores formal e informal pelo acesso aos resíduos e pela extração de valor em diferentes níveis da cadeia de comércio de resíduos representa um desafio significativo para a conformidade com as normas de EPR.

O setor informal possui uma estrutura organizacional ampla e uma rede bem estabelecida em todo o país, o que lhe confere uma vantagem competitiva única. Essa rede atua de forma hierárquica, abrangendo desde a coleta e o transporte, a desmontagem e a extração de materiais, criando oportunidades de negócios em cada etapa do processo. Contudo, a percepção de que o setor informal é composto por pequenos atores marginais com recursos limitados é enganosa. Na realidade, ele é capaz de lidar com volumes significativos de resíduos e possui recursos financeiros consideráveis, embora muitas vezes opere à margem da legalidade.

A mão de obra utilizada pelo setor informal é majoritariamente composta por trabalhadores pouco qualificados, provenientes da população rural migrante e da pobreza urbana, que aceitam condições de trabalho precárias e inseguras. Essa disponibilidade de mão de obra barata, aliada à abundância de resíduos e à existência de uma população urbana carente, cria um ambiente propício para a subsistência, mas também exige um exame cuidadoso e um entendimento profundo para que possa ser integrado de forma benéfica à sociedade e à promoção da sustentabilidade. Dentre os desafios específicos relacionados ao papel do setor informal na gestão de lixo eletrônico, destacam-se:

- **Acesso aos Resíduos e Flexibilidade:** A estrutura flexível e descentralizada do setor informal permite que ele capture a maior parte dos resíduos gerados, tanto de indivíduos quanto de empresas. Essa capacidade de acúmulo de grandes volumes de resíduos torna o comércio lucrativo, mas também representa uma ameaça ao setor formal, dificultando a implementação das regulamentações de EPR.
- **Processos Perigosos:** Os métodos utilizados pelo setor informal para o refino e a extração de materiais são frequentemente ineficientes e ambientalmente prejudiciais. A ausência de tecnologias apropriadas e a falta de controle sobre esses processos contribuem para a degradação ambiental, embora o setor desempenhe um papel importante na coleta e no transporte de resíduos.

- Invisibilidade e ilegalidade: A natureza muitas vezes invisível e ilegal das operações do setor informal é um desafio significativo. Sua capacidade de operar à margem da lei, embora vantajosa para suas atividades, gera preocupações quanto à regulamentação e à integração desses atores na cadeia de suprimentos formal. A ilegalidade associada às suas operações também contribui para a percepção negativa do setor, visto como um agente problemático que carrega o ônus da degradação ambiental.
- Eficiência do Estado: os aparatos e estruturas de monitoramento e supervisão do Estado não têm capacidade de lidar com os desafios presentes no setor informal. As estruturas governamentais não dialogam com os setores pobres e informais, facilitando a ocorrência de sistemas paralelos para resolução de aspectos visíveis da gestão.
- Falta de conscientização: baixa conscientização entre consumidores e geradores de resíduos, dificultando a identificação de partes interessadas.

São importantes para o processo de gestão a etapa de reconhecimento do setor informal (revisões e reconhecimento do setor para melhorias no processo de coleta e comércio), revisão das regulamentações (melhorias na infraestrutura, regulação e mecanismos de governança), melhorias no inventário de resíduos e desenvolvimento dos sistemas online.

O desenvolvimento das tecnologias para gestão de lixo eletrônico se configura em grande preocupação, pois há defasagem tendo em vista a reciclagem dos resíduos eletroeletrônicos em unidades informais, com métodos insalubres e sem a proteção ambiental e social adequada. Nas regras estabelecidas em 2016 para Gestão e Manuseio, os desafios permanecem: escassez de instalações adequadas para a reciclagem e conhecimento de operadores informais, acarretando incineração a céu aberto, com métodos perigosos para recuperação dos metais preciosos (aquecimento do material para obtenção dos componentes segregados, com inalação de vapores perigosos de mercúrio). Apresenta-se também enquanto um problema as tecnologias pois as fundições mais capacitadas encontram-se em países desenvolvidos, que conseguem extrair prata, ouro, paládio e cobre, privilegiando as placas de circuito impresso (PCI) de alto valor, desprezando as placas de menor valor e adicionando o custo de transporte para os recicladores indianos. As exportações de placas para fundições estrangeiras requerem trâmite burocrático, dificultando ainda mais o processo, tornando-o insustentável e favorecendo os canais ilegais.

As fundições indianas processam apenas parte das peças recuperadas, gerando problema grande com as tecnologias voltadas à extração dos componentes de alto valor (PCIs), com custos logísticos e refino elevados (necessidade de tecnologia estrangeira). As tecnologias indianas possuem capacidade de processamento de PCIs com capacidade de 100kg/turno e tecnologias de baixo custo.

O setor informal gerenciado de maneira adequada traz benefícios no processamento de resíduos eletroeletrônicos. No ano de 2019, aproximadamente 90 por cento do lixo eletrônico foi manipulado pelo setor informal, utilizando métodos primitivos e insalubres. É consensual que os programas busquem aprimoramento no sentido das habilidades para melhores metodologias, com treinamentos para compreensão das boas práticas ambientais. No setor informal, existe uma rede gigantesca de coletores não autorizados, sucateiros e outros intermediários, criando-se a necessidade de articulação com o setor formal. Representa-se, através das entidades cooperativas subsidiadas, importante papel do setor formal (construção de capacidades, entendimento e integração entre os setores). Centros de reciclagem simplificados abrem espaços para melhoria nos fluxos de materiais melhorando a disponibilidade dos materiais, recuperação dos rendimentos com as ferramentas, metodologias e tecnologias com maior salvaguarda ambiental. A regionalização do fornecimento de recursos financeiros e materiais são necessários entre as diferentes esferas. A criação de parques ecológicos para o incentivo e otimização dos processos junto à integração dos setores é capaz de proporcionar a sustentabilidade financeira com a adoção de boas estratégias.

Do ponto de vista do financiamento, o desenvolvimento das regras criadas estabelece estruturas jurídicas capazes de condicionar de maneira equitativa o financiamento a produtores e auxiliando recicladores. Nas Regras de Resíduos Eletrônicos de 2016, foram estabelecidas metas de devolução para o setor industrial, forçando a criação de um sistema de rastreamento e localização de resíduos, sem definição dos mecanismos de financiamento. Alguns dos fatores e desafios que caracterizam as mais variadas formas de financiamento e investimentos a partir das regras institucionais adotadas são:

- Cherry picking: para o lixo de TI (computadores, celulares, telefones) e os eletrônicos de consumo (televisores, geladeiras, máquinas de lavar, condicionadores de ar e lâmpadas), entende-se a importância da Cherry Picking, onde recicla-se apenas as frações de valor positivo.

- Valor, composição, tecnologia e suas tendências: a quantidade, tipo de material, custos e receitas totais definem se o valor de um produto é positivo. A existência de produtos com valores negativos e positivos geram desafios no custo total para coleta, acumulação, recuperação, despoluição e reciclagem. O processo de substituição e diminuição da quantidade de materiais caros em placas de circuito impresso fazem parte do desenvolvimento da composição dos novos materiais.
- Conformidade mínima: custos para gerenciamento dos resíduos no mínimo, devido aos cortes de custos (multinacionais e pequenos importadores), com flexibilização das regras e metas.
- Custo de acesso aos resíduos: baseia-se no valor funcional do produto, que é maior do que o valor recuperado das frações dos produtos, não cobrindo despesas logísticas e operacionais.
- Baixo investimento para monitoramento e controle: não há confiabilidade nos sistemas de monitoramento devido ao baixo investimento, dificultando o papel das agências reguladoras.
- Dificuldades logísticas: afetam os custos para agregar e armazenar materiais, dependendo da precariedade das redes logísticas. Outros fatores são o desequilíbrio regional das capacidades instaladas para reciclagem e os custos de coleta e transportes proibitivos. Regimes fiscais diferenciados ajudam nos processos burocráticos.
- Processos ineficientes de reciclagem: processos ruins de reciclagem, recuperação e desmontagem geram problemas com a receita e o financiamento, sendo o elo mais fraco da cadeia o fator determinante para a eficiência geral. Uma gama muito grande de materiais é desperdiçada ou descartada devido aos processos ruins, alterando o valor intrínseco dos produtos.

Modalidades de financiamento dos sistemas de gerenciamento de resíduos eletroeletrônicos buscam mais segurança no financiamento, limitando o processamento de resíduos para a coleta, tratamento e descarte. Por esse motivo busca-se o preço de custo total das cadeias de suprimentos, escopo de produtos diversos, mecanismos de compensação, e incentivo a novos modelos de negócios e processos. A conformidade e a restrição onde configuram-se as respostas

empresariais à agenda gerencial para os resíduos eletroeletrônicos trazem algumas tendências, onde consideram-se as elaborações das novas culturas empresariais.

Exemplifica-se utilizando, por exemplo, o controle de custos como o principal norteador das escolhas dos produtores. Busca-se também outras abordagens e alavancas, tais como otimização de processos, alterações no design, redução de consumo de material e modelos de negócios que priorizam, através dos sistemas de economia circular, maior receita através de produtos vendidos. Os fatores diferenciados vêm acompanhados da pressão institucional, guiando as respostas empresariais a médio e longo prazo, que se retroalimentam em regulamentações mais robustas para o setor formal e informal. A sustentabilidade enquanto tendência primordial para o desenvolvimento norteia as diferentes legislações, caracterizando-se como tema central para a elaboração das políticas públicas, forçando o meio corporativo a adotar mudanças nos modelos de negócio (venda para aluguel ou leasing), economia compartilhada, oferta de produtos mais ecológicos. As iniciativas são alinhadas com as ODS da ONU, priorizando a conexão entre o gerenciamento de resíduos, mas apresentando dificuldades no gerenciamento das informações devido a presença de produtores estrangeiros, aumento da exportação de produtos e do pró-ambientalismo, convergindo demandas de consumidores em massa na internet.

5.2 Behavioral change for the circular economy: A review with focus on electronic waste management in the EU, União Européia (2020)

Na União Europeia, os produtos eletroeletrônicos são alvo central no debate a respeito da sustentabilidade socioambiental, econômica e de recursos. Demanda crescente, utilização de recursos críticos e desafios na gestão do ciclo de vida se caracterizam como principal motivo do foco das instituições no tema. Estima-se que o fluxo global de resíduos eletroeletrônicos no continente dobre até 2045. A evolução das componentes dos produtos (recursos valiosos), o cuidado para manuseio, a utilização costumeira dos aparelhos e necessidade de melhoria dos sistemas de gerenciamento se configuraram temas básicos para a elaboração da Diretiva de Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos (REEE) na Europa em 2003. A diretiva é responsável por estabelecer critérios, metas e procedimentos a partir da implementação do sistema com base no princípio da Responsabilidade Estendida do

Produtor (EPR), implementando o modelo de gestão que cria e aprimora sistemas de triagem, coletas, recuperação de recursos, reciclagem e destinação. Trabalha-se de maneira ampla o conceito de design ecológico de produtos, integrando aspectos das diferentes etapas do ciclo de vida do produto, avaliando consumo de energia, materiais e o design do produto.

A implementação da política de gerenciamento acabou se limitando aos procedimentos de coleta e processos de reciclagem com arranjos coletivos que desincentivam os diferentes setores a aprimorarem a recuperação dos recursos pois o escopo do sistema de gerenciamento de resíduos eletroeletrônicos com base em EPR ordenou-se junto ao de economia circular deduzindo que os produtores conseguissem administrar a gestão no fim do ciclo de vida do produto. Privilegia-se o lado do consumo no ciclo de vida em detrimento das pesquisas na qual foca-se na produção. O sistema econômico, por ser estruturado de maneira “linear”, isola os aspectos da produção, consumo e gestão do fim do ciclo de vida para os bens de consumo. O consumo é avaliado a partir das emissões que partem dos bens e serviços e considera-se que a maior parte das estruturas para gestão de carbono são baseadas em produção e não em consumo. O foco de uma economia circular é maximizar a utilidade dos recursos na cadeia produtiva, necessitando serem avaliados também os comportamentos dos usuários (motivações, impulsionadores, fatores sociais). Sem a avaliação dos fatores e elementos sociais, o sistema de economia circular acaba por ser defasado, focando-se apenas em aspectos técnicos e econômicos (melhoria das taxas de coleta e reciclagem, aparelhos mais sofisticados para processamento), negligenciando fator importante que compõe o comportamento dos usuários no consumo de bens cotidianos e seu processo de adaptação para bom gerenciamento do sistema de economia circular.

Nas opções mais utilizadas em economia circular, como reutilização e reparação, ou até em recuperação posterior de recursos em fim de ciclo de vida (reciclagem), os usuários finais (consumidores) e suas decisões possuem papel fundamental em três estágios do ciclo de vida: compra, uso e gerenciamento de fim do ciclo de vida. Devem ser consideradas a aceitação, adaptação e participação das diferentes parcelas públicas onde as interações cotidianas ocorrem são partes fundamentais das estratégias circulares. Através dessa avaliação torna-se mais eficiente o diálogo com o consumidor, com ele optando por produtos envolvidos em negócios circulares que busquem reparo, reutilização de produtos funcionais

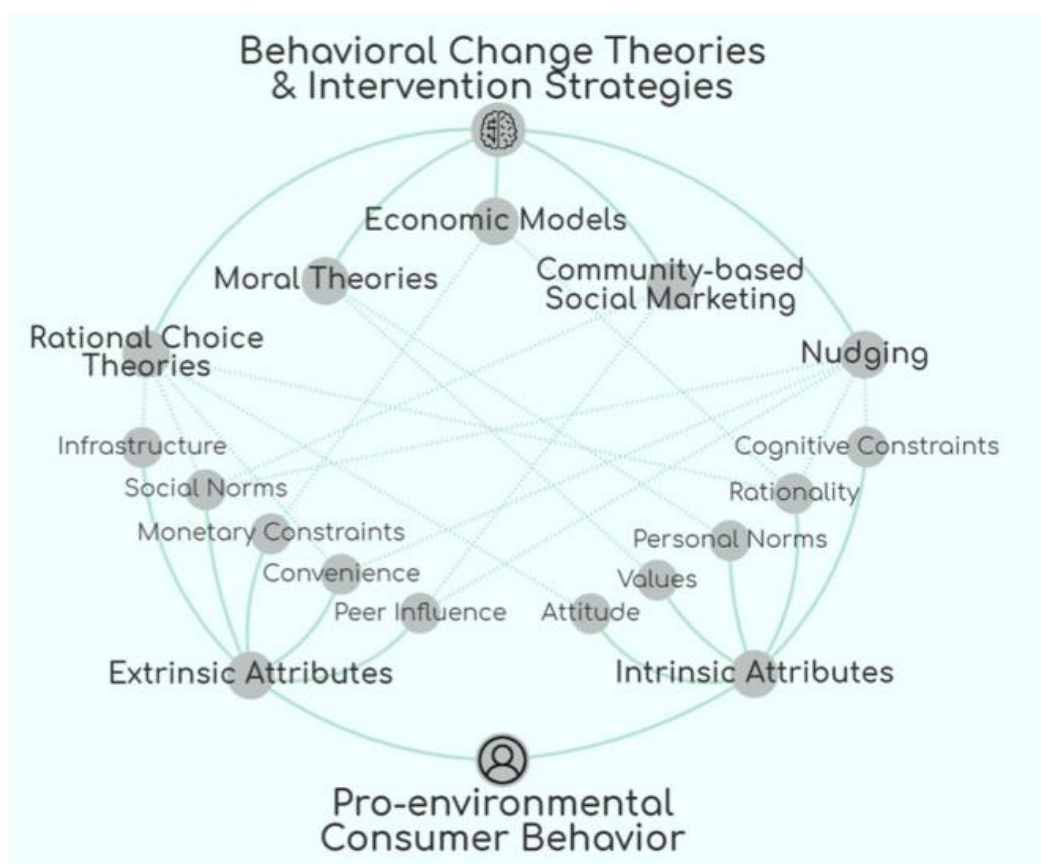
quebrados, bem como descarte adequado de produtos em fim de ciclo de vida. Evidencia-se no processo de aceitação do consumidor, e posterior adaptação pública, o aumento da eficiência dos recursos também em infraestrutura, produtos, modelo de negócio e políticas públicas. No continente Europeu, vanguarda nas questões ambientais e de mudanças climáticas, a maioria dos habitantes é ciente das políticas instauradas e participam de processos de triagem de resíduos, reutilização de produtos ou modelos de negócios alternativos, como o leasing. As lacunas com relação às reivindicações e alegações são ocasionadas devido ao limite de dados em disposição sobre diferentes tipos de comportamentos e a incomparabilidade entre determinados fatores dificulta o grau de entendimento das lacunas.

Na União Europeia, avalia-se as escolhas dos consumidores para as diferentes lacunas e identifica-se a atuação de canais não oficiais de coleta e o fracasso de sistemas de controle. A taxa de coleta para resíduos eletroeletrônicos separados é de 35%, para 76% dos europeus realizando coleta seletiva, evidenciando os percalços na gestão de resíduos eletroeletrônicos. Esse ponto corrobora alguns apontamentos no qual considera-se que mesmo as campanhas ambientais com propostas intervencionistas não garantem a eficácia das ações sustentáveis com base em alfabetização ambiental, havendo problemas intrínsecos ao comportamento humano para aproveitar o melhor potencial.

Pensando no aspecto comportamental, o foco do estudo consistiu em avaliações de diferentes teorias comportamentais, modelos e ferramentas para as diferentes inserções cabíveis para mudanças comportamentais voltadas à sustentabilidade, almejando insights com alta inserção no cotidiano do consumidor. A construção desse tipo de metodologia envolve análise de literatura voltada ao comportamento humano em diferentes tipos de campos de conhecimento (ciências sociais, economia, psicologia), aplicando os elementos e teorias na criação de visões mais gerais para comportamentos relacionados à produção e identificando possíveis exemplos de intervenções comportamentais aplicados à produção e consumos sustentáveis.

Os autores elucidaram as principais teorias e ferramentas utilizadas em intervenções comportamentais na Figura 6:

Figura 6 – Estrutura para mudança comportamental e intervenções para concepções ambientais.



Fonte: Parajuly, 2020.

Legenda: Behavioral change theories & Intervention Strategies = Teorias de mudanças comportamentais & Intervenções Estratégicas; Economic Models = Modelos econômicos; Community-based social marketing = Divulgação social baseada na comunidade; Nudging = “empurrão”; Cognitive Constraints = Restrição Cognitiva; Rationality = Racionalidade; Personal Norms = Normas Pessoais; Values = Valores; Attitude = Atitude; Intrinsic Attributes = Atributos Intrínsecos; Pro-environmental Consumer Behavior = Comportamento pró-ambiental do consumidor; Extrinsic Attributes = Atributos Extrínsecos; Peer Influence = Influências Iguais; Convenient = conveniência; Monetary Constraints = Restrição Monetária; Social Norms = Norma Social; Infrastructure = Infraestrutura; Rational Choice Theories = Teoria das Escolhas Racionais; Moral Theories = Teorias Morais.

As teorias econômicas, diferente das psicológicas, buscam incluir concepções na qual há abordagem ambientalista nos diferentes tipos de modelos econômicos, pressupondo que os indivíduos maximizam a utilidade do comportamento ambiental recebendo incentivos. A denominação da modelagem incluindo comportamentos pró-ambientais pode ser chamada de ‘provisão privada de bens públicos’. O princípio poluidor-pagador consiste na criação de métricas para melhoria do gerenciamento. A disposição declarada de pagar (WTP, na sigla em inglês) é uma das ferramentas mais

utilizadas e amplamente difundidas em países do mundo inteiro para estimular nos indivíduos o comportamento pró-ambiental. Bonificações para produtos mais ecológicos e remanufaturados também são utilizadas dentro dessa concepção. O WTP é composto por vários fatores de predição, tais como atitude e valores ambientais e fatores socioeconômicos (demografia, nível educacional, renda). É fixado ao valor econômico do resultado do investimento, embora expresse valores altruístas.

Inúmeras estratégias são elaboradas para mudanças comportamentais, combinando diferentes áreas de conhecimento. O marketing social baseado na comunidade é uma abordagem na qual se promove práticas sustentáveis em diferentes tipos de instituições e eventos (reciclagem doméstica, eventos esportivos, redução de consumo, produtos sustentáveis) através da difusão de normas éticas. As principais etapas envolvem a escolha dos comportamentos, identificação de entraves e vantagens, direcionamento, implementação e avaliação. A Diretiva WEEE e o Ecodesign são relevantes na implementação regulatória (benefícios fiscais e concessões), porém não possuem o usuário final em seu escopo, beneficiando outras estratégias, tal qual o nudging, já mencionado. A percepção dos custos comportamentais e motivações ambientais individuais podem gerar mudanças significativas para os desafios envolvendo lixo eletrônico.

5.3 Electrical and Electronic Waste Management Problems in Africa: Deficits and Solution Approach, Austria (2023)

Neste artigo selecionado, foram analisados problemas na gestão de resíduos eletroeletrônicos na África, considerando também as soluções apresentadas na pesquisa. O contexto evidencia as dificuldades em estruturas fragilizadas de países em desenvolvimento, infraestruturas e questões demográficas que acarretam problemas de saúde severos. Os países africanos possuem a menor taxa de produção para resíduos eletroeletrônicos gerados per capita do planeta e há a predominância do setor informal na maior parte do Produto Interno Bruto (PIB) desses países.

Em uma primeira etapa, o artigo aborda a complexidade dos resíduos eletroeletrônicos: os diferentes tipos de materiais (metálicos ou não metálicos), balanço de materiais e produção. Aspectos da produção de resíduos eletroeletrônicos

são apontados nas saídas de materiais após o tratamento, sendo a maior parte composta por metais ferrosos, metais não ferrosos e plásticos. No processo de recuperação dos resíduos eletroeletrônicos há também a utilização de matérias-primas secundárias, conservando características dos minérios primários com baixas pegadas ecológica e de carbono, abundante em componentes com propriedades elétricas e magnéticas. Mesmo com a recuperação de elementos de terras raras (ETRs), a taxa de reciclagem evidencia a necessidade de melhoria e procura de alternativas para aumento da oferta de materiais oriundos dos REEEs, sendo Érbio (Er) e Túlio (Tm) os mais raros ETRs presentes em amostras de lixo eletrônico (unidade de disco, sistemas de comunicação, computadores, diodos). Os ETRs também podem ser oriundos das baterias de íons de lítio que são utilizadas nas telecomunicações, veículos elétricos e híbridos, e possuem chumbo, manganês, níquel, cádmio, lítio, entre outros causadores de problemas de saúde. A valoração dos resíduos eletroeletrônicos é realizada através da obtenção de metais preciosos utilização de matéria-prima virgem e matéria prima secundária com alto conteúdo de substâncias tóxicas em bateria de íons de lítio.

O continente africano possui 54 países e 1,4 bilhão de pessoas. Estatísticas para o ano de 2021 mostram a geração do total de resíduos eletroeletrônicos mundialmente em aproximadamente 54,8 milhões de toneladas, com apenas 3 milhões de toneladas produzidas no continente africano. Países desenvolvidos destinam os resíduos eletrônicos para processamento e reciclagem, de maneira legal ou ilegal, para países africanos, com destaque para Gana e Nigéria (aproximadamente 500 contêineres por mês em 2020, originários principalmente dos EUA, Europa e Ásia). Importações de aparelhos eletrônicos no porto de Tema, em Gana, onde em média 300 contêineres chegam todos os meses, trazem uma estimativa da taxa de reutilização em torno de apenas 20-25% para o ano de 2020. A África do Sul também enfrenta problemas com mecanismos de gestão e desafios ambientais grandes, com taxa de lixo eletrônico em aproximadamente 5,4 kg por habitante. Os autores citam cidades como Agbogboshie e Alana, nas quais há esforços no sentido da reutilização dos metais preciosos e apontam a precariedade de legislações formais no Egito, por exemplo. Na maioria dos países, o setor informal é destaque no processo de tratamento, acarretando problemas com aterros/despejos. Ruanda, país com gestão de resíduos eletroeletrônicos mais bem estruturada da

África, possui jurisdição baseada em licenças para serviços de coleta e transportes, serviços de desmontagem e serviços de reciclagem, com multas rígidas.

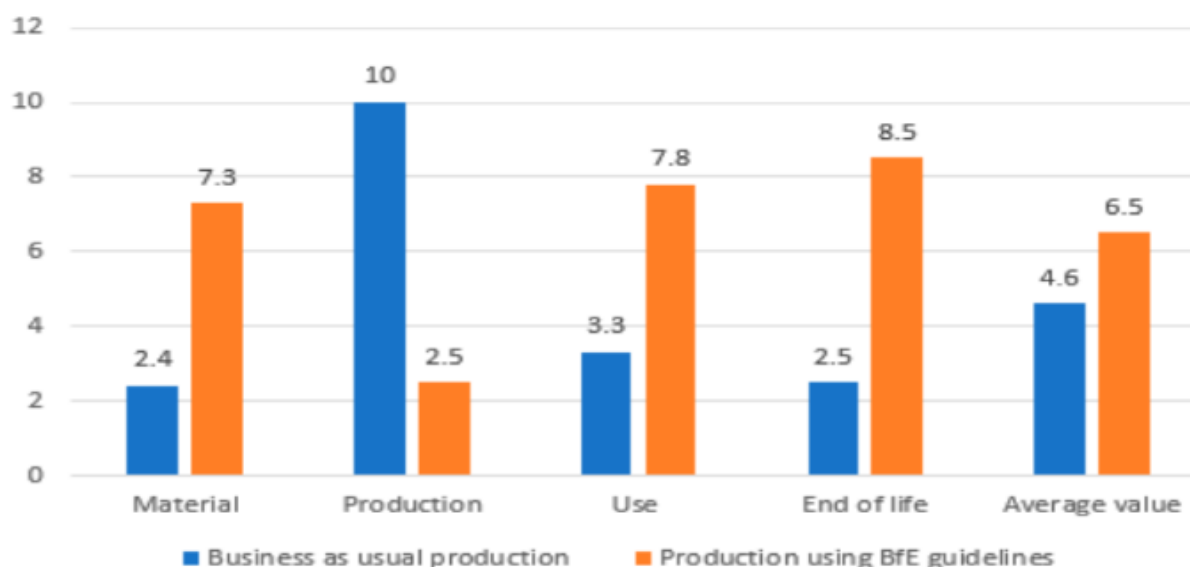
Na África, foi registrado que apenas 0,9% dos 2,9 Mt de resíduos eletrônicos gerados foram recolhidos em 2019. O prevalecimento do setor informal na economia africana acarreta problemas severos do ponto de vista da transparência e dados. Nesse sentido, um levantamento de resíduos eletroeletrônicos em diferentes países, mostra que a região da África Oriental (Etiópia, Quênia e Tanzânia), produziu um total de 156.7 kt de REE com 0.8 kg per capita. Já a região da África Central (Angola, Camarões e Congo) produziu um total de 169,8 kt e 2.5 kg per capita, enquanto a região do norte africano (Egito, Argélia e Marrocos) produziu 1058.9 kt para 5.4 kg per capita, com destaque para o Egito. A região sul (África do Sul, Botswana, Namíbia) produziu um total de 450 kt para 6.9 quilo toneladas per capita. Por fim, a região ocidental (Nigéria, Gana, Costa do Marfim) é responsável por 544,2 kt e 1.7 kg per capita.

O artigo traz ainda um panorama sobre os sistemas de coleta de lixo eletrônico nos países desenvolvidos, classificando-os em sistemas coletivos (instituições sem fins lucrativos e governamentais) e sistemas de câmaras de compensação (competição no mercado para oferecer serviços). Os sistemas de coleta podem ser municipais, com varejo e coleta diretamente do produtor.

Alguns dados disponíveis listam quatro principais empresas envolvidas na reciclagem: Atlantic Recycling (reparo e utilização), FIDEV Recycling (desmantelamento e comércio de sucatas metálicas), Blancomet Recycling (desmantelamento e comercialização de sucatas metálicas) e City Waste Recycling. Dados da África do Sul evidenciam a coleta de 17.733 toneladas de resíduos eletroeletrônicos (79% compostos eletrônicos de consumo) em 2015, realizados por 27 empresas. No Quênia e no Egito, empresas emergentes (Technology Group International, Recycle Bekia e Eco Integrated Industrial System) foram responsáveis pela reciclagem formal e informal de produtos gerados por assinantes móveis identificados. O fluxo transfronteiriço de resíduos eletroeletrônicos evidencia os movimentos de importação legal e ilegal de resíduos para o continente Africano, dificultando processos de combate à dispersão dos resíduos e contaminação e materiais (desejados e indesejados). A Nigéria é o primeiro país do continente a receber uma unidade para fabricação de smartphones.

A elaboração de melhores produtos para desmontagem manual consiste na utilização das métricas para Conceito de Produtos com Design Sustentável, elaboradas por Han (2021) onde se confirma a sustentabilidade do produto através de avaliação do material, produção, utilização e fim do ciclo de vida. O artigo analisa os smartphones no mercado africano pois são os dispositivos com capacidade de reutilização e desmontagem mais presentes no cotidiano do continente. As categorias métricas (material, produção, utilização e fim do ciclo de vida) são utilizadas junto a equações e os parâmetros são definidos de acordo com as diretrizes que auxiliam a comunidade internacional a definir os critérios para inserção ou não de determinados produtos no mercado global a partir do Design, considerando que vários desses produtos escoam também para o continente africano. Os autores são responsáveis pelo estabelecimento de processos de escalonamento mais intuitivos onde o valor final para cada métrico presente na Figura 7 (avaliação para telefones celulares) decai para uma variação de 1 (sustentabilidade ruim) para 10 (sustentabilidade boa). Na Figura 7 compara os valores de métricas (Materiais, Produção, Utilização, Fim do ciclo de vida, Valor médio do produto), das práticas atuais de produção com os processos de ecodesign alternativo (DfE ou BdE), exprimindo a boa classificação ambiental do método alternativo, mesmo com algumas métricas abaixo do esperado. Os métodos para a construção das alternativas ambientalmente corretas compensam à medida que o design de diversos dispositivos de equipamentos eletroeletrônicos também pode ser adaptado e avaliado para minimizar os impactos ambientais e custos no processo de reciclagem e descarte.

Figura 7 – Visão de categoria métrica com relação à sustentabilidade de um telefone celular.



Fonte: Han, 2021.

Legenda: Material = Materiais; Production = Produção; Use = Utilização; End of Life = Fim de vida; Average value = Valor médio; Business as usual production = Produção empresarial costumeira; Production using BfE guidelines = Produção usando diretrizes BfE

Empresas buscam alternativas para aprimorar a organização e gerenciamento dos resíduos eletroeletrônicos na África: a HP é um exemplo de empresa que oferece listagem dos fornecedores e recicladores para aprimoramento dos padrões sociais e ambientais e fornece serviços de devolução para clientes em diversos países, entre vários outros exemplos. Os autores realizaram comparações para entender a dinâmica dos diferentes resultados entre as gestões nos diferentes continentes e suas disparidades com base em literatura e entrevistas com as partes interessadas, demonstrando dificuldades em articular o setor formal no estabelecimento de centros de coletas e desmanche, perdendo capacidade de explorar o potencial dos materiais no continente.

. No Quadro 1 são elencadas as melhores práticas abordadas:

Quadro 1 – Quadro com práticas atuais, de curto, médio e longo prazo.

Melhores práticas recomendadas	
Práticas atuais	Com base na prática atual em países africanos, uma parcela significativa dos resíduos é importada ilegalmente, causando danos significativos à população e ao meio ambiente. No curto prazo, essa atividade precisa ser efetivamente e completamente proibida, monitorada e sancionada por leis nacionais e internacionais.
Curto prazo	A estratégia de curto prazo (dentro de 5 anos) deve se concentrar em melhorar a situação atual, implementando uma estratégia abrangente e eficiente de coleta e logística que envolva todas as partes interessadas. Isso deve ser acompanhado pelo monitoramento e conscientização de todos os atores envolvidos no processo para garantir o manuseio adequado dos resíduos e promover a saúde e a segurança ambiental. Além disso, motivados pela necessidade de minimizar o impacto ambiental dos resíduos, diversas mudanças tecnológicas foram realizadas. Entre elas, estão: • A substituição de telas de CRT por telas de LCD; • A introdução de fibras; • A introdução de baterias recarregáveis. Todas essas mudanças e suas consequências precisam ser consideradas durante a melhoria. Um processo de desmontagem manual bem-organizado e estruturado para produtos que não são devolvidos também fará parte de uma estratégia sustentável de reciclagem de sucata africana.
Médio prazo	A estratégia de médio prazo (de 6 a 30 anos) envolve a organização gradual do reprocessamento de resíduos eletrônicos até a reciclagem. Isso inclui a redução de aterros sanitários, a organização dos serviços de manuseio e utilização de resíduos por empresas de resíduos em todo o país, a melhoria da coleta de resíduos perigosos, a garantia de que a embalagem e a rotulagem de resíduos perigosos estejam em conformidade com a legislação específica, o transporte de resíduos perigosos apenas para aterros sanitários que não podem tratá-los, o tratamento de tipos específicos de resíduos perigosos na África, a estabilização das quantidades de resíduos usando taxas/impostos e a redução adicional de resíduos. Um sistema de coleta seletiva (EPR) eficaz ou uma combinação de desmontagem manual e mecânica, redução mecânica de tamanho e sistemas de triagem sequencial devem ser utilizados para obter fluxos de saída não homogêneos. No final do processo. Com a tecnologia fotovoltaica sendo parte da solução para energia renovável, sua reciclagem se tornará um desafio em 15 anos devido à grande quantidade de painéis solares obsoletos. Projetos-piloto em cooperação com produtores (EPR) e o Plano de Ação para Mudanças Climáticas (2021-2025) do Grupo Banco Mundial (GBM) devem ser implementados. Possibilidades financeiras devem ser utilizadas para estabelecer uma política e legislação transitória que considere os problemas de gestão de resíduos para o desenvolvimento sustentável na África. O sistema educacional deve ser reformado, começando com um programa adequado de gestão de resíduos e incentivar a redução, a reutilização, o reparo e a reciclagem para aumentar a vida útil dos produtos e economizar recursos.
Longo prazo	A estratégia de longo prazo (de 31 a 50 anos) consiste no processamento final, que representa um desafio técnico e econômico para o tratamento de resíduos de máquinas. Diversos processos, como termopirometalúrgico, químico e metalúrgico, são utilizados para a eficiência de materiais e/ou recuperação de energia. A Umicore Precious Metal Refining, na Bélgica, tem capacidade para produzir 2.400 toneladas de prata, 100 toneladas de ouro, 25 toneladas de paládio e 25 toneladas de platina por ano, e o custo do investimento para os processos metalúrgicos é superior a 500 milhões. Conhecimento técnico e grandes investimentos são necessários para alcançar esta etapa, e muitos países africanos não têm capacidade para fazê-lo sozinhos. A filosofia "O Melhor dos Dois Mundos (Bo2W)" pode ser uma abordagem de solução para Países africanos, ou muitos países, podem se unir e construir a usina correspondente às suas necessidades. A filosofia "Melhor de Dois Mundos (Bo2W)" sugere uma solução de rede pragmática para a gestão de resíduos em economias emergentes, que buscam a integração técnica e logística do "melhor" pré-processamento manual baseado na desmontagem de sucata em países em desenvolvimento e o "melhor" tratamento de processamento final de frações perigosas e complexas em instalações dedicadas em países desenvolvidos. As tecnologias existentes devem ser usadas para reciclar os resíduos minimizados, o que ocorre quando os produtos EEE chegam ao fim de seu ciclo de vida. O objetivo é reduzir gradual e significativamente esses resíduos, melhorando seu aterro e levando o tratamento de resíduos elétricos e eletrônicos da África para seu estado embrionário.

Fonte: Adaptado de Massa e Archodoulaki, 2023.

Os autores realizaram comparações para entender a dinâmica dos diferentes resultados entre as gestões nos diferentes continentes e suas disparidades com base em literatura e entrevistas com as partes interessadas, demonstrando dificuldades em articular o setor formal no estabelecimento de centros de coletas e desmanche, perdendo capacidade de explorar o potencial dos materiais.

O valor das matérias primas presentes nos resíduos eletroeletrônicos gerados na África pode chegar na casa das dezenas de bilhões, evidenciando o potencial desperdiçado. Os autores discutem também a utilização da “Teoria do Comportamentos Planejado” ou “Controle Comportamental Percebido” para influenciar no comportamento social para prevenção dos resíduos e aumento da percepção das pessoas com relação à geração e descarte de resíduos. Essas operações de cunho comportamental podem ser elaboradas por gestores ambientais, psicólogos sociais e cientistas sociais. Também são apontados em discussão a necessidade de os designers de produtos considerarem a trajetória dos fluxos de resíduos para países em desenvolvimento e as limitações locais (aplicações regulatórias frágeis e inconsistentes), contribuindo para diminuição das substâncias tóxicas primárias, suas emissões e designs que facilitem o processo de desmontagem (predominantemente informal nos países em desenvolvimento).

As civilizações africanas acabam por evidenciar a necessidade de compreenderem não só as oportunidades com relação aos resíduos e produtos eletroeletrônicos, mas o desenvolvimento de políticas e iniciativas envolvendo as mídias sociais, agendas culturais e ações governamentais que compartilhem o conhecimento junto a uma articulação entre diversos setores. Os autores destacam também os esforços das instituições de caráter global em garantir instâncias reguladoras para sistemas de coleta e gerenciamento dos resíduos eletroeletrônicos, promovendo estimativas globais, continentais, nacionais, regionais e municipais. O grande exemplo de instituição a nível global com esse funcionamento é o Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA), que traz balanços não só do ponto de vista institucional e educacional, mas também ponderações sobre a cadeia de processamento de resíduos e economia circular.

5.4 Electronic waste in Brazil: Generation, collection, recycling and the covid pandemic, Brasil (2022)

O estudo foca no processo de elaboração do arcabouço jurídico que institui as políticas públicas para resíduos eletroeletrônicos (REEE) no Brasil, analisando geração, coleta, os processos de triagem, descarte ou reutilização. Busca ainda avaliar atividade econômica envolvendo a obtenção de materiais valiosos (ouro, prata, metais terras raras etc.) e seus impactos socioambientais. No ano de 2019, a estimativa para produção total de REEE no país era de aproximadamente 54 milhões de toneladas, com média global de 7,3 kg/pessoa por ano e tendência de elevação da taxa anual. Esse aumento pode ser explicado pela obsolescência dos produtos, preferências por novos gadgets e desvalorização.

No Brasil, o principal alicerce que compõem as diretrizes para gerenciamento de resíduos é a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), responsável pelo estabelecimento da logística reversa de resíduos eletroeletrônicos. A legislação, consolidada em 2010, promove a articulação compartilhada e a responsabilização mútua entre os diferentes setores da sociedade pensando em toda a cadeia de produção e consumo. Do ponto de vista dos resíduos eletroeletrônicos, as limitações com relação aos instrumentos para execução dos sistemas de logística reversa são evidenciadas devido às dimensões continentais do país, onde o descarte inadequado, a importação ilegal e aspectos comportamentais dos consumidores e produtores dificultam o estabelecimento desses sistemas mesmo após 11 anos. Verificou-se aumento vertiginoso do consumo per capita de equipamentos eletroeletrônicos (aumento de 6,7 kg entre 2005 e 2016). O país busca adequações através do compromisso com acordos setoriais e convenções internacionais, participando da convenção de Basileia e realizando acordos entre setores para execução das ferramentas de logística reversa e economia circular.

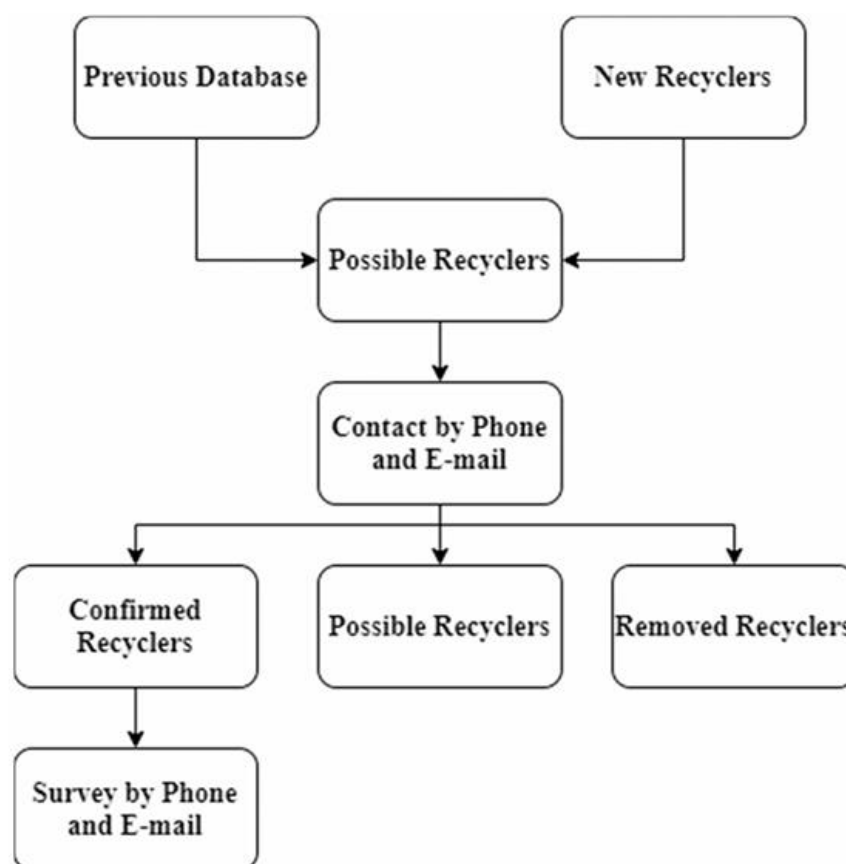
Diversos estudos buscam avaliar a eficácia das medidas estabelecidas para o gerenciamento dos resíduos eletroeletrônicos. Em 2022, foram avaliados traços comportamentais dos consumidores a partir de entrevistas, evidenciando que apenas 9% dos entrevistados fazem a triagem dos resíduos, embora quase a totalidade das pessoas entrevistadas admitam a necessidade de sistemas eficientes de coleta e reciclagem (96% dos entrevistados). Existe o interesse dos consumidores em separar,

coletar e reciclar esses tipos de resíduos, mas a ineficiência dos sistemas estabelecidos acaba inviabilizando os processos, piorando o cenário com o aumento da taxa real de obsolescência e diminuição da vida útil. O ciclo de vida de um smartphone, por exemplo, pode se encerrar em até 2 anos, tensionando os sistemas de logística reversa. Esses avanços ocasionados pelo aumento do grau de complexidade através da inovação de design dos produtos e das linhas de produção no mercado global trazem desafios para os sistemas de desmontagem, mas podem aquecer mercados de reutilização e recondicionamento dos produtos, aumentando o tempo de retenção.

No Brasil, a reciclagem dos resíduos eletroeletrônicos depende da participação dos catadores, característica importante dos países em desenvolvimento. Os procedimentos realizados em mercados informais são mais insalubres e com alto grau de impacto ambiental, resultados de fiscalizações fracas. Características intrínsecas do processo de obtenção dos materiais a partir da desmontagem é a separação do plástico e dos metais. O Brasil não recicla placas de circuito impresso (PCBs) e baterias íons de lítio, que exigem determinado tipo de tecnologia ainda inexistente em nível de mercado brasileiro. Isso acarreta exportação desses materiais e metais para América do Norte, Europa e Ásia, por exemplo.

Foi elaborado um estudo que consistiu em um levantamento de informações a respeito dos fluxos de reciclagem e de logística reversa no Brasil, realizando levantamentos sobre identidade, distribuição dos recicladores, procedimentos e disposição dos materiais em escala nacional e as respectivas instituições. A metodologia desenvolvida é capaz de combinar a base de dados para o mais recente estudo, conforme descrito na Figura 8.

Figura 8 – Metodologia utilizada para combinação e comparação dos estudos, publicados em 2018 e 2022.



Fonte: Dias, 2022.

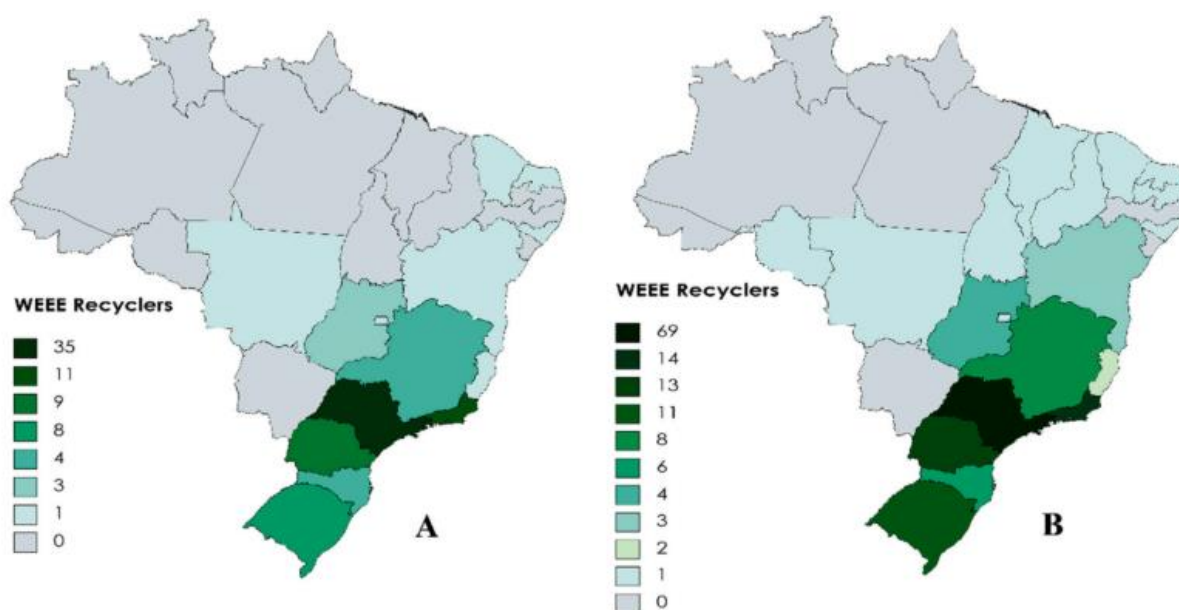
Legenda: Previous Database = Dados prévios; New Recyclers = Novos Recicladores; Possible Recyclers = Possíveis Recicladores; Contact by Phone and E-mail = Contato por telefone e email; Confirmed Recyclers = Recicladores Confirmados; Possible Recyclers = Possíveis Recicladores; Removed Recyclers = Recicladores Removidos; Survey by phone and email = Pesquisa por telefone e email.

A atualização dos dados foi realizada a partir do rastreamento e identificação das empresas que surgiram entre um estudo e outro, verificando parceiros e concorrentes, recicladores e seus procedimentos. As empresas disponíveis nos bancos de dados passam pelo processo de confirmação das atividades envolvendo resíduos eletroeletrônicos através da pesquisa online, telefone ou email, verificando se houve mudança de setor, concordata ou alteração do escopo (destinação final sem processamento etc.). Um questionário envolvendo as empresas confirmadas ativas, com respostas discursivas, de múltipla escolhas e caixa de seleção foi disponibilizado para obtenção de informações geográficas, volume de resíduos, detalhamento das atividades e destinação dos materiais residuais processados. As respostas foram

compiladas e a margem de erro associada à pesquisa calculada com base do nível de confiança em 95%, com variabilidade limite de 0.5, sendo os resultados correlacionados utilizando o coeficiente de Pearson.

Os resultados consistem em um balanço positivo de 6 novos recicladores com relação ao último estudo, com a distribuição regional focalizada no Sul e no Sudeste, representados na Figura 9. O coeficiente de Pearson foi novamente utilizado, buscando correlações entre distribuição de recicladores, população total, atividade industrial (processadoras por quantidade de habitante) e PIB per capita, evidenciando a alta correlação entre quantidade de recicladores e população, e correlação positiva. O estudo apontou para diminuição dos recicladores na região norte (Amazônia), diminuição nas regiões Sul e Nordeste (Paraná, Santa Catarina e Bahia) e aumento de recicladores na região Sudeste. Os autores traçaram a correlação entre a pandemia e o número de recicladores, mas os dados apresentaram um coeficiente de valor desprezível (menor que 0.5): 0.2 para recicladores por número de casos e 0.1 para recicladores por número de mortes, coeficiente para recicladores por número de habitantes foi de 0.7. As pesquisas envolvendo procedimentos de reciclagem trabalharam com baixa amostragem, pois apenas 42 das 140 empresas contatadas responderam.

Figura 9 – Distribuição de recicladoras consultadas.

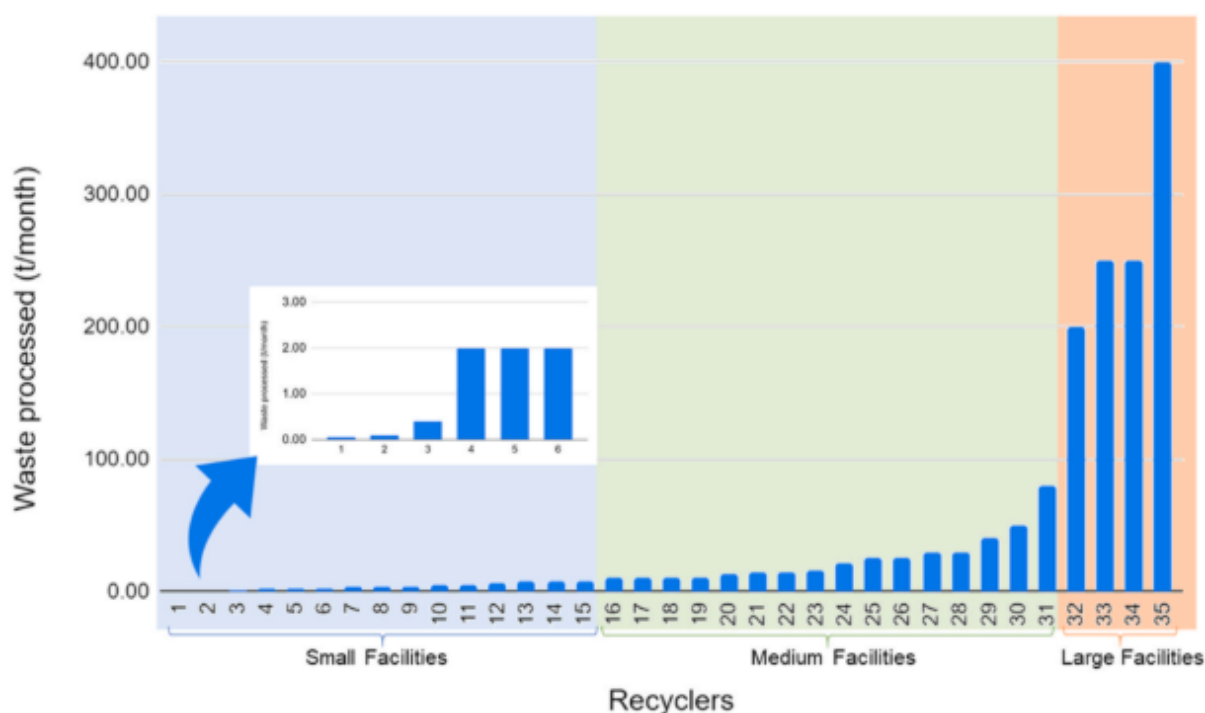


Fonte: Dias, 2022.

Legenda: A) Quantidade de recicladoras confirmados por estado. B) Distribuição de recicladores confirmados e possíveis não confirmados.

O cálculo médio da quantidade mensal de resíduo eletrônico processado foi aproximadamente 44.5 toneladas com mediana de 10 toneladas mensais, resultado da resposta de 35 empresas, com variância significativa na dimensão dos recicladores. As instalações são classificadas em três categorias: instalações menores (menos de 10 toneladas métricas/mês), instalações médias (10 a 100 toneladas/mês) e instalações grandes (mais de 100 toneladas métricas/mês), sendo a última classificação responsável por aproximadamente 70% do processamento de resíduos eletroeletrônicos. A distribuição por quantidade processada é elucidada na Figura 10.

Figura 10 – Toneladas mensais processadas por recicladoras confirmadas, junto às categorias de instalação.



Fonte: Dias, 2022.

Legendas: Waste processed = Lixo processado; Recyclers = Recicladores; Small Facilities = Pequenas instalações; Medium facilities = Instalações de médio porte; Large Facilities = instalações grandes.

Segundo Forti et al. (2020), dados dos autores mostram 1600 toneladas produzidas por mês. Porém, quando considerado o país inteiro (inclusive as empresas que não responderam), são geradas 6400 toneladas/mês. o último valor mencionado representou 3,6% do total de resíduos processados. Alguns aspectos envolvem a diminuição das empresas recicladoras e do volume reciclado, como a diminuição da

frota logística e dos funcionários devido à pandemia de COVID-19. Com relação aos métodos de coleta de lixo, a maior parte das empresas assumiram acordos com empresas terceiras para intermediação com consumidores (31 de 42) em métodos de coleta que consistiam em locais de descarga, acordos com diferentes esferas de governo, catadores e feiras de coleta, coletas em ferros velhos ou eventos de coleta.

Os principais canais de coleta elencados pelo artigo foram parceiros com outras empresas (empresa-empresa), transferência direta de resíduos (consumidor – empresa), centros de entrega (ou centros de coleta), parceria com governos locais e maiores esferas, catadores, eventos, entre outros. Os dados sobre ferramentas utilizadas foram comparados, constatando uma melhoria da qualidade das ferramentas e equipamentos para o processamento dos resíduos para os recicladores e catadores. Moinhos e trituradores passaram a ser mais utilizados de maneira geral, junto a processos de separação magnética, densidade ou separação eletrostática (métodos mais avançados). Do ponto de vista das ferramentas convencionais para recicladores, as mais utilizadas são chaves de fendas, empilhadeiras, furadeiras de bancada e serras circulares. De acordo com o levantamento dos autores, cerca de 26% dos recicladores passaram a utilizar métodos mais avançados de processamento para o período de 2020-2021. Também foi relatado que a maioria dos entrevistados usam ferramentas manuais e procedimentos mais rudimentares (maioria das instalações), sem processos automatizados, e que 89% dos entrevistados para o período 2020-2021 utilizam empilhadeiras. A pesquisa realizada confirma que apenas 4,7% são instalações automatizadas e 81% dos consultados realizam apenas a desmontagem. Do ponto de vista dos processos, a correlação entre processos modernos e tamanho das instalações é diretamente proporcional.

Outro tópico abordado foi o de encaminhamento de resíduos. A venda de resíduos pode gerar receita significativa e os materiais são vendidos enquanto commodities, com grandes recicladores realizando estoques e os menores vendendo mais rapidamente. Cerca de 88% das 36 empresas entrevistadas realizam a venda desse tipo de material e a porcentagem que não é vendida são resíduos com materiais fora do escopo ou materiais sem capacidade de reaproveitamento. Materiais não processados abastecem principalmente o mercado interno (78% de 32 empresas), mas podem ser exportados depois. Cerca de 22% das empresas entrevistadas são exportadores e os principais países importadores de commodities oriundas de resíduos eletroeletrônicos no Brasil são Estados Unidos da América, Bélgica,

Alemanha, China e Inglaterra, com a predominância do processo de exportação para empresas de menor escala. Os materiais que não são redirecionados ou reaproveitados vão em sua maioria para aterros de resíduos perigosos e o restante para lixo doméstico comum.

Para os autores, as bases de dados governamentais acabam não sendo confiáveis (desatualizadas, mal classificadas e com problemas com o setor informal). Falhas nos registros de recicladores passam a acontecer devido aos problemas de identificação ocasionados pela atividade de determinados grupos informais ou clandestinos onde não há conhecimento da população e rastreamento através das redes de logística reversa existentes. Estudos também apresentaram relações entre demografia, regiões e PIB de negócios voltados à gestão de lixo eletrônico. As empresas de reciclagem buscam se estabelecer nessas regiões na qual há disponibilidade de matéria prima, infraestrutura e demanda. Sistemas de coletas desorganizados que proporcionam baixa confiança acabam impedindo boas articulações no interior do país, necessitando intervenção governamental. De maneira geral e junto a esse raciocínio, o crescimento das novas instalações é focado principalmente no Sudeste.

Os procedimentos e instrumentos mais sofisticados se concentram nas maiores instalações, responsáveis pela maior parte do material reciclado no país (70%), com menor número total de recicladores (11%) e maior capacidade de processamento, evidenciando as vantagens em infraestrutura. A necessidade de melhoria dos sistemas, infraestrutura e reciclagem é visível através do aumento do número de exportadores de resíduos de maior valor.

O desenvolvimento das legislações, acordos e normas buscam solucionar os problemas com relação aos resíduos eletroeletrônicos. A carência de dados e a identificação de todos os processos, fornecedores e recicladores atrapalham a eficiência dos sistemas formais elaborados.

5.5 Discussão

Nos artigos abordados, são evidenciadas as principais questões que permeiam os sistemas de gerenciamento de resíduos eletroeletrônicos. Os mecanismos e instituições de gerenciamento da Índia e do Brasil salientam a importância de

incorporar o setor informal devido às estruturas flexíveis, alta insalubridade e terceirizações, dificultando a capacidade integrativa da Responsabilidade Estendida do Produtor, corroborando preocupação com os processos perigosos nas legislações abordadas em 2010 (Brasil) e 2011 (Índia). Essa realidade é frequentemente abordada no artigo sobre o continente Africano, mostrando algumas ações empresariais no Quênia e no Egito para identificação de catadores através de assinantes móveis identificados, com elevada participação do setor privado na execução desse tipo de atividade.

Um grande contraste apresentado entre a Índia, Brasil e continente Africano com relação a Europa foi na tecnologia apresentada, sendo a realidade dos países em desenvolvimento corroborada pela falta de tecnologia para processamento dos diferentes tipos de REEE, mas principalmente Placas de Circuito Impresso (PCIs). No artigo que aborda o Brasil, fica evidente a utilização de ferramentas básicas para os procedimentos de reciclagem, sendo a maior parte de REEEs processados por grandes instalações, e menores instalações utilizando moinhos, trituradores e separação magnética, por densidade e eletrostática, porém sem o processamento de PCIs. Na Índia, segundo estudo apresentado, existem algumas tecnologias de baixo custo para processamento de PCIs em instalações, com limitações que acarretam exportação desse tipo de resíduos. O desequilíbrio regional entre as instalações são problemas apontados em ambos os estudos (Índia e Brasil).

Apesar da primazia ambiental das instituições pertencentes à União Europeia, as taxas de coleta dos REEE separados foi de 35% para 76% dos que realizaram separação, mostrando certo grau de dificuldade em garantir o sucesso das políticas estabelecidas. No entanto, ferramentas de bonificações, compensações e mecanismos de abordagem comportamental passam a ditar tendências nos demais países. No continente africano, por exemplo, foi sugerida a implementação de instituições que busque a promoção de tais sistemas de gerenciamento, junto às instituições privadas.

6. CONCLUSÃO

Observando a tendência nos estudos apresentados, é consensual que os países e regiões abordados nos artigos se baseiam nas convenções internacionais da Organização das Nações Unidas (ONU) e da Organização para a Economia, Cooperação e Desenvolvimento (OCDE), evidenciando o processo de desenvolvimento das legislações e regulamentações. De maneira geral, o que se verificou foi a ampla utilização do mercado informal na maioria dos países em desenvolvimento, assim como o estabelecimento da Responsabilidade Estendida do Produtor (EPR), taxas para reciclagem e utilização de fundos para o incentivo ao desenvolvimento de tecnologias e ferramentas de processamento.

Os desequilíbrios com relação as tecnologias para processamento são compreendidos nos fluxos de resíduos eletroeletrônicos oriundos dos países da Europa para países em desenvolvimento. Nesse contexto, mostra-se a problemática das Placas de Circuito Impresso (PCIs), metais raros e aparelhos obsoletos, com fluxos de resíduos eletroeletrônicos através de importação legal e ilegal. As tecnologias e instalações mais rudimentares nos países mais pobres, sugerem que os países em desenvolvimento exportem os aparelhos e peças com maior valor agregado (maior quantidade de metais raros e maior complexidade no design) para os países ricos e asiáticos. Pode-se concluir que esse sistema acaba beneficiando os países ricos, que obtêm a garantia do retorno através dos fluxos de resíduos de menor valor e obtenção dos resíduos de maior sofisticação.

O grande desafio para os países, em um contexto geral, é a criação e sofisticação das instituições para convenção e cooperação global acerca do tema. A fiscalização da qualidade de trabalho, cadeias de produção e cumprimento dos sistemas de logística reversa são mais dificultosas devido à instabilidade jurídica e institucional dos países em desenvolvimento. Esse tipo de discussão, em um cenário global poderia proporcionar um novo paradigma para custeio de tecnologias para processamento e sistemas de gestão diferenciados, com identificação e monitoramento dos dispositivos, com instalações planejadas que possam absorver os diferentes tipos de design de produtos através de uma articulação conjunta do setor empresarial e das instituições governamentais.

REFERÊNCIAS

ABINEE. Faturamento Setor Eletrônico. **Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica**, 2022. Disponível em: <<http://www.abinee.org.br>>. Acesso em: 20 de outubro de 2023.

ACOSTA, A.; WEGNER, D.; PADULA, A. D. Logística reversa como mecanismo para redução do impacto ambiental originado pelo lixo informático. **Revista Eletrônica de Ciência Administrativa (RECADM)**, Porto Alegre, v. 7, n. 1, p. 1-12, maio 2008. Disponível em: <<https://www.periodicosibepes.org.br/index.php/recadm/article/view/67/209>>. Acesso em: 15 de outubro de 2023.

ALVAREZ-DE-LOS-MOZOS, E.; RENTERIA, A.; Collaborative Robots in e-waste Management. **Procedia Manufacturing**, Bilbao, Spain, v. 11, p. 55-62, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.133>. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2351978917301339>>. Acesso em: 9 de novembro de 2023.

ARANTES, M. V. C.; PEREIRA, R. S. Análise Crítica dos 10 Anos de Criação e Implementação da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) no Brasil. **Revista Linceu**, São Paulo, v. 11, n. 1, p. 49-66, 2020. ISSN 2179-5975.

BERNARDO, O. O.; SOUZA, M. T. A.; DEMAJOROVI, J. Inovação na cadeia reversa de resíduos eletroeletrônicos: um estudo sobre os sistemas de informação e as tecnologias de rastreamento. **Rev. Adm. Empresa.**, São Paulo, v. 60, n. 4, p. 5, jul.-ago. 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S0034-759020200402>>. Acesso em: 15 de outubro de 2023.

BRASIL. Decreto nº 10.240, de 12 de fevereiro de 2020. Altera o Decreto nº 9.662, de 1º de janeiro de 2019, que regulamenta o benefício de prestação continuada da pessoa com deficiência e da pessoa idosa de que tratam a Lei nº 8.742, de 7 de dezembro de 1993, e a Lei nº 12.435, de 6 de julho de 2011. **Diário Oficial da União, Poder Executivo**, Brasília, DF, 13 fev. 2020. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2020/decreto/d10240.htm>. Acesso em: 18 de novembro de 2023.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Poder Executivo**, Brasília, DF, 3 ago. 2010. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.html>. Acesso em: 18 de novembro de 2023.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução CONAMA nº 5, de 5 de agosto de 1993. Estabelece procedimentos para o licenciamento de atividades poluidoras. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, p.5. Disponível em: <https://conama.mma.gov.br/?option=com_sisconama&task=arquivo.download&id=130>. Acesso em: 4 de novembro de 2023.

CASTRO, I. E. O conceito de espaço na análise geográfica. **Revista Acadêmica Oswaldo Cruz**, Rio de Janeiro, v. 1, n. 27, p. 45-62, 2021. Disponível em: <https://www.oswaldocruz.br/revista_academica/content/pdf/Edicao27_Inae_Castro.pdf>. Acesso em: 18 de novembro de 2023.

CASTRO, I. E. O descarte do lixo eletrônico e seus impactos ambientais. **Revista Acadêmica Oswaldo Cruz**, Rio de Janeiro, v. 1, n. 27, p. 45-62, 2021. Disponível em: <https://www.oswaldocruz.br/revista_academica/content/pdf/Edicao27_Inae_Castro.pdf>. Acesso em: 19 de novembro de 2023.

CONSENZA, J. P.; ANDRADE, E. M.; ASSUNÇÃO, G. M.. Economia circular como alternativa para o crescimento sustentável brasileiro: análise da Política Nacional de Resíduos Sólidos. **Revista de Gestão Ambiental e Sustentabilidade - GeAS**, São Paulo, v. 9, n. 1, p. 1-30, 2020. DOI: 10.5585/geas.v9i1.16147. Disponível em: <<https://periodicos.uninove.br/geas/article/view/16147>>. Acesso em: 7 de novembro de 2023.

CONTADOR, L. S. Paradoxos da logística reversa de resíduos eletroeletrônicos e a mineração urbana no Brasil. **Rev. Tecnol. Soc.**, Curitiba, v. 18, n. 53, p. 141-153, seção temática, 2022. Disponível em: <<https://periodicos.utfpr.edu.br/rts/article/view/15790>>. Acesso em: 13 de outubro de 2023.

DEMAJOROVIC, J.; AUGUSTO, E. E. F.; SOUZA, M. T. S. Reverse logistics of e-waste in developing countries: challenges and prospects for the Brazilian model. **Ambiente & Sociedade**, São Paulo, v. 19, n. 2, p. 1-20, abr.-jun. 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/1809-4422ASOC141545V1922016>>. Acesso em: 16 de outubro de 2023.

DEUS, R. M.; BATTISTELLI, R. A. G.; SILVA, G. H. R. Resíduos sólidos no Brasil: contexto, lacunas e tendências. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 20, n. 4, p. 685-698, out./dez. 2015. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/esa/a/jLnBfyWrW7MPPVZSz46B8JG/>>. Acesso em: 10 de outubro de 2023.

DIAS, Pablo et al. Electronic waste in Brazil: Generation, collection, recycling and the covid pandemic. **Cleaner Waste Systems**, São Paulo, v. 3, p. 100022, 2022. DOI: 10.1016/j.clwas.2022.100022. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772785922000229>>. Acesso em: 30 de novembro de 2024.

ELANGO VAN *et al.* Deep learning based multiclass segregation of e-waste using hardware software co-simulation. In: ASIAN CONFERENCE ON INTELLIGENT COMPUTING AND DATA SCIENCES (ACIDS), 2021. **Journal of Physics: Conference Series**. Canadá: IOP Publishing, v. 1997, p. 012039, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1997/1/012039>. Disponível em: <<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1997/1/012039>>. Acesso em: 8 de novembro de 2023.

FAWOLEE, et al. Climate change implications of electronic waste: strategies for sustainable management. **Bulletin of the National Research Centre**, v. 47, n. 147, 2023. Disponível em: <<https://bnrc.springeropen.com/articles/10.1186/s42269-023-01124-8>>. Acesso em: 7 de novembro de 2023.

FGV - Fundação Getúlio Vargas. Uso de TI no Brasil: país tem mais de dois dispositivos digitais por habitante, revela pesquisa. **Portal FGV Notícias**, maio 2023. Disponível em: <<https://portal.fgv.br/noticias/uso-ti-brasil-pais-tem-mais-dois-dispositivos-digitais-habitante-revela-pesquisa>>. Acesso em: 20 de outubro de 2023.

FGV (Fundação Getulio Vargas); FGV/CIA (Centro de Inteligência Artificial). **Pesquisa Setorial de Tecnologia da Informação (PESTI) – 2023**. São Paulo: FGV EAESP, 2023. p. 17. Disponível em: https://eaesp.fgv.br/sites/eaesp.fgv.br/files/u68/pesti-fgvcia-2023_0.pdf. Acesso em: 20 de outubro de 2023.

FORMENTIN, J.; SANTOS, F. Lixo eletrônico: conscientizar, reaproveitar e reciclar. **Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC/CEAVI)**, Santa Catarina, 2013.

FORTI, V.; BALDÉ, C. P.; KUEHR, R.; BEL, G. **The Global E-waste Monitor 2020: Quantities, flows and the circular economy potential**. Bonn, Geneva and Rotterdam: United Nations University (UNU)/International Telecommunication Union (ITU) & International Solid Waste Association (ISWA), 2020. 120 p.

FRANCO *et al.* Danos causados à saúde humana pelos metais tóxicos presentes no lixo eletrônico. **Diversitas Journal**, Santana do Ipanema/AL, v. 6, n. 2, p. 2025-2039, abr./jun. 2021. ISSN 2525-5215. DOI: 10.17648/diversitas-journal-v6i2-1626. Disponível em: <https://periodicos.ifal.edu.br/diversitas_journal/>. Acesso em: 25 de novembro de 2023.

GERMAN CO2 tax will soon change European waste streams. **Recycling Magazine**, 5 out. 2023. Disponível em: <<https://www.recycling-magazine.com/2023/10/05/german-co2-tax-will-soon-change-european-waste-streams/>>. Acesso em: 2 de novembro de 2023.

HAN, J.; JIANG, P.; CHILDS, P. R. N. **Metrics for measuring sustainable product design concepts**. **Energies**, Basel, v. 14, n. 12, p. 3469, 2021. DOI: 10.3390/en14123469. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1996-1073/14/12/3469>>. Acesso em: 29 de novembro de 2024.

HERAT, S. **Sustainable Management of Electronic Waste (e-waste)**. **Clean - Soil, Air, Water**, Weinheim, v. 35, n. 4, p. 305-310, 24 set. 2007. DOI: <<https://doi.org/10.1002/clen.200700022>>. Acesso em: 7 de novembro de 2023.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **Electricity Grid and Secure Energy Transitions**. Paris: IEA, 2023. Seção: Grid-scale storage. Disponível em: <<https://www.iea.org/energy-system/electricity/grid-scale-storage>>. Acesso em: 22 de outubro de 2023.

KEMERICH *et al.* Impactos ambientais decorrentes da disposição inadequada de lixo eletrônico no solo. **Engenharia Ambiental: Pesquisa e Tecnologia**, v. 10, n. 2, 2013.

Disponível

em: <<http://ferramentas.unipinhal.edu.br/engenhariaambiental/viewarticle.php?id=900&layout=abstract&locale=>>. Acesso em: 18 de Novembro de 2023.

MASSA, G. M.; ARCHODOULAKI, V. M. Electrical and Electronic Waste Management Problems in Africa: Deficits and Solution Approach. *Environments*, Vienna, v. 10, n. 3, p. 44, 2023. DOI: [10.3390/environments10030044](https://doi.org/10.3390/environments10030044). Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2076-3298/10/3/44>>. Acesso em: 29 de novembro de 2024.

MATTOS, K. M. C.; PERALES, W. J. S. Os impactos ambientais causados pelo lixo eletrônico e o uso da logística reversa para minimizar os efeitos causados ao meio ambiente. In: **ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 28., 2008**, Rio de Janeiro. Anais. Rio de Janeiro: ABEPRO, 2008. Disponível em: <http://www.abepro.org.br/biblioteca/enegep2008_TN_STP_077_543_11709.pdf>. Acesso em: 25 de novembro de 2023.

MINAS JR. **Minerais e dispositivos eletrônicos**. Minas Gerais, fev. 2020. Disponível em: <<https://www.minasjr.com.br/minerais-e-dispositivos-eletronicos>>. Acesso em: 10 de outubro de 2023.

NELLES, M.; GRÜNES, J.; MORSHECK, G. Waste management in Germany - development to a sustainable circular economy? In: **INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOLID WASTE MANAGEMENT**, 5., 2015. Anais. ScienceDirect, 2015. Disponível em: <www.sciencedirect.com>. Acesso em: 4 de novembro de 2023.

OLIVEIRA, T. K. S.; JÚNIOR, I. M. P. Política Nacional de Resíduos Sólidos. **Ciências Exatas e Tecnológicas**, Alagoas, v. 4, n. 3, p. 77-84, maio 2018. Disponível em: <<https://periodicosgrupotiradentes.emnuvens.com.br/cdgexatas/article/view/5567>>. Acesso em: 6 de novembro de 2023.

PARAJULY, K.; FITZPATRICK, C.; MULDOON, O.; KUEHR, R. Behavioral change for the circular economy: A review with focus on electronic waste management in the EU. *Recursos, Conservation & Recycling*, Vienna. v. 162, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105033>>. Acesso em: 11 de novembro de 2024.

RIBEIRO, J. G. R. O impacto causado ao meio ambiente pelo descarte incorreto de pilhas e baterias. 2022. **Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) - Centro Universitário UNA**, Pouso Alegre, 2022. Disponível em: <<https://repositorio-api.animaeducacao.com.br/server/api/core/bitstreams/5c159fcf-8af3-4af7-a86a-b9f29949283f/content>>. Acesso em: 26 de novembro de 2023.

RUSSO, M. A. T. **Tratamento de resíduos sólidos**. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2003. Disponível em: <<http://homepage.ufp.pt/madinis/RSol/Web/TARS.pdf>>. Acesso em: 12 de outubro de 2023

SILVA, B. D.; OLIVEIRA, F. C.; MARTINS, D. L. **Resíduos Eletroeletrônicos no Brasil**. Santo André, 2002. Disponível em: <https://bailux.org/wp-content/uploads/2008/04/lixeletronico_draft.pdf>. Acesso em: 10 de outubro 2023.

SRIVASTAV, A. L. Concepts of circular economy for sustainable management of electronic wastes: challenges and management Options. **Environmental Science and Pollution Research**, Alemanha, v. 30, p. 48654-48675, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-023-26052-y>. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s11356-023-26052-y>>. Acesso em: 8 de novembro de 2023.

STATISTA. **Global TV sales volume forecast 2020-2027**. Hamburg, Statista, 2023. Disponível em: <<https://www.statista.com/forecasts/1283864/global-sales-volume-tv>>. Acesso em: 21 de outubro de 2023.

STATISTA. **TV sets sales volume in Brazil by type 2004-2023**. Hamburg, Statista, 2023. Disponível em: <<https://www.statista.com/statistics/525606/tv-sets-sales-volume-in-brazil-by-type/>>. Acesso em: 21 de outubro de 2023.

TOSCHETTO, M. R L. Gerenciamento de resíduos sólidos industriais. Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria, Departamento de Química – CCNE, **Curso de Química Industrial**, Santa Maria, 2005. Disponível em: <<http://www.blogdocancado.com/wp-content/uploads/2012/04/gerenciamento-de-residuos-solidos-industriais.pdf>>. Acesso em: 12 de outubro de 2023.

TURAGA, R. M. R.; BHASKAR, K.; SINHA, S.; HINCHLIFFE, D.; HEMKHAUS, M.; ARORA, R.; CHATTERJEE, S.; KHETRIWAL, D. S.; RADULOVIC, V.; SINGHAL, P.; SHARMA, H. **E-Waste Management in India: Issues and Strategies**. Vikalpa: The Journal for Decision Makers, Ahmedabad, v. 44, n. 3, p. 127-162, 2019.

VANTAGE MARKET RESEARCH. **Consumer Electronics Market Size, Share & Trends Analysis Report**, 2023. Disponível em: <<https://www.vantagemarketresearch.com/industry-report/consumer-electronics-market-1648>>. Acesso em: 20 de outubro de 2023.