



**Universidade Estadual Paulista
"Júlio de Mesquita Filho"**

Programa Interunidades

unesp 

Mestrado

Engenharia Civil e Ambiental

KEITY SYMONNE DOS SANTOS SILVA ABREU

**AVALIAÇÃO DA IMPLEMENTAÇÃO DE INCENTIVOS FISCAIS E/OU
ECONÔMICOS NA LOGÍSTICA REVERSA DE RESÍDUOS
ELETROELETRÔNICOS NO CONTEXTO BRASILEIRO E INTERNACIONAL**

Bauru
2025

KEITY SYMONNE DOS SANTOS SILVA ABREU

**AVALIAÇÃO DA IMPLEMENTAÇÃO DE INCENTIVOS FISCAIS E/OU
ECONÔMICOS NA LOGÍSTICA REVERSA DE RESÍDUOS
ELETROELETRÔNICOS NO CONTEXTO BRASILEIRO E INTERNACIONAL**

Dissertação apresentada como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Área de Concentração Saneamento Ambiental, Linha de pesquisa, Manejo de Resíduos sólidos e Poluição e Controle.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Gabbay de Souza.



Bauru
2025

A162a	Abreu, Keity Symonne dos Santos Silva Avaliação da implementação de incentivos fiscais e/ou econômicos na logística reversa de resíduos eletroeletrônicos no contexto brasileiro e internacional / Keity Symonne dos Santos Silva Abreu. -- Bauru, 2025 113 f. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia, Bauru Orientador: Ricardo Gabbay de Souza 1. Logística reversa. 2. Impostos. 3. Gerenciamento de resíduos. I. Título.
-------	--

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE KEITY SYMONNE DOS SANTOS SILVA ABREU, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL, DA FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE BAURU.

Aos 16 dias do mês de maio do ano de 2025, às 9h, por meio de Videoconferência, realizou-se a defesa de DISSERTAÇÃO DE MESTRADO de KEITY SYMONNE DOS SANTOS SILVA ABREU, intitulada **AVALIAÇÃO DA IMPLEMENTAÇÃO DE INCENTIVOS FISCAIS E/OU ECONÔMICOS NA LOGÍSTICA REVERSA DE RESÍDUOS ELETROELETRÔNICOS NO CONTEXTO BRASILEIRO E INTERNACIONAL**. A Comissão Examinadora foi constituída pelos seguintes membros: Prof.Dr. RICARDO GABBAY DE SOUZA (Orientador(a) - Participação Virtual) do(a) Department of Environmental and Resource Engineering (DTU Sustain) / Technical University of Denmark (DTU), Prof. Dr. SANDRO DONNINI MANCINI (Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia Ambiental / Universidade Estadual Paulista (Unesp) - Instituto de Ciência e Tecnologia - Câmpus Sorocaba, Prof.^a Dr.^a TIAGO TRENTINELLA MORAIS DA SILVA (Participação Virtual) do(a) Faculdade de Direito - Universidade de Mogi das Cruzes (UMC). Após a exposição pela mestrandia e arguição pelos membros da Comissão Examinadora que participaram do ato, de forma presencial e/ou virtual, a discente recebeu o conceito final: APROVADA . Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, foi assinada pelo(a) Presidente(a) da Comissão Examinadora.



Prof.Dr. RICARDO GABBAY DE SOUZA

Dedico este trabalho a Deus, ao meu marido e aos meus filhos, que foram o meu alicerce para que pudesse concluir mais esta etapa.

AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar a Deus, que me concedeu forças, paciência, resistência, principalmente nos momentos em que pensava em desistir.

Agradeço especialmente a minha família. Ao meu marido Rodrigo por sua compreensão e apoio incondicional. Aos meus filhos, Iago e Yasmim, por entenderem que nestes anos de estudo buscava uma melhor qualificação para mim e um melhor futuro para eles. Aos meus pais, por seu amor e compreensão durante esses anos.

Agradeço a minha irmã e colega de profissão, Danielle, pois seu incentivo constante. Agradeço aos amigos e colegas de trabalho que se faziam presentes mesmo com a distância e que entendiam minhas ausências.

Gostaria de expressar minha profunda gratidão ao meu orientador, Professor Doutor Ricardo Gabbay de Souza, por sua orientação, paciência e apoio incondicional ao longo deste processo.

Agradeço também aos professores do programa de pós-graduação, cujas aulas e conselhos foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço a UNESP e todos seus funcionários que sempre estiveram dispostos a ajudar da melhor forma a realização desse trabalho.

RESUMO

A crescente geração de resíduos eletroeletrônicos (REEE), aliada à baixa eficiência da coleta formal e à predominância do setor informal no Brasil, evidencia a necessidade de políticas públicas mais eficazes para a gestão desses resíduos. Países como China e membros da União Europeia implementaram instrumentos econômicos mais robustos, enquanto o Brasil ainda carece de regulamentação prática para incentivos fiscais na logística reversa, o que limita a competitividade do setor formal e a efetividade do sistema. A presente dissertação teve como objetivo analisar a aplicação de incentivos fiscais e/ou econômicos na logística reversa de REEE, tanto no contexto internacional quanto no brasileiro, com ênfase na avaliação de soluções que possam ser adaptadas à realidade nacional. Existe uma falta de estudos que relacionem diretamente incentivos fiscais e econômicos ao desempenho do sistema de logística reversa no Brasil. O presente trabalho está estruturado em dois artigos. O primeiro apresenta uma análise comparativa entre os sistemas de logística reversa da China, Europa e Brasil, com base em uma revisão semi-sistemática da literatura e desenvolvimento de fluxogramas dos fluxos financeiros e de produtos. O segundo artigo aplica o método de dinâmica de sistemas para simular, com o uso do software gratuito Vensim PLE, cenários com e sem incentivos fiscais no Brasil, modelando seus impactos na coleta, reciclagem e destinação inadequada de resíduos. A combinação entre regulamentação clara, incentivos fiscais e financeiros e responsabilidade do produtor possibilitam maior eficiência na coleta e reciclagem formal. No entanto, também se conclui que os incentivos fiscais, se aplicados isoladamente, apresentam impacto limitado, devendo ser integrados a políticas amplas de regulamentação, conscientização e inclusão social. Dessa forma, a dissertação contribui para o debate sobre políticas públicas ambientais, reforçando a importância da combinação entre regulação, estímulo financeiro e planejamento estratégico para a consolidação de um sistema de logística reversa eficaz no Brasil.

Palavras-chave: Logística Reversa; Impostos; Subsídios; Gerenciamento de resíduos; Incentivos Econômicos; Sustentabilidade Financeira; Resíduos Eletroeletrônicos.

ABSTRACT

The increasing generation of Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE), combined with the low efficiency of formal collection and the predominance of the informal sector in Brazil, highlights the need for more effective public policies for managing this type of waste. Countries such as China and members of the European Union have implemented more robust economic instruments, whereas Brazil still lacks practical regulation for tax incentives in reverse logistics, which limits the competitiveness of the formal sector and the effectiveness of the system. This dissertation aims to analyze the application of tax and/or economic incentives in WEEE reverse logistics, both in the international and Brazilian contexts, with an emphasis on evaluating solutions that can be adapted to the national reality. There is a lack of studies that directly link tax and economic incentives to the performance of reverse logistics systems in Brazil. This work is structured into two articles. The first presents a comparative analysis of reverse logistics systems in China, Europe, and Brazil, based on a semi-systematic literature review and the development of flowcharts detailing financial and product flows. The second article applies the system dynamics methodology to simulate, using Vensim PLE software, scenarios with and without tax incentives in Brazil, modeling their impacts on waste collection, recycling, and improper disposal. The combination of clear regulation, fiscal and financial incentives, and producer responsibility fosters greater efficiency in formal collection and recycling. However, the study also concludes that tax incentives, when applied in isolation, have limited impact and should be integrated into broader policies involving regulation, public awareness, and social inclusion. Thus, this dissertation contributes to the debate on environmental public policies, reinforcing the importance of combining regulation, financial incentives, and strategic planning to consolidate an effective reverse logistics system in Brazil.

Keywords: Reverse Logistics; Fees; Subsidy; Waste Management; Economic Incentives; Financial Sustainability; Waste Electrical and Electronic Equipment.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fluxograma dos fluxos financeiros e de produtos na China (2016-2018).....	30
Figura 2 - Fluxograma dos fluxos financeiros e de produtos na Europa (2016-2018).....	36
Figura 3 - Fluxograma dos fluxos financeiros e de produtos no Brasil (2016-2018).....	47
Figura 4 - Gráfico comparando os EEE colocados no mercado, REEE gerados e reciclados na Europa.....	57
Figura 5 - Gráfico comparando os EE colocados no mercado, REEE gerados e reciclados na China.....	58
Figura 6 - Gráfico comparando os EE colocados no mercado, REEE gerados e reciclados no Brasil.....	59
Figura 7 - Gráfico comparando os EE colocados no mercado, REEE gerados e reciclados nas três regiões.....	60
Figura 8 - Diagrama de estoques e fluxos (Cenário com Incentivos)	92
Figura 9 - Comparativo entre a Coleta Formal e Informal	93
Figura 10 - Diferenças entre Reciclagem formal, informal e disposição sem controle.....	94
Figura 11 - Percentual de coleta formal e informal nos dois cenários avaliados	95

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características dos sistemas formais e informais e o impacto dos custos no sistema formal na China	33
Tabela 2 - Instrumentos para realização de coleta no sistema EPR	45
Tabela 3 - Obrigações dos atores na Logística Reversa nos termos da legislação brasileira ...	50
Tabela 4 - Custos relacionados aos impostos incidentes sobre a atividade das cooperativas ..	55
Tabela 5 - Dados de geração e coleta formal na China, Europa e Brasil	56
Tabela 6 - Quadro comparativo entre os sistemas adotados na China, Europa e Brasil	61
Tabela 7 - Principais variáveis para o desenvolvimento do modelo	78
Tabela 8 - Variáveis e equações Diagrama– Cenário Base e Cenário com Incentivos (simulação 2025 – 2035).....	85
Tabela 9 - Dados simulados (2025-2035) – Valores Finais	91

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

REEE	Resíduos Eletroeletrônicos
PRO	“Producer Responsibility Organizations” (Organizações de Responsabilidade do Produtor)
EPR	“Extended Producer Responsibility” (Responsabilidade Estendida do Produtor)
EEE	Eletroeletrônicos
CS	“compliance schemes” (esquemas de conformidade)
TPO	“Third Party Organization” (Organizações Terceirizadas)
CENELEC	Comité Européen de Normalisation Électrotechnique
WEEELABEX	Waste Electrical and Electronic Equipment Label of Excellence
OCDE	Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Económico
GAP	Grupo de Acompanhamento de Performance
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
SINIR	Sistema Nacional de Informações sobre a Gestão dos Resíduos Sólidos
ABINEE	Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica
ABRADISTI	Associação Brasileira dos Distribuidores de Produtos e Serviços de Tecnologia da Informação
CNC	Confederação Nacional do Comércio
ASSESPRO	Federação das Associações das Empresas Brasileiras de Tecnologia da Informação
GREEN ELETRON	Gestora para Resíduos de Equipamentos Eletroeletrônicos Nacional
ABREE	Associação Brasileira de Reciclagem de Eletroeletrônicos e Eletrodomésticos
CCRLR	Certificado de Crédito de Reciclagem de Logística Reversa
CERE	Certificado de Estruturação e Reciclagem de Embalagens em Geral
SNVS	Sistema Nacional de Vigilância Sanitária
SUASA	Sistema Unificado de Atenção à Sanidade Agropecuária
SISNAMA	Sistema Nacional do Meio Ambiente
SINISA	Sistema Nacional de Informações em Saneamento Básico
SINIMA	Sistema Nacional de Informação sobre Meio Ambiente
COFINS	Contribuição para o Financiamento da Seguridade Social
PIS/PSEP	Programa de Integração Social e o Programa de Formação do Patrimônio do Servidor Público

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	12
2.	OBJETIVOS	15
3.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
3.1	LOGÍSTICA REVERSA DE RESÍDUOS ELETROELETRÔNICOS (REEE).....	16
3.2	INCENTIVOS FISCAIS E SUBSÍDIOS PARA LOGÍSTICA REVERSA DE REEE.....	19
4.	MATERIAIS E MÉTODO	21
5.	PRIMEIRO ARTIGO	23
5.1	INTRODUÇÃO.....	26
5.2	METODOLOGIA.....	28
5.3	CASES INTERNACIONAIS DE INCENTIVOS E SUBSÍDIOS NA CADEIA DE REEE.....	30
5.3.1	China.....	30
5.3.2	Europa.....	35
5.3.2.1	Responsabilidade Estendida do Produtor (EPR)	44
5.3.3	Brasil.....	46
5.4	ANÁLISE COMPARATIVA DOS SISTEMAS ADOTADOS	56
5.5	CONCLUSÕES	64
6.	SEGUNDO ARTIGO	66
6.1	INTRODUÇÃO.....	69
6.2	REVISÃO DE LITERATURA	71
6.2.1	Logística Reversa	71
6.2.2	Logística Reversa de REEE no Brasil	72
6.2.3	Dinâmica de Sistemas (DS) na gestão de REEE	73
6.3	METODOLOGIA.....	75

6.3.1	Modelagem na dinâmica de sistemas	76
6.3.2	Definição do problema e variáveis	77
6.3.3	Compreensão do sistema a ser modelado	80
6.3.4	Desenvolvimento do diagrama de estoques e fluxos.....	82
6.3.5	Testes de sensibilidade dos parâmetros do modelo	90
6.4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	90
6.5	CONCLUSÕES	96
7.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	98
8.	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	100
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	102
	ANEXOS.....	112

1. INTRODUÇÃO

A crescente geração de resíduos eletroeletrônicos (REEE) apresenta sérios desafios para a saúde humana e a sustentabilidade ambiental (OLIVEIRA; NETO; SILVA; MACHADO SANTOS, 2020). São considerados REEE os equipamentos eletroeletrônicos que dependem de correntes elétricas, incluindo seus componentes, subconjuntos e matérias que façam parte deste (EUROPEIA, 2003). Os REEE são compostos por materiais valiosos, mas também por substâncias perigosas como mercúrio, chumbo e cádmio (GHISOLFI; DINIZ CHAVES; RIBEIRO SIMAN; XAVIER, 2017). A inadequação das práticas de descarte e a presença de substâncias tóxicas nesses resíduos intensificam os impactos negativos, especialmente em países com limitada infraestrutura de coleta e reciclagem (BALDÉ; KUEHR; YAMAMOTO; MCDONALD *et al.*, 2024).

A logística reversa pode ser compreendida como o conjunto de atividades coordenadas que visam estruturar o fluxo de retorno de produtos e materiais, do consumidor final até sua origem (processo produtivo) ou até pontos específicos de reaproveitamento, reciclagem ou descarte adequado. Seu objetivo é recuperar o valor residual de bens pós-venda ou pós-consumo, bem como assegurar sua destinação ambientalmente apropriada (VALLE; SOUZA, 2013). Nesse contexto, a logística reversa configura-se como uma ferramenta estratégica para viabilizar a destinação correta dos resíduos, integrando as cadeias produtivas à lógica da economia circular e promovendo benefícios econômicos, sociais e ambientais (WANG; CHANG; CHEN; ZHONG *et al.*, 2014).

A gestão eficiente desses resíduos exige colaboração entre fabricantes, importadores, governo, recicladores e consumidores, garantindo o descarte e a reciclagem adequados, mitigando riscos ambientais e favorecendo o aproveitamento econômico deste mercado, em qualquer sistema a ser adotado (OLIVEIRA; NETO; SILVA; MACHADO SANTOS, 2020). Assim, implementação e o gerenciamento de taxas, impostos, subsídios, incentivos fiscais e financeiros, influenciam diretamente a gestão dos REEE (ANDERSEN, 2022).

Apesar dos avanços normativos registrados em mais de 80 países, a taxa global de reciclagem formal de REEE permanece baixa. Em 2022, estimou-se a geração de 62 bilhões de kg de REEE no mundo, com apenas 22,3% sendo oficialmente coletados e reciclados. O custo global para a gestão dos REEE formalmente coletados é estimado em 37 bilhões de dólares (BALDÉ; KUEHR; YAMAMOTO; MCDONALD *et al.*, 2024). Diante desse cenário, diferen-

tes países adotaram estratégias regulatórias e econômicas para fortalecer seus sistemas de gestão, entre elas os incentivos fiscais e subsídios, que visam reduzir os custos de adoção de práticas sustentáveis e aumentar a competitividade dos recicladores formais (ANDERSEN, 2022; LIU; LI; LEONG, 2022).

O governo, para que possa destinar os recursos e superar os desafios da gestão dos REEE, precisa entender o volume, os componentes e quais são os produtos EEE mais produzidos e consequentemente que geram mais REEE. Tais dados auxiliam no estabelecimento de metas realistas e praticáveis, bem como indicam como deve ser desenvolvida a infraestrutura de reciclagem, nos investimentos em tecnologia e na realização de programas de coleta e reciclagem eficazes (BALDÉ; KUEHR; YAMAMOTO; MCDONALD *et al.*, 2024).

O primeiro artigo desta dissertação analisou comparativamente os sistemas de gestão de REEE na China, Europa e Brasil, com foco na aplicação de incentivos econômicos e fiscais. Os resultados revelaram que, enquanto Europa e China estruturaram políticas robustas sob o modelo de Responsabilidade Estendida do Produtor (EPR), com metas rigorosas, subsídios e regulamentação centralizada, o Brasil ainda enfrenta limitações estruturais, baixa adesão ao sistema formal e ausência de regulamentação efetiva na concessão de incentivos (ROMAGNOLI; DE BRUIJNE; DRAPEAU; OLLION *et al.*, 2022; PATIL; RAMAKRISHNA, 2020; BRASIL, 2010).

Dando continuidade ao estudo realizado no primeiro artigo, o segundo estudo desta dissertação concentrou-se na aplicação da metodologia de dinâmica de sistemas para simular os impactos da concessão de incentivos fiscais no contexto brasileiro. Estudos apontam que incentivos isolados tendem a ter efeitos limitados diante de sistemas complexos como o da gestão de REEE, principalmente em países onde a informalidade é predominante e a infraestrutura deficitária (GHISOLFI; DINIZ CHAVES; RIBEIRO SIMAN; XAVIER, 2017; RODRÍGUEZ; ESCALANTE, 2020). Modelos sistêmicos, como os utilizados nesta pesquisa, têm se mostrado ferramentas valiosas para avaliar a performance de políticas públicas em cadeias logísticas reversas, permitindo simular os efeitos de longo prazo e as interações entre variáveis como custo da coleta, comportamento dos consumidores, e competição entre setores formal e informal (ARDI; LEISTEN, 2016; GUZZO; RODRIGUES; PIGOSSO; MASCARENHAS, 2022).

Existem poucos dados e estudos referentes à logística reversa de REEE no Brasil, e não foram localizados estudos com a mesma abrangência deste trabalho analisando sob o aspecto do fornecimento de subsídios, incentivos fiscais e financeiros em relação ao impacto

nos custos relacionados à logística reversa. Assim, a análise do contexto nacional com as práticas internacionais proporciona várias possibilidades de repensar como está sendo conduzida a gestão interna, razão pela qual os estudos sobre o tema relacionado à gestão de REEE têm aumentado, demonstrando a importância do assunto (ANDERSEN, 2022).

2. OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é identificar e analisar a implementação de incentivos fiscais e/ou econômicos, tanto no Brasil quanto internacionalmente, aplicados à logística reversa de resíduos eletroeletrônicos domésticos. Busca-se estimar os custos e benefícios e comparar as práticas que influenciam o desempenho econômico da gestão desses resíduos na China, Europa e Brasil, para simular e avaliar possíveis soluções aplicáveis ao contexto brasileiro.

Especificamente, os seguintes objetivos são definidos:

- a) Identificar e comparar os cenários da logística reversa e implementação de incentivos fiscais, econômicos ou subsídios nacionais e internacionais na logística reversa de resíduos eletroeletrônicos, e analisar as vantagens e desvantagens das soluções aplicadas.
- b) Estimar benefícios fiscais da logística reversa de REEE no Brasil.
- c) Simular cenários, com o objetivo de estruturar soluções que possam trazer os maiores benefícios econômicos aos fabricantes ou recicladores de resíduos eletroeletrônicos no Brasil.
- d) Avaliar a viabilidade e aplicabilidade de novas práticas, baseadas nos cenários simulados, para o contexto brasileiro.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 LOGÍSTICA REVERSA DE RESÍDUOS ELETROELETRÔNICOS (REEE)

O aumento no consumo e descarte de REEE realça a importância da logística reversa devido às substâncias perigosas (chumbo, mercúrio, cádmio, retardantes de chama bromados, etc.) e metais preciosos (ouro, prata, paládio) presentes nesses resíduos, que necessitam de tecnologias avançadas de reciclagem para mitigar impactos ambientais negativos que coloquem em risco o meio ambiente e à saúde humana (NOGUEIRA ZON; JACOBSEN LEOPOLDINO; YAMANE; RIBEIRO SIMAN, 2020; SANT'ANNA, 2015).

O descarte inadequado dos REEE em aterros pode promover a sua infiltração no solo e no lençol freático contaminando-os. A queima ao ar livre destes resíduos também pode liberar metais pesados poluindo o ar, bem como tais contaminações podem ainda afetar a fauna e a flora, acarretando em danos a biodiversidade (NOGUEIRA ZON; JACOBSEN LEOPOLDINO; YAMANE; RIBEIRO SIMAN, 2020).

A logística reversa consiste em um conjunto de ações e procedimentos que permitem o retorno dos resíduos ao setor produtivo, possibilitando seu reaproveitamento ou destinação final de forma ambientalmente adequada (BRASIL, 2010). Esse processo inclui coleta, triagem, armazenamento, preparação para reutilização, tratamento, processamento e descarte adequado (SANT'ANNA, 2015). Para que os sistemas sejam eficazes, é necessária uma abordagem colaborativa entre fabricantes, importadores, governo, recicladores e consumidores (OLIVEIRA; NETO; SILVA; MACHADO SANTOS, 2020; SANT'ANNA, 2015).

Para o desenvolvimento sustentável da indústria de reciclagem e a proteção do meio ambiente, o apoio financeiro do governo, através de incentivos fiscais e/ou financeiros, são considerados um instrumento importante que poderia expandir a reciclagem de REEE e melhorar sua padronização. Um sistema de supervisão com recompensas e penalidades, influenciado por políticas governamentais, também são importantes (WANG; KONG; LI; LI *et al.*, 2020). A experiência internacional confirma a importância da colaboração entre governo, setor empresarial e sociedade civil (SANT'ANNA, 2015).

Na China, uma política de fundos composta por taxas de descarte pagas pelos fabricantes subsidia recicladores formais, beneficiando-os ao aumentar suas aquisições e melhorar os serviços, tornando-os mais competitivos em relação ao setor informal (LIU; LI; LEONG, 2022; DE OLIVEIRA; BERNARDES; GERBASE, 2012; SALHOFER, 2017; SALHOFER;

STEUER; RAMUSCH; BEIGL, 2016; ZHAO; BAI, 2021). A *Extended Producer Responsibility* (EPR) ou Responsabilidade Estendida do Produtor, sistema adotado neste país, incentiva a participação dos fabricantes na reciclagem e pode aumentar a eficiência do sistema formal (LIU; TANG; LI; WANG, 2017).

O EPR consiste na responsabilidade dos fabricantes desde a pré-venda até o pós-consumo, em relação aos produtos e embalagens colocados no mercado. As empresas que fabricam, importam, vendem e embalam são responsáveis física e financeiramente pelo seu descarte ambientalmente correto (LINDHQUIST, 2000). O sistema EPR também incentiva práticas que minimizam o impacto ambiental e implementam novas tecnologias que economizam energia e previnem a poluição (CHANG; WU; LI; FAN, 2018; ZHAO; BAI, 2021). A logística reversa representa ações que se concentram na devolução e destinação final dos resíduos, enquanto o EPR propõe uma abordagem mais abrangente.

Destaca-se que, na China, os recicladores informais impactam significativamente a economia, necessitando a formulação de políticas públicas para enfrentar esse desafio. Geralmente, os informais não se preocupam com condições sanitárias e ambientais, causando problemas de saúde e impactos ambientais consideráveis (IGNATUSCHTSCHENKO, 2017; STEUER, 2017; STEUER; RAMUSCH; SALHOFER, 2017).

Já na Europa as taxas ambientais são adaptadas às realidades econômicas e ambientais de cada país e categoria. Na Europa, taxas sobre os EEE têm mostrado eficiência na geração de renda e gestão dos REEE (SOUSA; AGANTE; CEREJEIRA; PORTELA, 2018). As legislações específicas de cada país, baseadas na Diretiva de REEE, geram desafios aos fabricantes, que devem se adaptar às diversas regulamentações e formas de implementação das taxas ambientais. Padronização e simplificação nas práticas de gestão poderiam mitigar esses desafios (ANDERSEN, 2022; ANDERSEN; JÆGER; MISHRA, 2020; MAYERS; BUTLER, 2013).

Na Europa, os fabricantes delegam o cumprimento de suas obrigações para as Organizações de Responsabilidade do Produtor (PROs), que organizam a coleta, tratamento e reciclagem dos REEE, além de informar dados às autoridades ambientais (ANDERSEN; JÆGER; MISHRA, 2020; MAYERS; BUTLER, 2013).

Existem duas taxas principais: as taxas ambientais e as taxas de reciclagem. As taxas ambientais cobrem custos relacionados ao impacto ambiental pela produção e descarte de resíduos perigosos, emissão de poluentes ou uso de recursos naturais, sendo, portanto, mais amplas (DIAS; CENCI; BERNARDES; HUDA, 2022; SEYRING; KLING;

WEIßENBACHER; HESTIN *et al.*, 2015). As taxas de reciclagem são pagas pelos produtores e importadores com a finalidade específica de financiar a gestão de REEE, compreendendo a coleta, tratamento e reciclagem. Os custos de reciclagem dos REEE variam expressivamente dependendo do método e da infraestrutura utilizada (SEYRING; KLING; WEIßENBACHER; HESTIN *et al.*, 2015).

A gestão de REEE na Europa demonstra-se bem estruturada, com ampla legislação e alta taxa de coleta, enquanto a China fez progressos significativos em legislação e investimentos. Tanto na China quanto na Europa, é necessário superar o desafio de formalização dos informais para gerenciar os impactos ambientais. Além desse desafio, a Europa ainda precisa melhorar as condições de trabalho e promover tecnologias ambientais (SALHOFER, 2017).

Em ambas as áreas geográficas, os recicladores informais causam impactos ambientais negativos e problemas de saúde, mas também contribuem para o cumprimento das metas de reciclagem, pois conseguem abranger uma maior área de coleta (NGUYEN; LEE; HUNG, 2021; SCHEINBERG; NESIĆ; SAVAIN; LUPPI *et al.*, 2016). Recicladores informais recuperam grandes quantidades de materiais a custos menores que os sistemas formais, contribuindo ambientalmente (SCHEINBERG; NESIĆ; SAVAIN; LUPPI *et al.*, 2016).

A logística reversa no Brasil enfrenta altos custos de transporte e específicas regulamentações das responsabilidades entre fabricantes, atacadistas e varejistas, necessitando de apoio legislativo e financeiro (DEMAJOROVIC; AUGUSTO; SOUZA, 2016). O marco legal para a logística reversa no Brasil é a Lei 12.305/2010, que instituiu a Política Nacional dos Resíduos Sólidos (PNRS), regulamentada pelo Decreto 10.936/2022. A responsabilidade compartilhada, sistema adotado no Brasil, exige a participação ativa dos consumidores, educação ambiental e mais pontos de coleta nas cidades (ALÓS; MILAN; EBERLE, 2023; VARGAS; CAMPOS; LUNA, 2023).

No Brasil as obrigações dos atores são disciplinadas no Decreto 10.240/20, determinando que os fabricantes e importadores são obrigados a dar destinação ambientalmente adequada, dando preferência a reciclagem, informar os critérios para o cálculo do balanço de massa, participar de planos de comunicação e educação ambiental e disponibilizar relatórios ao Sisnama quando solicitado. Já os importadores têm a obrigação de participar de um sistema de logística reversa para importar e comercializar os produtos; e devem informar ao responsável deste sistema como condição para obter a licença de importação. Ambas as obrigações podem ser cumpridas por meio de entidades gestoras (BRASIL, 2020).

Nos termos da Diretiva Europeia, os papéis dos atores no sistema EPR devem ser claramente definidos, mas podem ser coordenados e compartilhados. Os produtores têm a responsabilidade principal de atingir os objetivos do sistema, podendo atuar individualmente ou por meio de PROs únicos ou concorrentes. O governo fornece a estrutura e monitora o sistema, garantindo a implementação de políticas consistentes e de apoio. Os municípios, por sua vez, podem continuar com a coleta e tratamento de resíduos ou atuar como fiscalizadores dos PROs, enquanto os consumidores desempenham um papel crucial ao apoiar a coleta de resíduos e influenciar seus fluxos. Por fim, os varejistas servem como canais de comunicação entre produtores e consumidores, podendo também estar envolvidos na coleta dos resíduos (OECD, 2016).

O Brasil enfrenta desafios na gestão do REEE, como especificação de responsabilidades, licenciamento ambiental burocrático, necessidade de estrutura geográfica, capacitação de cooperativas, implementação de tecnologias, incentivos fiscais e financeiros, e importação ilegal de REEE (SOUZA, 2019; LOPES DOS SANTOS, 2021). O setor informal, responsável por grande parte da coleta de REEE, não adota procedimentos seguros, causando riscos ambientais e à saúde. A PNRS em sua redação destaca a importância da integração das organizações de catadores formalizadas no sistema de logística reversa para melhorar a reciclagem (DEMAJOROVIC; AUGUSTO; SOUZA, 2016).

3.2 INCENTIVOS FISCAIS E SUBSÍDIOS PARA LOGÍSTICA REVERSA DE REEE

Dados do Fórum Econômico Mundial de 2019 indicam que o REEE pode gerar uma rentabilidade anual de cerca de 65 bilhões de dólares, assim, uma gestão eficaz dos REEE pode proporcionar um retorno econômico significativo. Investimentos ou incentivos nessa área têm o potencial de gerar benefícios econômicos expressivos (LOPES DOS SANTOS, 2021).

Na China, por exemplo, os subsídios ajudam empresas formalizadas de reciclagem a tornarem o processo economicamente viável, cobrindo custos de tratamento, transporte, mão de obra, impostos e taxas, aumentando sua competitividade e possibilitando a formalização de informais (ABALANSA; EL MAHRAD; ICELY; NEWTON, 2021; LI; DONG; LIU; SONG, 2016 LIU; TANG; LI; WANG, 2017; WANG; GU; LI; LIU *et al.*, 2017; WANG; HUO, 2023). Os subsídios fornecidos aos recicladores formais, aumentam a competitividade com os informais, pois o segundo não possui os mesmos custos, diminuindo lucros dos recicladores informais, expulsando-os do mercado (FU; ZHONG; CHEN; LIU, 2020).

Os subsídios podem: I) impactar a fabricação de novos EEE com design mais ecológico, II) aumentar a reciclagem de REEE e os III) aumentar lucros dos recicladores e reduzir gastos governamentais (WANG; GU; LI; LIU *et al.*, 2017; ZHAO; BAI, 2021). Esses subsídios promovem produção mais ecológica, desenvolvimento sustentável e práticas amigáveis ao meio ambiente (CHANG; WU; LI; FAN, 2018; LI; DONG; LIU; SONG, 2016; LIU; XU; TIAN; WANG *et al.*, 2019; PATIL; RAMAKRISHNA, 2020).

Outro ponto a considerar é a questão social. Os incentivos econômicos para a gestão eficaz dos REEE são especialmente importantes para as classes de baixa renda, onde a reciclagem é motivada mais pela necessidade econômica e pela solidariedade comunitária do que por preocupações ambientais (ECHEGARAY; HANSSTEIN, 2016).

O primeiro artigo no capítulo 5 aborda o desenvolvimento dos sistemas de logística reversa na China, Europa e Brasil, demonstrando os impactos dos subsídios, taxas e incentivos fiscais e financeiros.

O segundo artigo no capítulo 6 analisa cenários com e sem incentivos fiscais no Brasil, com foco no momento da coleta de REEE, identificando os impactos na coleta formal, informal e na disposição sem controle dos REEE.

4. MATERIAIS E MÉTODO

A metodologia desenvolvida nesta pesquisa encontra-se dividida em 3 etapas: 1) Levantamento bibliográfico e revisão de literatura; 2) Desenvolvimento dos fluxogramas referente aos fluxos financeiros e de produtos na logística reversa da China, Europa e Brasil, com a apresentação de um primeiro artigo; 3) modelação para avaliação dos cenários da logística reversa no Brasil, com e sem o fornecimento de incentivos fiscais, por meio da apresentação de um segundo artigo.

A partir dos dados levantados, foram desenvolvidos fluxogramas que demonstram os fluxos financeiros e de produtos na logística reversa na China, Europa e Brasil, considerando o cenário de 2023, utilizando o software gratuito CmapTools. Esses fluxogramas ilustram como os fabricantes colocam seus produtos no mercado, a incidência de incentivos (fiscais, econômicos, taxas), o retorno dos produtos para reciclagem após o consumo e o descarte dos rejeitos, envolvendo sistemas formais e informais.

Realizou-se uma análise qualitativa e comparativa dos sistemas adotados, observando a participação do governo, aplicação de subsídios, desafios enfrentados, vantagens e desvantagens dos sistemas, demonstrando as semelhanças e diferenças entre as áreas de estudo. A análise quantitativa foi apresentada por meio de gráficos, considerando os produtos eletroeletrônicos colocados no mercado, os resíduos gerados e as quantidades recicladas formalmente, em um período de cinco anos (2018 a 2022). Isso permitiu observar a evolução da reciclagem.

Para o segundo artigo, foi desenvolvida uma análise dos cenários base e com implementação de incentivos, utilizando o método de Dinâmica de Sistemas (System Dynamics - SD). Este método foi criado por Jay W. Forrester, na década de 1950, no *Massachusetts Institute of Technology (MIT)*, com a proposta de compreensão de sistemas complexos ao longo do tempo (LANE; STERMAN, 2011). Na dinâmica de sistemas são apresentados sistemas com interação complexa influenciados por diversas variáveis que através de retroalimentação (loops de feedbacks) serão influenciados ao longo do tempo, assim, pequenas alterações podem gerar impactos significativos, os quais podem auxiliar gestores e formadores de opinião a desenvolverem políticas que tenham efetividade no problema existente (MEADOWS, 2009; JARROW; MAKSIMOVIC; ZIEMBA, 1997; STERMAN, 2000).

Para o desenvolvimento do loop causal e do diagrama de estoques e fluxos foi utilizado o software Vensim PLE (na versão gratuita), desenvolvido pela Ventana Systems, a qual

possibilita o desenvolvimento de modelos visuais e simulação de cenários baseados em equações lógicas e diferenciais de fluxo.

Por meio da utilização deste software foi possível o desenvolvimento do sistema de logística reversa, a partir dos caminhos pelos quais os REEE podem ser dispostos, implementando incentivos fiscais. Por meio desta análise é possível ainda entender a aplicação de políticas ambientais simulando seu impacto nos sistemas. O Vensim PLE realiza ainda testes de sensibilidade e validação dos modelos, analisando a confiabilidade das equações apresentadas (STERMAN, 2000).

5. PRIMEIRO ARTIGO

Análise da gestão de resíduos eletroeletrônicos e o impacto das políticas de incentivos fiscais na China, Europa e Brasil.

Keity Symonne dos Santos Silva Abreu¹, Ricardo Gabbay de Souza².

¹ *Universidade Estadual Paulista – UNESP, Av. Eng. Luís Edmundo Carrijo Coube, 14-01 - Núcleo Res. Pres. Geisel, Bauru, SP, 17033-360, Brasil.*

² *Universidade Estadual Paulista, UNESP, Rodovia Presidente Dutra, Km 137,8 s/n Distrito de - Eugênio de Melo, São José dos Campos, SP, 12224-300, Brasil.*

* Autor correspondente.

E-mail: keity.abreu@unesp.br +55 14 981111061

Endereço: Rua Triagem, 8-33, Santa Luzia, Bauru, SP 17025-290, Brasil.

Endereço de e-mail:

¹ Keity Symonne dos Santos Silva Abreu - keity.abreu@unesp.br

² Ricardo Gabbay de Souza – ricardo.souza@unesp.br

Resumo

A gestão de resíduos eletroeletrônicos (REEE) é um desafio global que envolve a colaboração entre diversos atores, incluindo governos, fabricantes, importadores, recicladores e consumidores. Regiões como China, Europa e Brasil adotaram regulamentações importantes com a implementação de incentivos econômicos para lidar com essa questão, buscando eficácia na gestão dos REEE. Este artigo analisa e compara os cenários e a aplicação de incentivos financeiros na logística reversa de resíduos eletroeletrônicos (REEE) no Brasil, China e Europa, avaliando as vantagens e desvantagens dos sistemas implementados. A metodologia consiste em uma revisão semi-sistemática de artigos publicados nas bases de dados *Scopus* e *Web of Science*, complementada por uma análise comparativa dos sistemas de gestão de REEE. Os resultados mostram que a Europa e a China implementaram sistemas de Responsabilidade Estendida do Produtor (EPR) mais robustos e com regulamentações mais rigorosas, enquanto o Brasil ainda enfrenta desafios na regulamentação e implementação de políticas adequadas. A conscientização dos consumidores e a criação de incentivos econômicos são importantes para aumentar a eficiência na coleta e reciclagem de REEE. Os sistemas de gestão de REEE na China e Europa têm regulamentações rigorosas. Na China, subsídios financiados por taxas de descarte pagas pelos fabricantes fortalecem o sistema formal, promovendo a competitividade frente aos informais. Na Europa, os fabricantes podem transferir suas obrigações para PROs (*Producer Responsibility Organizations*) e empresas subcontratadas, situação que reduz os custos da logística reversa. No entanto, a sustentabilidade financeira na China é uma preocupação a longo prazo, enquanto na Europa, as metas de reciclagem elevadas, taxas, penalidades e a falta de padronização legislativa são os principais desafios. No Brasil, o desenvolvimento e implementação da responsabilidade compartilhada têm sido lentos, necessitando de cooperação eficaz entre o Estado, o mercado e a sociedade. Embora haja previsão legal para incentivos fiscais e financeiros, ainda falta regulamentação e efetividade na concessão desses benefícios.

Abstract

Managing electronic waste (e-waste) is a global challenge that requires collaboration among various stakeholders, including governments, manufacturers, importers, recyclers, and consumers. Regions such as China, Europe, and Brazil have adopted significant regulations with economic incentives to address this issue, aiming for efficiency in e-waste management. This article analyzes and compares the fiscal scenarios and the application of financial incentives in the reverse logistics of electronic waste in Brazil, China, and Europe, evaluating the advantages and disadvantages of the implemented systems. The methodology consists of a semi-systematic review of articles published in the Scopus and Web of Science databases, complemented by a comparative analysis of e-waste management systems. The results show that Europe and China have implemented more robust Extended Producer Responsibility (EPR) systems with stricter regulations, while Brazil still faces challenges in regulating and implementing adequate policies. Consumer awareness and the creation of economic incentives are crucial to increase the efficiency of e-waste collection and recycling. E-waste management systems in China and Europe have stringent regulations. In China, subsidies funded by disposal fees paid by manufacturers strengthen the formal system, promoting competitiveness against informal sectors. In Europe, transferring obligations from manufacturers to Producer Responsibility Organizations (PROs) and subcontracted companies reduces reverse logistics costs. However, long-term financial sustainability is a concern in China, while in Europe, high recycling targets, fees, penalties, and the lack of legislative standardization are the main challenges. In Brazil, the development and implementation of shared responsibility have been slow, requiring practical cooperation between the state, the market, and society. Although there is legal provision for fiscal and financial incentives, there is still a lack of regulation and effectiveness in granting these benefits.

5.1 INTRODUÇÃO

O aumento global de resíduos eletroeletrônicos (REEE) apresenta sérios desafios para a saúde humana e a sustentabilidade ambiental. A gestão eficiente desses resíduos exige a colaboração entre fabricantes, importadores, governo, recicladores e consumidores, garantindo o descarte e a reciclagem adequados, o que pode mitigar riscos ambientais e favorecer o aproveitamento econômico deste mercado (OLIVEIRA; NETO; SILVA; MACHADO SANTOS, 2020).

Em 2022, estima-se que o mundo gerou 62 bilhões de kg de REEE, o equivalente a 7,8 kg *per capita* por ano, com apenas 22,3% sendo oficialmente coletados e reciclados. Apesar do crescimento da reciclagem desde 2010, a geração total de REEE aumentou em média 2,3 bilhões de kg por ano, evidenciando um descompasso entre as atividades de reciclagem e o crescimento dos resíduos. O custo global para a gestão dos REEE formalmente coletados é estimado em 37 bilhões de dólares. Mesmo com políticas, legislações ou regulamentações em 81 países, são necessários mais esforços na gestão dos REEE para melhorar as infraestruturas de coleta e reciclagem (BALDÉ; KUEHR; YAMAMOTO; MCDONALD *et al.*, 2024).

No continente asiático a China é o país com maior geração de REEE, com 12 bilhões de kg/ano, equivalentes a 22kg *per capita*, e uma coleta formal de REEE correspondente a 20%. A Europa gerou, em 2022, o correspondente 13 bilhões de kg/ano, equivalente a 17,6 kg *per capita*, e teve também a mais expressiva coleta, com o equivalente a 7,5 kg *per capita*, reciclando 42,8% dos REEE gerados. Na América do Sul, o Brasil atualmente é o maior gerador de REEE com 2,4 bilhões de kg/ano, o equivalente a 11,4 kg *per capita*, representando um crescimento de 15% em relação a 2019, com uma coleta formal de 3% (BALDÉ; KUEHR; YAMAMOTO; MCDONALD *et al.*, 2024).

Na Ásia, por exemplo, existem países em diversos níveis de desenvolvimento econômico, situação que afeta diretamente a gestão dos REEE. A China lidera a produção de eletroeletrônicos e recebe REEE de todo o continente, enquanto tenta combater a informalidade e a importação ilegal desses resíduos. Por esta razão é necessária a adoção de medidas para regular a gestão adequada dos REEE, visando a promoção da reciclagem com a adoção de um sistema de gestão. Na China é estabelecido o sistema EPR (Responsabilidade Estendida do Produtor), no qual os fabricantes assumem a responsabilidade pela organização e operação da coleta, tratamento e destinação final dos REEE (PATIL; RAMAKRISHNA, 2020). O país imple-

mentou políticas governamentais centralizadas e oferece subsídios ao sistema formal para incentivar o mercado e combater o sistema informal. Embora a política busque melhorar os impactos ambientais e a eficiência da reciclagem de REEE, ela enfrenta desafios de sustentabilidade financeira (DIESTE; VIAGI; PANIZZOLO; DOS SANTOS *et al.*, 2018).

Na Europa, também é aplicado o sistema EPR, com a possibilidade de que os fabricantes cumpram suas obrigações individualmente ou através de Organizações de Responsabilidade do Produtor (PROs) (CAI; CHOI, 2019; OECD, 2001). No contexto Europeu, cada País pode estabelecer seu próprio sistema interno de gestão de REEE, alinhado à legislação europeia (DIESTE; VIAGI; PANIZZOLO; DOS SANTOS *et al.*, 2018).

As práticas de gestão de REEE na Europa influenciaram a China e o Brasil, especialmente na coleta, desmontagem, reciclagem e reutilização (DIESTE; VIAGI; PANIZZOLO; DOS SANTOS *et al.*, 2018). No entanto, no Brasil, há necessidade de mais regulamentações, pois apesar da existência de empresas que realizam etapas avançadas da logística reversa ainda corresponde a uma pequena porcentagem dos resíduos reciclados. Isso mostra que a eficácia de um sistema depende do mercado, da regulamentação e da concorrência (DIAS; CENCI; BERNARDES; HUDA, 2022; FAVOT; GRASSETTI; MASSARUTTO; VEIT, 2022). Diferente da China, o Brasil adota uma gestão descentralizada, com uma estrutura jurídica baseada em normativas federais gerais, e estabelece autonomia em níveis estaduais e municipais para estabelecerem a coleta seletiva (DIESTE; VIAGI; PANIZZOLO; DOS SANTOS *et al.*, 2018).

Incentivos fiscais visam promover práticas sustentáveis e respeito ao meio ambiente (OLIVEIRA; VALIM, 2018). Além disso, um sistema de supervisão com recompensas e penalidades pode influenciar o comportamento dos recicladores, visando o desenvolvimento sustentável da indústria de reciclagem de REEE (WANG; KONG; LI; LI *et al.*, 2020). O fornecimento de subsídios, como ocorre na China, pode beneficiar o setor formal ao aumentar suas aquisições e melhorar os serviços oferecidos, tornando-o mais competitivo em relação ao setor informal, proporcionando eficácia na promoção de práticas sustentáveis (LIU; LI; LEONG, 2022).

Os subsídios causaram mudanças significativas nos números de tratamento dos REEE na China. de 2009 a 2011, foram tratados 28,81 milhões de unidades de REEE. Com a implementação da Política de Fundos, esse número aumentou para 36 milhões de unidades. (YU; HE; LI; HUANG *et al.*, 2014). Outro impacto dos subsídios na China foi a campanha “Velho por novo”, onde consumidores receberam incentivos dos varejistas ao devolverem seus

REEE aos canais formais. Recicladores também receberam subsídios mais altos. Essa campanha melhorou a quantidade coletada, mas também aumentou a aquisição de EEE (SALHOFER, 2017; SANT'ANNA, 2015).

Os estudos sobre a gestão de REEE têm aumentado consideravelmente, demonstrando a importância do assunto. Neste contexto, a análise da gestão de REEE no Brasil em comparação com as práticas internacionais oferece várias oportunidades para repensar a gestão interna (ANDERSEN, 2022).

Este artigo tem como objetivo analisar e comparar os cenários e a aplicação de incentivos na logística reversa de REEE no Brasil, China e Europa, além de avaliar as vantagens e desvantagens dos sistemas implementados.

5.2 METODOLOGIA

O presente trabalho consiste numa revisão semi-sistemática, aplicada com o intuito de apresentar uma visão geral sobre a gestão dos REEE, em especial como são estabelecidos os incentivos e como eles podem impactar na condução desta gestão.

Primeiro, foi realizado um levantamento bibliográfico baseado na revisão de artigos publicados nas bases de dados *Scopus* e *Web of Science*. O levantamento foi realizado com a busca de artigos (*articles*), resumos (*abstract*) e palavras-chave (*Keywords*), e foram selecionados os artigos por ano, a partir de 2017, ordenados por relevância.

Na primeira pesquisa foram utilizados os seguintes termos:

- No primeiro campo: ("e-waste" OR "WEEE" OR "waste electrical and electronic equipment").
- No segundo campo: ("reverse logistics" OR "take-back" OR "takeback" OR "closed-loop supply chain" OR "waste management" OR "Extended Producer Responsibility").
- No terceiro campo: ("tax incentive" OR "fiscal incentive" OR "financial incentive" OR "pay-as-you-throw" OR "tax exemption" OR "untaxed" OR "non-taxed" OR "fiscal stimulus" OR "tax benefits" OR "tax breaks" OR "tax concessions" OR "tax relief" OR "tax credit" OR "money back" OR "subsidy" OR "endowment" OR "economic support" OR "tax write-off" OR "fee" OR "tax burden" OR "tax regulations" OR "tax cuts" OR "green tax" OR "fee upon sale").

Os resultados deste primeiro levantamento apresentaram 45 artigos.

Após o primeiro resultado, identificou-se que a maioria dos estudos estavam relacionados à China. Assim, foi necessária uma nova busca para incluir a Europa e o Brasil. Outro aspecto importante para o desenvolvimento dos fluxos de produtos e financeiros era a existência de sistemas formais e informais, tornando necessário que esses termos também fossem incorporados à pesquisa de artigos. Como o estudo visa analisar os incentivos, foram incluídos outros termos identificados ao longo das leituras, bem como a possibilidade de dupla tributação, realizando-se uma segunda pesquisa com novos termos.

- No segundo campo: ("*informal sector*" OR "*informal*" OR "*waste pickers*" OR "*scavengers*") ("*reverse logistics*" OR "*take-back*" OR "*takeback*" OR "*closed-loop supply chain*" OR "*waste management*" OR "*Extended Producer Responsibility*").
- No terceiro campo: ("*Double taxation*" OR "*Bis in Idem*" OR "*duplicity tax*" OR "*tax*" OR "*recycled products tax*" OR "*tax* disincentives*") AND ("*Europe*" OR "*Brazil*" OR "*China*").

Realizando-se a pesquisa nas bases de dados com todos os termos mencionados e aplicando-se os mesmos filtros, obteve-se no total 110 artigos.

A seleção da China, Europa e Brasil neste estudo se justifica pelo volume de geração de REEE e pela relevância de seus sistemas de gestão. A China é o maior gerador da Ásia e adotou um modelo inspirado na Diretiva Europeia. A Europa, por sua vez, combina alta geração com os maiores percentuais de reciclagem formal, sendo referência em responsabilidade estendida do produtor. Já o Brasil lidera na América Latina, mas enfrenta desafios estruturais como baixa coleta formal e informalidade. Esses três contextos oferecem contrastes relevantes para a análise da efetividade dos incentivos na logística reversa.

As informações extraídas dos artigos relacionados às regiões estudadas, bem como das legislações do Brasil, China e Europa, foram organizadas em uma planilha para sistematização dos dados. Esta planilha foi estruturada considerando, para cada artigo, o tipo de resíduo, objetivo do estudo, país, tipos de subsídios estudados, método adotado, principais resultados e conclusões, legislação, destinatário ou beneficiário do subsídio, quem oferece o subsídio, benefícios econômicos ou retorno financeiro, e as lacunas de pesquisa encontradas.

A partir dos dados levantados, foram desenvolvidos fluxogramas que demonstram os fluxos financeiros e de produtos na logística reversa na China, Europa e Brasil, considerando o cenário de 2023, utilizando o software CmapTools. Esses fluxogramas ilustram como os fabricantes colocam seus produtos no mercado, a incidência de taxas, o retorno dos produtos para reciclagem após o consumo e o descarte dos rejeitos, envolvendo sistemas formais e informais.

Eles mostram o envolvimento de empresas terceirizadas no processo, como recebem e destinam os REEE e como os custos são repassados. Os fluxogramas indicam o percurso dos eletroeletrônicos vendidos, o trajeto dos REEE ao fim de sua vida útil, os integrantes do sistema de logística reversa e suas obrigações, além dos fluxos de dinheiro, subsídios e incentivos envolvidos em todos os processos.

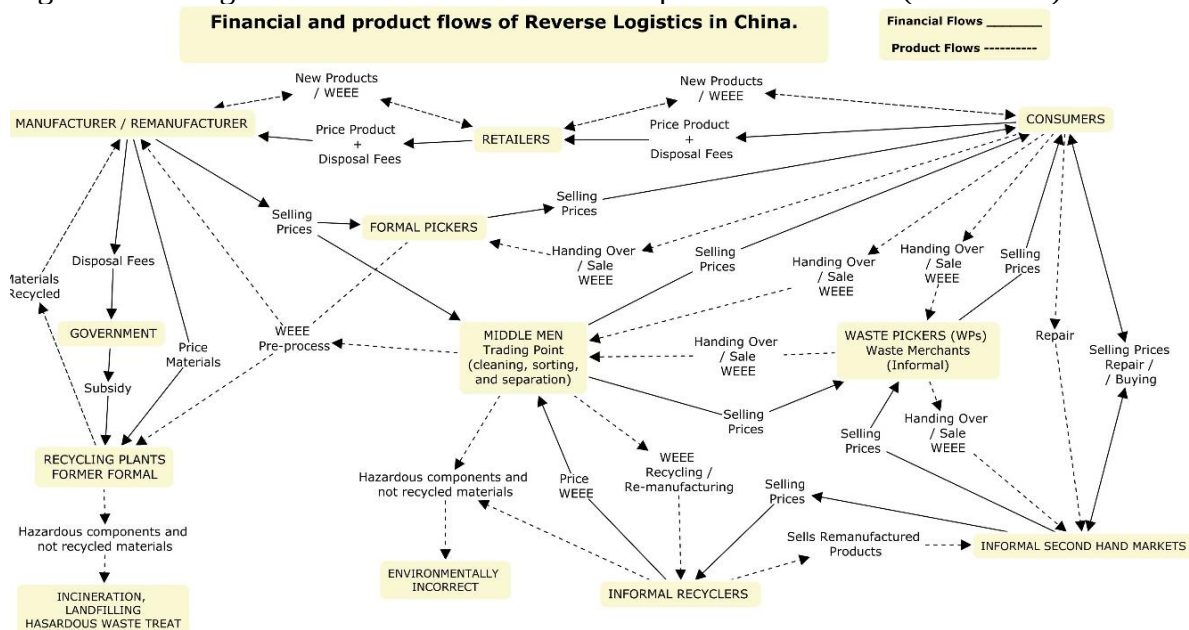
Realizou-se uma análise qualitativa e comparativa dos sistemas adotados, observando a participação do governo, aplicação de subsídios, desafios enfrentados, vantagens e desvantagens dos sistemas, demonstrando as semelhanças e diferenças entre as áreas de estudo. A análise quantitativa foi apresentada por meio de gráficos, considerando os produtos eletroeletrônicos colocados no mercado, os resíduos gerados e as quantidades recicladas formalmente, em um período de cinco anos (2018 a 2022).

5.3 CASES INTERNACIONAIS DE INCENTIVOS E SUBSÍDIOS NA CADEIA DE REEE

5.3.1 China

Neste estudo, foi considerado o cenário existente correspondente aos fluxos financeiros e de produtos na China (Figura 1).

Figura 1 - Fluxograma dos fluxos financeiros e de produtos na China (2016-2018)



Fonte: Elaborado pelos Autores baseado nos artigos de SALHOFER; STEUER; RAMUSCH; BEIGL (2016); STEUER; RAMUSCH; SALHOFER (2017); STEUER; RAMUSCH; PART; SALHOFER (2016); WANG; QU; LIU; ZHANG (2019); LIU; TANG; LI; WANG (2017).

Conforme pode ser verificado na Figura 1, a China implementa uma Política de Fundos, compreendendo impostos e subsídios ambientais, para regular a *Extended Producer Responsibility* - EPR (Responsabilidade Estendida do Produtor), uma iniciativa que abrange todo o país. Seu objetivo é controlar a importação, prevenir a poluição ambiental e garantir o adequado processamento dos REEE. O sistema permite o monitoramento e supervisão dos fluxos de resíduos, além de fornecer financiamento para as empresas cadastradas no sistema formal (CHANG; WU; LI; FAN, 2018; SALHOFER; STEUER; RAMUSCH; BEIGL, 2016).

A gestão de REEE na China está alinhada com a Convenção de Basiléia, operando em nível provincial. As principais regulamentações incluem a Diretiva Chinesa WEEE, "O Regulamento sobre Gerenciamento de Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos, Reciclagem e Descarte" (*Regulation on the Recycling of Waste Electrical and Electronic Products*), e o Regulamento China RoHS "Regulamento para o Controle da Poluição Causada por Produtos de Informação Eletrônica" (*Management Methods for the Restriction of the Use of Hazardous Substances in Electrical and Electronic Products*) (TONG; WANG; CHEN; WANG, 2018).

Em 2012, o Ministério de Finanças criou o Fundo de Processamento de Lixo Eletrônico (WEEE Recovery Fund), estabelecido para subsidiar os recicladores formais. Na China, é cobrada uma taxa dos fabricantes e importadores sobre os novos produtos eletroeletrônicos, denominada "Taxa de Descarte", com principal objetivo de subsidiar recicladores formais, incentivando práticas de reciclagem adequadas e sustentáveis (TONG; WANG; CHEN; WANG, 2018; WANG; LI; MISHIMA; ADACHI, 2020).

Os valores recebidos a partir desta taxa são destinados ao Fundo, que é gerenciado por várias entidades governamentais, incluindo o Ministério das Finanças (MOF), o Ministério do Meio Ambiente (MEP), a Comissão Nacional de Desenvolvimento e Reforma (NDRC), o Ministério da Indústria e Tecnologia da Informação (MIIT), a Administração Geral das Alfândegas (GAC) e a Administração Estatal de Tributação (SAT) da República Popular da China (FU; ZHONG; CHEN; LIU, 2020). Com os recursos deste Fundo, o governo fornece subsídios (incentivos financeiros) aos recicladores formais calculados com base na quantidade de REEE reciclados, valores que auxiliam nos custos do processamento ambientalmente corretos dos REEE (LIU; XU; TIAN; WANG *et al.*, 2019; WANG; KUEHR; AHLQUIST; LI, 2013).

Os subsídios recebidos pelos recicladores são destinados a custear a desmontagem e a retirada de peças úteis, sendo os valores recebidos contabilizados a partir de cada unidade reciclada, o que garante a adequada reciclagem (LIU; LEI; DENG; LEONG *et al.*, 2015). O objetivo deste subsídio é incentivar os recicladores a reciclar mais e de forma qualificada. Com

isso, espera-se expandir a divulgação e ampliar a conscientização dos consumidores sobre o gerenciamento dos REEE (YU; HE; LI; HUANG *et al.*, 2014; STEUER; RAMUSCH e SALHOFER 2017; ZHAO; YANG, 2018).

A política desenvolvida na China é fundamental para a reciclagem de REEE e é lucrativa para os recicladores formais. A sistemática estabelecida pelo Fundo visa equilibrar e auxiliar nos custos incidentes sobre os produtos remanufaturados, tornando-os mais acessíveis aos consumidores. No entanto, essa política pode resultar na diminuição das margens de lucro dos fabricantes (LIU; XU; TIAN; WANG *et al.*, 2019).

Até 2015, no sistema formal, foram registradas 109 usinas de reciclagem, todas com controle ambiental e com utilização de tecnologia. O governo da China, por meio de seis agências governamentais com diferentes responsabilidades, tem como objetivo a intervenção em empresas regulamentadas. No sistema informal, encontram-se os catadores informais, o mercado de segunda mão e outras atividades não regulamentadas (CHANG; WU; LI; FAN, 2018; LIU; XU; TIAN; WANG *et al.*, 2019; TONG; WANG; CHEN; WANG, 2018).

Empresas formais são denominadas aquelas que atuam dentro de um marco regulatório, com licenciamento adequado e cumprimento das exigências legais, ambientais e de segurança ocupacional, e recebem subsídios para viabilizar a reciclagem ambientalmente adequada de REEE. Em contraste, empresas informais operam à margem da regulamentação, sem licenças ou conformidade com normas ambientais e de segurança (STEUER, 2016).

As usinas de reciclagem formais utilizam terceiros para serviços de logística, que atuam em seu nome para realizar a coleta porta a porta. As empresas formais, na prática, utilizam-se dos catadores informais, pois estes conseguem atender a coleta porta a porta de maneira eficiente e abrangente. Ao adquirirem os REEE dos catadores informais, as usinas formais podem obter uma maior vantagem econômica, elevando o preço destes resíduos e retirando tais produtos do sistema informal (TONG; WANG; CHEN; WANG, 2018; WANG; LI; MISHIMA; ADACHI, 2020).

O sistema informal também é motivado pelo lucro, uma vez que não está sujeito a regulamentações ambientais rigorosas e possui custos operacionais mais baixos. A penalização dos informais ou os subsídios concedidos aos recicladores formais podem levar o setor informal a se integrar aos recicladores formais, visto que estes não têm interesse na formalização, preferindo manter sua independência e evitar regulação e tributação. Diante do risco e da incerteza do negócio informal, as negociações realizadas com recicladores formais proporcionam maior

estabilidade e contribuem para melhorar a imagem dos informais (WANG; LI; MISHIMA; ADACHI, 2020).

O Governo chinês buscou estruturar um mercado formalizado de reciclagem de REEE, mas em relação ao mercado informal, optou por uma política de proibição que não prosperou. Isso se deve à influência positiva que o mercado informal exerce na dinâmica da reciclagem, proporcionando benefícios indiretos, ao mesmo tempo em que se tenta consolidar um sistema formal (SALHOFER; STEUER; RAMUSCH; BEIGL, 2016; STEUER; RAMUSCH; SALHOFER, 2018; TONG; WANG; CHEN; WANG, 2018).

Ambos os sistemas enfrentam desafios consideráveis, e alguns destes decorrem dos impactos relacionados aos custos do sistema formal em comparação ao sistema informal, conforme verificado na Tabela 1. O sistema formal tem sua eficácia e competitividade comprometida devido aos altos custos das atividades, provenientes da necessidade de atendimento às regulamentações e do desenvolvimento de infraestrutura (IGNATUSCHTSCHENKO, 2017).

Tabela 1 - Características dos sistemas formais e informais e o impacto dos custos no sistema formal na China

SISTEMA FORMAL (STEUER, 2017)	Falta de opções convenientes ao consumidor Utiliza-se do Sistema informal Menos rentável ao consumidor Não atende todas as necessidades da população
SISTEMA INFORMAL (STEUER, 2017)	Os Consumidores tem mais vantagens financeiras com mercado de segunda mão Coleta porta a porta Capacidade de adaptação às necessidades da população
CUSTOS SISTEMA FORMAL (LI; DONG; LIU; SONG, 2016)	Coleta (representa aprox. 70% do custo) Despesas com mão de obra (aprox. 7%) Taxas e impostos (aprox. 11%) Preço dos materiais Despesas administrativas Despesas com tecnologia Campanhas para envolvimento e conscientização dos Consumidores Política Governamental (subsídios, empréstimos, etc.) Variações de Mercado Quantidade de REEE tratados Investimentos em tecnologia

Fonte: Elaborada pelos Autores (2024).

O setor informal domina a coleta e devolução de REEE, possuindo uma ampla rede de coleta urbana, oferecendo altos reembolsos aos consumidores e contando com uma maior força de trabalho. Isso resulta em preços finais de produtos remanufaturados mais baixos em comparação com os do setor formal (SALHOFER; STEUER; RAMUSCH; BEIGL, 2016; WANG; LI; MISHIMA; ADACHI, 2020). Os recicladores formais, por sua vez, terceirizam a coleta e precisam pagar pelos REEE coletados (ZHAO; YANG, 2018).

No sistema formal, os recicladores recebem qualificação fornecida pelo governo, possibilitando o uso e manuseio adequados dos REEE. Os recicladores comercializam as peças úteis com os remanufaturadores e fabricantes, proporcionando segurança do produto e garantia de qualidade, com etapas fiscalizadas pelo governo. O sistema informal, por sua vez, atua sem fiscalização ou regulamentação, sem qualificação, com custos mais baixos, pois geralmente não segue as práticas ambientalmente corretas (LIU; LEI; DENG; LEONG *et al.*, 2015; WANG; LI; MISHIMA; ADACHI, 2020).

A qualidade dos resíduos recicláveis depende da integridade, idade e manutenção dos materiais, o que influencia seu destino. Recicladores informais têm vantagem competitiva sobre os formais no tratamento de resíduos de alta qualidade, mesmo quando estes recebem subsídios, devido aos altos custos do processamento ambientalmente adequado. Além disso, o setor informal costuma empregar práticas nocivas, como queima a céu aberto e banho ácido, com descarte de substâncias tóxicas em rios. Embora a China tenha implementado leis para coibir essas ações, barreiras como a localização descentralizada das atividades dificultam sua aplicação (LIU; LEI; DENG; LEONG *et al.*, 2015; WANG; LI; MISHIMA; ADACHI, 2020).

A cadeia de coleta informal é composta por diferentes grupos com funções específicas. Entre eles estão os catadores que percorrem ruas a pé, recolhendo resíduos em lixeiras residenciais e áreas públicas, com capacidade limitada de coleta. Há também os coletores com triciclos, conhecidos como comerciantes, que atuam diretamente nas residências. Um terceiro grupo é formado pelos intermediários, que compram materiais dos catadores e os transportam em caminhões para depósitos ou pátios de armazenamento. Esses agentes cobrem distâncias maiores e revendem os resíduos para indústrias ou recicladores, funcionando como elo entre a coleta primária e o reaproveitamento final. A cadeia revela alto grau de organização, com divisão de tarefas e estratégias de divulgação que incluem anúncios verbais em bairros e placas improvisadas com informações de contato. Nos depósitos, os resíduos são armazenados, limpos, separados, reconfigurados e preparados para comercialização (STEUER, 2017; STEUER; RAMUSCH; SALHOFER, 2017).

Por vezes, os consumidores optam pelo sistema informal devido à conveniência e à ineficácia do sistema formal. Como o sistema informal controla quantidades consideráveis de resíduos, há uma busca pela integração do sistema informal ao formal. No sistema formal, as obrigações relacionadas à coleta desses resíduos não são claramente atribuídas, o que favorece o trabalho informal (STEUER, 2017). Os canais informais têm foco na comercialização de pro-

dutos de segunda mão recondicionados, resultando em lucros mais expressivos. Os consumidores, buscando economia, recorrem a esses serviços para realizar reparos ou trocar seus produtos por itens recondicionados (STEUER; RAMUSCH; SALHOFER, 2017).

O sistema informal evoluiu preenchendo lacunas deixadas pelo sistema formal, desenvolvendo uma rede hierárquica de atores especializados na coleta e reciclagem de resíduos. Os catadores coletam materiais diretamente das residências e os intermediários, por terem caminhões, são os que coletam frequentemente em lojas e comércio. Os comerciantes itinerantes compram desses catadores e vendem nos "*Trading Points*" (pontos de comércio), onde os recicláveis são trocados por dinheiro. Observou-se que a presença de mais "*Trading Points*" em uma região está diretamente ligada ao aumento do número de coletores informais, pois esses pontos facilitam a troca de materiais e informações, adaptando-se ao mercado e valorizando os resíduos, tornando-os mais rentáveis (STEUER, 2017; STEUER; RAMUSCH; SALHOFER, 2017).

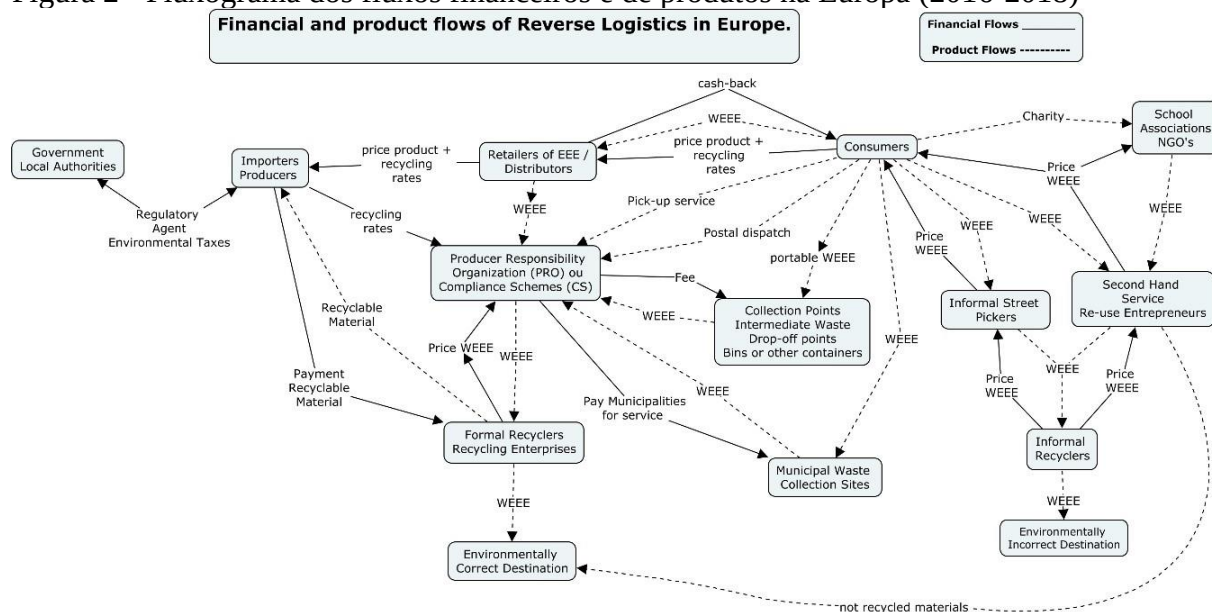
Os recicláveis coletados nos "*Trading Points*" podem seguir diferentes caminhos: podem ser transferidos diretamente para os recicladores formais ou informais, ou ainda serem adquiridos por intermediários ("*Middle Men*"). Esses intermediários compram os recicláveis dos "*Trading Points*" e realizam um pré-processamento antes de repassá-los aos recicladores. A dinâmica dos pontos de comércio e a atuação dos intermediários impactam significativamente o sistema de gestão de REEE, influenciando a eficiência e a abrangência da coleta informal e formal de REEE (STEUER; RAMUSCH; SALHOFER, 2017). A coleta de resíduos é derivada de diversas fontes, o que requer uma ampla infraestrutura. As despesas com mão de obra variam conforme a eficiência dos processos de coleta e tratamento (LI; DONG; LIU; SONG, 2016).

Os subsídios fornecidos pela Política de Fundos na China incentivam a reciclagem, mas não a remanufatura. Os fabricantes, que também podem ser cadastrados no sistema formal como recicladores, conhecem bem os produtos que fabricaram e as dificuldades encontradas no momento da reciclagem. Quando os fabricantes atuam como recicladores, devido ao conhecimento das dificuldades na reciclagem, muitas vezes acabam optando pelo descarte dos REEE.

5.3.2 Europa

Foi considerado o cenário existente na Europa, correspondente aos fluxos financeiros e de produtos de REEE (Figura 2).

Figura 2 - Fluxograma dos fluxos financeiros e de produtos na Europa (2016-2018)



Fonte: Elaborado pelos Autores baseado nos artigos de ANDERSEN (2022); ANDERSEN; JÆGER; MISHRA (2020); FAVOT (2015); FAVOT; GRASSETTI; MASSARUTTO; VEIT (2022); MAYERS; BUTLER (2013); SALHOFER (2017); SCHEINBERG; NESIĆ; SAVAIN; LUPPI *et al.* (2016); SOUSA; AGANTE; CEREJEIRA; PORTELA (2018).

Na Europa, o tratamento ao fim da vida dos equipamentos eletroeletrônicos é regulamentado pela Diretiva 2002/96/CE, que entrou em vigor na União Europeia em fevereiro de 2003. Essa diretiva estabeleceu um sistema que objetivava o aumento da reciclagem e reutilização dos REEE, estipulando um sistema de coleta no qual os consumidores podiam devolver gratuitamente os seus REEE (ROMAGNOLI; DE BRUIJNE; DRAPEAU; OLLION *et al.*, 2022; EUROSTAT, 2024).

A Diretiva 2002/96/CE foi revogada, dando lugar à Diretiva 2012/19/EU, que estabeleceu metas graduais de coleta dos REEE. Em 2016, a meta era coletar o equivalente a 45% dos EEE colocados no mercado nos três anos anteriores, e a partir de 2019, a meta passou a ser de no mínimo de 65% equivalente aos EEE colocados no mercado nos três anos anteriores, ou 85% dos REEE gerados no mesmo ano. Em 2021, foram recolhidos 11 kg de REEE por habitante na Europa. Em 2022, a Europa colocou no mercado 14 bilhões de kg de eletroeletrônicos, gerando 13 bilhões de kg de REEE, o equivalente a 17,6 kg *per capita*. Os REEE formalmente coletados e reciclados corresponderam a 5,6 milhões de kg, equivalente a 42,8%. Apenas a Polônia ultrapassou a meta estabelecida de 85% de coleta e tratamento de REEE, enquanto 19 países ficaram entre 50% e 85%, e 11 países não alcançaram 50%. (ROMAGNOLI; DE BRUIJNE; DRAPEAU; OLLION *et al.*, 2022; EUROSTAT, 2024).

A Diretiva 2012/19/EU tem como objetivo principal evitar o desperdício, com prioridade para a preparação do resíduo para reutilização, seguida pela reciclagem e recuperação, sendo o descarte em aterro sanitário a opção menos indicada (ANDERSEN, 2022). A Diretiva 2008/98/CE, que regulamenta os resíduos em geral, está vigente desde 19 de novembro de 2008. Essa legislação define a reciclagem de resíduos como o reprocessamento de materiais ou substâncias que podem ser utilizados para a mesma finalidade ou para outras finalidades, consistindo em qualquer operação de valorização desses resíduos. A legislação também estabelece o cálculo da meta de reciclagem, que é a soma da reciclagem e da preparação para reutilização dividida pelos resíduos gerados (EUROSTAT, 2024).

Já a Diretiva 2012/19/EU estabelece a responsabilidade do produtor/fabricante pelo tratamento ou descarte adequado dos REEE. Esse sistema é conhecido como EPR (Responsabilidade Estendida do Produtor ou "*Extended Producer Responsibility*"). Os fabricantes podem delegar essa responsabilidade para terceiros, criando Organizações de Responsabilidade do Produtor ou "*Producer Responsibility Organizations*" (PRO). Essas organizações podem ser sem fins lucrativos (mais comuns), agências governamentais (menos utilizadas) ou empresas com fins lucrativos (ocasionalmente utilizadas) (ANDERSEN, 2022; ANDERSEN; JÆGER; MISHRA, 2020; OECD, 2001; SOUSA; AGANTE; CEREJEIRA; PORTELA, 2018). A legislação também exige que os produtos sejam identificados com a marca do produtor/fabricante responsável pelo financiamento da gestão dos REEE relacionados a esses produtos (SANDER; SCHILLING; TOJO; VAN ROSSEM *et al.*, 2007).

As regulamentações podem ser cumpridas também por Organizações Terceirizadas ou "*Third Party Organizations*" (TPO), denominadas como "*compliance schemes*" (CS; esquemas de conformidade). Essas empresas podem ser contratadas diretamente pelos fabricantes ou pelas PROs e possuem responsabilidades diferentes das PROs. As TPOs atuam como prestadoras de serviço no cumprimento das normas regulatórias, contratadas para atividades específicas, como coleta e tratamento, auxiliando no cumprimento das regulamentações. Estas se diferenciam das PROs que são responsáveis pela organização e gerenciamento do processo de coleta e reciclagem, bem como pelo cumprimento das regulações atribuídas aos fabricantes (ANDERSEN, 2022; CAI; CHOI, 2019; FAVOT, 2015; MAYERS; BUTLER, 2013; TESAR; KARIGL; LAMPERT; NEUBAUER *et al.*, 2021; ZHENG; HONG, 2021).

Os fabricantes podem organizar sistemas coletivos, por meio das PROs, ou sistemas de coleta individual, no qual o fabricante não transfere sua obrigação às PROs, mas assume

diretamente a responsabilidade pelo tratamento adequado dos REEE resultantes de seus produtos (FAVOT, 2015). Os sistemas coletivos podem reduzir os custos para os participantes, compartilhando os riscos, reduzindo e administrando as pressões entre as partes, além de simplificar as operações e reduzir os encargos para os municípios, varejistas e consumidores (OECD, 2001). Embora o sistema individual possa demonstrar maior efetividade e facilidade na reutilização e reciclagem dos REEE, os fabricantes devem estabelecer sua própria rota de coleta e tratamento, o que pode resultar em maiores custos (FAVOT, 2015).

Cada país da Europa deve estabelecer sua própria legislação e taxas de acordo com a Diretiva 2012/19/EU, resultando em diferenças nas práticas de tratamento dos REEE (ANDERSEN; JÆGER; MISHRA, 2020). Existem duas taxas principais: as taxas ambientais e as taxas de reciclagem. As taxas ambientais cobrem custos relacionados ao impacto ambiental pela produção e descarte de resíduos perigosos, emissão de poluentes ou uso de recursos naturais, sendo, portanto, mais amplas (DIAS; CENCI; BERNARDES; HUDA, 2022; SEYRING; KLING; WEIßENBACHER; HESTIN *et al.*, 2015). As taxas de reciclagem são pagas pelos produtores e importadores com a finalidade específica de financiar a gestão de REEE, compreendendo a coleta, tratamento e reciclagem. Os custos de reciclagem dos REEE variam expressivamente dependendo do método e da infraestrutura utilizada (SEYRING; KLING; WEIßENBACHER; HESTIN *et al.*, 2015). Os valores provenientes dessas taxas são geralmente repassados às PROs, como cumprimento das obrigações estabelecidas pelo EPR (SOUSA; AGANTE; CEREJEIRA; PORTELA, 2018).

Essas diferenças entre as taxas são observadas nos relatórios dos países. Alguns especificam claramente as taxas de reciclagem, tornando visíveis os valores de financiamento do tratamento ao longo de toda a cadeia. Em outros países, as taxas são estabelecidas como uma porcentagem do faturamento dos fabricantes ou como valores fixos para os EEE fabricados, variando conforme o país e tipo de produto (ANDERSEN; JÆGER; MISHRA, 2020). Podem ainda ser calculadas com base na categoria do produto, na renda *per capita*, nas metas de coleta de REEE e nos custos de mão de obra (SOUSA; AGANTE; CEREJEIRA; PORTELA, 2018). Essas taxas podem ser discriminadas separadamente nas faturas ou documentos comerciais ao preço final do produto. O cálculo pode ser baseado em critérios como valor, peso, volume/tamanho do produto, material utilizado ou uma combinação desses elementos (ANDERSEN; JÆGER; MISHRA, 2020). O conceito de cálculo é semelhante ao do Imposto sobre o Valor Agregado (IVA) aplicado na Europa, que incide sobre o consumo de serviços ou produtos em

diferentes etapas da cadeia de abastecimento, desde a produção até a venda ao consumidor final (EUROPE, 2024).

Um ponto comum entre os países na gestão dos REEE é a utilização do número de EEE colocados no mercado como base para o pagamento do tratamento às PROs e para informar as autoridades europeias (ANDERSEN; JÆGER; MISHRA, 2020). Um dos grandes desafios da gestão dos REEE na Europa consiste no acompanhamento dos fluxos dos REEE. A quantificação dos REEE provém dos resíduos coletados e separados, os quais são contabilizados: a) a partir da entrega gratuita nos pontos de coleta, b) pelos distribuidores e separados pelos fornecedores, c) por terceiros que promovem a coleta em seu nome (PROs), d) quando são recepcionados fora do sistema. Outros desafios incluem taxas não contabilizadas e a capacidade de inspeção e fiscalização pelo governo. Com base nesses pontos, verifica-se a necessidade de melhorias nos relatórios para demonstrar a efetiva rota dos REEE no continente (COMMISSION; ENVIRONMENT; EUROPE, 2017).

Os custos associados à devolução dos resíduos pelos consumidores podem ser recuperados pelos fabricantes de duas formas: incorporando os custos no preço do produto ou destacando-os como uma taxa de reciclagem. As PROs recuperam seus custos com base na quantidade de produtos vendidos pelos fabricantes, utilizando custos fixos ou compartilhamento de custos variáveis entre os fabricantes conforme a participação destes no mercado. As coletas realizadas pelas PROs são acordadas com os fabricantes, considerando a quantidade de produtos comercializados (MAYERS; BUTLER, 2013).

As taxas ambientais na Europa são calculadas com base em diversas normas técnicas. Um exemplo é a WEEELABEX, desenvolvida pelo WEEE Forum com apoio do programa LIFE da Comissão Europeia, que originou a norma EN 50625-1, a qual define requisitos gerais para o tratamento de REEE. Em 2023, o CENELEC, com base nos princípios da WEEELABEX, publicou 445 normas específicas (ELETROTÉCNICA, 2024). Essas diretrizes estabelecem as frações de resíduos que devem ser eliminadas ou recuperadas, com o objetivo de prevenir a poluição, reduzir emissões e maximizar a recuperação de materiais recicláveis ao longo de toda a cadeia de tratamento. O CENELEC (Comitê Europeu de Normalização Eletrotécnica) define requisitos gerais, administrativos e técnicos, além de métodos para o cálculo de metas de recuperação e reciclagem. Já o programa LIFE (*L'Instrument Financier pour l'Environnement*), criado em 1992 e gerido pela Comissão Europeia, financia iniciativas voltadas ao desenvolvimento e à implementação de políticas ambientais e climáticas

(SEYRING; KLING; WEIßENBACHER; HESTIN *et al.*, 2015; ELETROTÉCNICA, 2024; ORGANISATION, 2024).

A responsabilidade financeira pelo tratamento adequado dos REEE, incluindo coleta seletiva, valorização e recuperação, é assumida pelos produtores, podendo incluir também a preparação para reutilização e reciclagem, além da intervenção de terceiros para a operacionalização (ROMAGNOLI; DE BRUIJNE; DRAPEAU; OLLION *et al.*, 2022). Os fabricantes têm três tipos de responsabilidades no âmbito do sistema EPR:

- Responsabilidade operacional: Os fabricantes são responsáveis por garantir que os sistemas de coleta e reciclagem sejam operados de forma eficiente. Isso pode envolver a organização direta desses sistemas ou a contratação de terceiros para realizar essas operações em seu nome.
- Responsabilidade financeira: Os fabricantes devem arcar com os custos associados à coleta, tratamento, recuperação e reciclagem dos REEE. Isso pode incluir o financiamento das operações de coleta seletiva e dos processos de valorização e recuperação dos materiais.
- Responsabilidade informativa: Os fabricantes devem informar os consumidores sobre as formas corretas de descarte dos REEE, assim como sobre os sistemas de coleta disponíveis. Eles também precisam garantir que os produtos estejam devidamente rotulados para facilitar a identificação e o tratamento adequado dos resíduos (FAVOT, 2015).

Na Europa, as PROs são responsáveis pelo gerenciamento das coletas dos REEE e recebem pagamento pelos serviços prestados. Elas administram os pagamentos necessários para financiar essas operações e subcontratam empresas de reciclagem para realizar as operações diárias de coleta nos pontos de coleta públicos ou varejistas. As informações sobre as coletas são repassadas ao governo por meio de relatórios (FAVOT; GRASSETTI; MASSARUTTO; VEIT, 2022; MAYERS; BUTLER, 2013).

As PROs desempenham um papel fundamental na gestão do sistema de coleta e transporte dos REEE (ANDERSEN; JÆGER; MISHRA, 2020). A definição e organização dos pontos de coleta variam de acordo com a legislação de cada país. Por exemplo, na Itália, os pontos de coleta são estabelecidos pelo Centro de Coordenação de REEE (CdC RAEE). As PROs são responsáveis por garantir que os resíduos coletados sejam encaminhados para os locais de reciclagem de forma adequada (FAVOT, 2015).

As PROs podem atuar em diferentes países ou organizações, e quando isso ocorre são estabelecidos acordos e estruturas comuns para o controle das responsabilidades e quantidades coletadas. Por exemplo, na Irlanda e em Portugal, é necessária uma autorização formal do governo, com base na aprovação e monitoramento dos planos de coleta apresentados por cada PRO. Esses acordos e estruturas comuns garantem uma gestão mais eficiente dos REEE, permitindo um controle adequado sobre as atividades das PROs e a quantificação dos resíduos coletados (MAYERS; BUTLER, 2013).

Os fabricantes podem implementar sistemas de devolução que funcionam como incentivos econômicos (FAVOT; GRASSETTI; MASSARUTTO; VEIT, 2022). A conscientização dos consumidores sobre práticas sustentáveis de recuperação de REEE é essencial para o sucesso dos sistemas de coleta e tratamento (ANDERSEN; JÆGER; MISHRA, 2020). No sistema de recompensa, os consumidores entregam seus aparelhos aos varejistas e recebem um valor em dinheiro ou crédito. Os aparelhos são avaliados por especialistas e, dependendo da condição e do modelo, podem ser reutilizados ou reconicionados. Aqueles sem valor agregado são encaminhados para reciclagem (ROMAGNOLI; DE BRUIJNE; DRAPEAU; OLLION *et al.*, 2022).

Para incentivar a devolução de telefones celulares usados, empresas como Apple, Samsung e Fairphone desenvolveram esquemas específicos (ROMAGNOLI; DE BRUIJNE; DRAPEAU; OLLION *et al.*, 2022). A Apple, por exemplo, possui o sistema Apple Trade In, no qual o consumidor recebe um valor de desconto na compra de um novo produto ou um vale-presente Apple. Se o produto não for elegível para o desconto, a reciclagem é gratuita. Todo o processo pode ser realizado online ou nas Apple Stores, com valores de negociação que variam de US\$ 30 a US\$ 620. Por exemplo, a troca de um iPhone 14 Pro Max pode valer até US\$ 620, enquanto um iPhone 14 pode render até US\$ 400 (APPLE, 2024). Essas práticas incentivam a devolução e a correta gestão dos REEE, contribuindo para a eficácia do sistema de Responsabilidade Estendida do Produtor (EPR) na gestão sustentável desses resíduos (FAVOT; GRASSETTI; MASSARUTTO; VEIT, 2022).

Outro sistema é o de conveniência, que distribui pontos de coleta em locais públicos, escolas e lojas. Esse sistema visa tornar o processo de devolução dos REEE mais simples e acessível para os consumidores, incentivando-os a participar do programa de coleta e tratamento adequado. Ao facilitar a devolução, espera-se aumentar a quantidade de retorno desses

produtos e, conseqüentemente, melhorar a efetividade da reutilização e reciclagem, contribuindo para a redução do impacto ambiental causado pelos REEE (ROMAGNOLI; DE BRUIJNE; DRAPEAU; OLLION *et al.*, 2022).

Há também o sistema de caridade, onde os aparelhos são doados diretamente a entidades beneficentes ou vendidos, e o valor arrecadado é revertido para essas instituições. Esse sistema pode ser implementado por meio de parcerias com instituições que coletam e recondicionam os produtos para doação ou venda, ou através de campanhas de coleta realizadas pelas empresas, que vendem os produtos e destinam parte dos lucros às instituições (ROMAGNOLI; DE BRUIJNE; DRAPEAU; OLLION *et al.*, 2022).

As PROs trabalham com sistemas de incentivo e conveniência para tornar o processo de devolução dos REEE mais rápido, fácil e atraente aos consumidores. Esses sistemas ocorrem de várias formas, como:

- "*Drop-off points*" (pontos de entrega) próximos e acessíveis, onde os consumidores podem deixar seus REEE.
- "*Bins or other containers*" (recipientes ou contêineres) atrativos, moldados e automatizados, disponíveis em locais convenientes.
- "*Pick-up service*" (serviço de coleta) onde são recolhidos a pedido do consumidor em sua residência ou escritório.
- "*Postal dispatch*" (envio pelo correio) em que os resíduos podem ser devolvidos por meio de envio postal, custeado pela PRO, de forma gratuita ao consumidor (ROMAGNOLI; DE BRUIJNE; DRAPEAU; OLLION *et al.*, 2022).

A coleta de grandes resíduos eletroeletrônicos, como geladeiras e máquinas de lavar, na União Europeia ocorre por meio de três vias principais: (i) entrega pelo consumidor em pontos de coleta designados; (ii) retirada gratuita pelo distribuidor (varejista) na entrega de um novo equipamento similar adquirido pelo consumidor (sistema "um por um"); e (iii) coleta domiciliar por empresas terceirizadas contratadas por PROs (UNIVERSITY; NETHERLANDS; DELOITTE; CENTER, 2014).

Além de negociar com os fabricantes, as PROs precisam manter uma comunicação sólida com os órgãos governamentais, que exercem pressão comercial e política para garantir o cumprimento das obrigações relacionadas à gestão dos REEE. Essa comunicação beneficia todas as partes envolvidas: fabricantes, governo e consumidores. As PROs devem ainda dialogar eficientemente com os pontos de coleta, assegurando a satisfação com os serviços prestados. Caso contrário, esses pontos podem optar por outra PRO ou informar os órgãos governamentais

sobre qualquer insatisfação. Uma comunicação eficaz com todos os envolvidos impactará na eficiência e eficácia do sistema de gestão dos REEE (MAYERS; BUTLER, 2013).

Além disso, quando os PROs não cumprem com as obrigações estabelecidas aos fabricantes, pelos quais passam a ser responsáveis, podem ser impostas multas ou outras sanções impostas pelas autoridades governamentais, podendo intervir para que estas organizações não adotem práticas inadequadas, como coletar menos ou mais resíduos do que o necessário para obter vantagens financeiras (MAYERS; BUTLER, 2013).

As PROs devem entender, junto com a municipalidade, a estrutura e as legislações vigentes, equilibrando os requisitos de coleta e a capacidade das empresas de resíduos para operar de maneira econômica e contínua (MAYERS; BUTLER, 2013). Os municípios têm a responsabilidade de adaptação de seus sistemas de gestão de REEE, incluindo a modernização dos sistemas de gestão dos resíduos sólidos e a promoção diária da integração das práticas de reciclagem e de prevenção na geração de resíduos (SCHEINBERG; NESIĆ; SAVAIN; LUPPI *et al.*, 2016).

No sistema de coleta e tratamento de REEE, municípios, varejistas e fabricantes são atores importantes com interesses e objetivos diferentes, o que pode gerar desafios na busca por estratégias e planos de cobrança eficientes. Os produtores buscam cumprir a legislação e o sistema EPR através das PROs a preços competitivos e, com os pontos de coleta, visam melhorar os serviços e sua eficiência (MAYERS; BUTLER, 2013).

Embora os estudos sobre a Europa nem sempre explorem o setor informal de forma aprofundada, dando a impressão de que ele é inexistente ou irrelevante, evidências indicam o contrário. Recicladores informais atuam coletando REEE em locais de descarte, ruas, contêineres e diretamente dos consumidores. Suas atividades, apesar de representarem uma importante fonte de renda, podem comprometer os esforços institucionais para a gestão adequada dos resíduos e gerar riscos à saúde e segurança pública (SCHEINBERG; NESIĆ; SAVAIN; LUPPI *et al.*, 2016). Por outro lado, o sistema informal pode complementar o formal, especialmente em regiões com infraestrutura insuficiente, contribuindo para o aumento da coleta e, indiretamente, para o cumprimento de metas ambientais (ROMAGNOLI; DE BRUIJNE; DRAPEAU; OLLION *et al.*, 2022). Dessa forma, a integração desses atores ao sistema oficial pode maximizar os benefícios e mitigar os impactos negativos. Ainda que o setor informal traga ganhos de eficiência, sua atuação desregulada também impõe desafios à sustentabilidade do sistema europeu de gestão de REEE (SCHEINBERG; NESIĆ; SAVAIN; LUPPI *et al.*, 2016).

Quando o governo aplica um sistema de impostos e recompensas, estabelecendo penalidades por não conformidade, promove um cenário mais estável para os recicladores, baseado na transparência. Penalidades excessivas sobrecarregam os informais, enquanto penalidades pouco rigorosas incentivam práticas ilegais e poluição. O objetivo é que os recicladores informais, penalizados rigorosamente, se formalizem. Um sistema de recompensa menor, incentiva os fabricantes a procurarem terceiros para reciclagem, enquanto altas cobranças levam os fabricantes a adotarem canais independentes (WANG; LI; MISHIMA; ADACHI, 2020; WANG; HUO, 2023; ZHAO; WANG; NI, 2020).

5.3.2.1 Responsabilidade Estendida do Produtor (EPR)

O EPR surgiu na Europa no final da década de 1980 como uma solução para os desafios encontrados pelos municípios na gestão dos REEE, que aumentavam consideravelmente. Com a iniciativa, esperava-se a redução da geração dos REEE e o aumento de sua reciclagem, estabelecendo a responsabilidade aos fabricantes pela gestão dos resíduos no fim de vida, ou seja, responsáveis financeiramente direta e indiretamente pelos consumidores (FU; ZHONG; CHEN; LIU, 2020; LINDHQVIST, 2000; OECD, 2016).

Extended Producer Responsibility ou Responsabilidade Estendida do Produtor (EPR) consiste no princípio de política ambiental que transfere ao fabricante a responsabilidade física e financeira por seus produtos após o consumo, incluindo coleta, reciclagem e destinação final, integrando custos ambientais ao ciclo de vida dos produtos (LINDHQVIST, 2000).

No contexto do EPR, a sua efetividade também depende da integração coordenada de vários atores, cada um com funções específicas: os produtores e importadores financiam o sistema de logística reversa; os PROs são responsáveis pela operacionalização da coleta e tratamento dos resíduos; o governo tem papel regulador, fiscalizador e indutor de políticas públicas; os consumidores (talvez os mais importantes) são os que devem destinar adequadamente os resíduos (LINDHQVIST, 2000; OECD, 2016).

No Brasil, o Decreto nº 10.240/2020 representa um esforço normativo para aplicar o EPR ao setor de eletroeletrônicos, exigindo que fabricantes, importadores e comerciantes estabeleçam sistemas de logística reversa com pontos de recebimento e destinação adequada (BRASIL, 2020). No entanto, a Lei 12.305/2010 estabelece a responsabilidade compartilhada do ciclo de vida dos produtos entre fabricantes, comerciantes, consumidores e poder público (BRASIL, 2010).

No modelo brasileiro, ao instituir a adesão aos sistemas coletivos através de instrumentos como acordos setoriais, com caráter contratual e não universal, dificultam a consolidação de um EPR semelhante ao modelo europeu, limitando a sua efetividade (TRENTINELLA, 2014).

A China e a Europa adotaram o princípio do EPR, a qual pode ser realizada pelas PROs. De acordo com a Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Económico (OCDE), a Tabela 2, com base no EPR, demonstra a existência de quatro instrumentos de coleta de REEE.

Tabela 2 - Instrumentos para realização de coleta no sistema EPR

Instrumentos de coleta	Características de cada instrumento
Sistema de devolução “Coleta” (<i>Product take-back</i>)	a) Responsabilidade dos Fabricantes pelos produtos em fim de vida. Uma ação obrigatória ou facultativa. Os Fabricantes podem ainda para cumprir a meta fornecer aos consumidores incentivos para devolução dos resíduos juntos aos varejistas.
Instrumentos baseados no mercado (<i>Economic and market-based instruments</i>)	a) Depósito-reembolso (<i>Deposit-refund</i>): O consumidor paga um valor no momento da compra que é devolvido (parcial ou total) quando entrega o resíduo.
	b) Taxa de Descarte Avançado (<i>Advanced disposal fees (ADF)</i>): O consumidor paga uma taxa no momento da compra do produto, valor que será utilizado para financiar o tratamento pós-consumo, podendo ser cobrado por órgãos públicos ou empresas privadas. O valor desta taxa é definido com base nos custos estimados com coleta e tratamento dos resíduos. Caso não seja utilizada esta taxa, poderá retornar ao consumidor.
	c) Impostos sobre materiais (<i>Material tax</i>): Trata-se de um imposto cobrado sobre os materiais utilizados na produção, incentivando o uso de materiais recicláveis. Esta taxa incide por exemplo em materiais difíceis de reciclar ou materiais tóxicos. O imposto tem como objetivo cobrir as despesas com tratamento (coleta, triagem e tratamento dos produtos pós-consumo).
	d) Combinação Imposto/Subsídio (<i>Upstream combination tax/subsidy (UCTS)</i>): Os produtores pagam impostos que posteriormente serão utilizados para subsidiar o tratamento dos resíduos. Os fornecedores ou recicladores têm incentivos através das taxas de impostos para alterarem a forma de fabricação, e o fornecimento de um mecanismo de financiamento para subsidiar a reciclagem e o tratamento.
Regulamentações e padrões de desempenho (<i>Regulations and performance standards</i>)	a) O uso de materiais reciclados pode incentivar a devolução e reciclagem dos resíduos, situação que é combinado com as normas fiscais (taxas/impostos), pois incentivam a reformulação de produtos. As indústrias podem ser obrigadas ou não a adotarem o padrão de desempenho.
Informações baseadas em Instrumentos (<i>Information-based instruments</i>)	a) As comunicações e informações prestadas em rótulos de produtos, seus componentes, separação de resíduos, responsabilidades dos produtos, materiais utilizados, informações sobre recicladores, formam a consciência pública, apoiando assim o sistema EPR.

Fonte: Adaptada de PATIL; RAMAKRISHNA (2020); OECD (2016).

O sistema de devolução tem uma frequência de utilização maior. Ele facilita a coleta e reciclagem, além de ter como princípio básico a responsabilização do fabricante pelo produto

até o fim de sua vida útil. Por sua vez, o menos utilizado é o sistema de informação, uma vez que necessita ser utilizado em conjunto com outros instrumentos. Este sistema, sozinho, apesar de importante para ampliar a conscientização dos consumidores, não produz um impacto significativo na conduta destes (PATIL; RAMAKRISHNA, 2020).

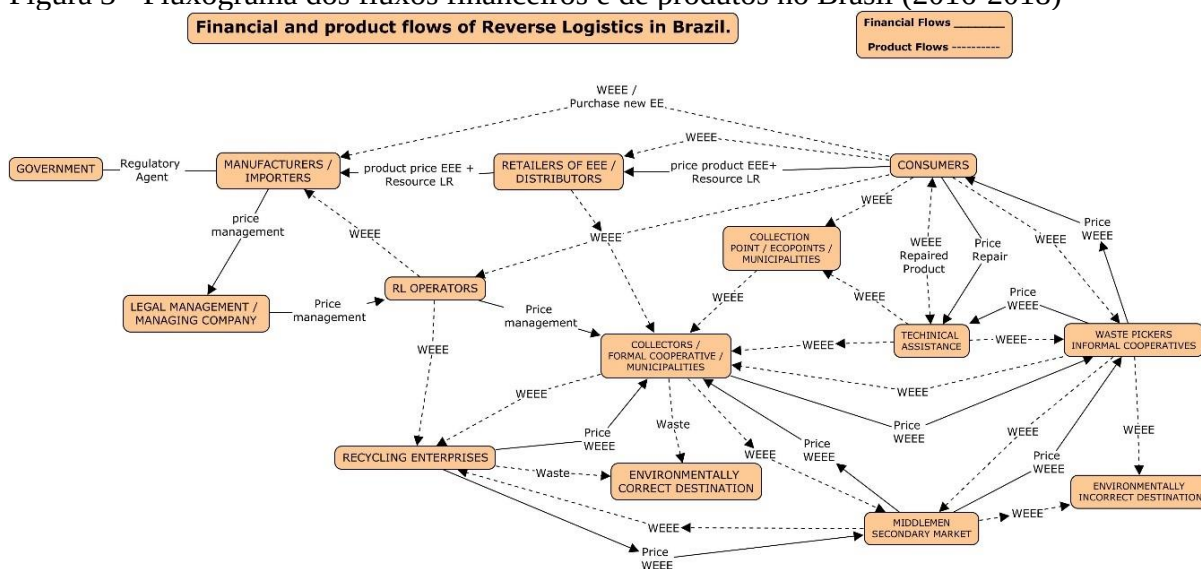
O sistema intervencionista da China aumenta a reciclagem e fortalece o sistema formal, mas enfrenta problemas significativos, como fraudes, ajustes frequentes de recursos para manter os subsídios e o desenvolvimento de um ambiente não sustentável, dependente dos subsídios (FU; ZHONG; CHEN; LIU, 2020). Na China, os casos de fraude podem ser penalizados com multas expressivas ou até penas de prisão. As empresas envolvidas podem ter suas licenças revogadas e sua reputação manchada, resultando em perda de valor no mercado. Medidas como monitoramento em tempo real, remanejamento de pessoal e recursos para a fiscalização são tomadas pela China para combater a ocorrência de fraudes (FU; ZHONG; CHEN; LIU, 2020).

Na Europa, as empresas que descumprem as regulamentações são penalizadas com multas significativas. As autoridades realizam frequentemente inspeções e formalizam as situações encontradas em relatórios que podem ser encaminhados para a instauração de procedimentos criminais (TESAR; KARIGL; LAMPERT; NEUBAUER *et al.*, 2021).

5.3.3 Brasil

Nos mesmos moldes realizados anteriormente, foi elaborado o fluxograma relativo ao Brasil, compreendendo os fluxos financeiros e de produtos destinados à Logística Reversa de REEE (Figura 3).

Figura 3 - Fluxograma dos fluxos financeiros e de produtos no Brasil (2016-2018)



Fonte: Elaborado pelos Autores baseado nos artigos de ALÓS; MILAN; EBERLE (2023); BRASIL (2010, 2020, 2022); OLIVEIRA; NETO; SILVA; MACHADO SANTOS (2020); PATIL; RAMAKRISHNA (2020); VARGAS; CAMPOS; LUNA (2023).

Um marco ambiental no Brasil foi a promulgação da Lei nº 12.305/2010, denominada Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), resultado das discussões sobre o manejo de resíduos sólidos, que prevê a gestão integrada e o gerenciamento dos resíduos sólidos (BRASIL, 2010). A PNRS estabelece, em seu artigo 30, a responsabilidade compartilhada na logística reversa entre consumidores, fabricantes, importadores, distribuidores e comerciantes de produtos eletroeletrônicos. Esses atores são responsáveis pela estruturação e implementação do Sistema de Logística Reversa (BRASIL, 2010). A PNRS é regulamentada pelo Decreto 10.936/2022 (BRASIL, 2022).

Em 31/10/2019, foi estabelecido um acordo setorial para a implementação de um sistema de logística reversa de produtos eletroeletrônicos de uso doméstico e seus componentes, consistentes em equipamentos com funcionamento dependente de corrente elétrica não superior a 240 volts. Esse acordo foi posteriormente transformado no Decreto 10.240/2020. O objetivo do Decreto é estabelecer a obrigatoriedade da implementação do sistema de logística reversa de produtos eletroeletrônicos de uso doméstico e seus componentes, em cumprimento ao artigo 33 da Lei nº 12.305/2010. De acordo com essas legislações, os produtos eletroeletrônicos descartados em pontos de recebimento pelos consumidores são destinados a pontos de consolidação, onde aguardam destinação ambientalmente adequada. É vedada a comercialização, doação, transferência ou qualquer outra ação para pessoas que não integrem o sistema de logística reversa (BRASIL, 2020).

Com o intuito de fiscalizar e acompanhar o desenvolvimento da implementação do sistema de logística reversa, tanto coletivo quanto individual, o Decreto 10.240/2020 criou o Grupo de Acompanhamento de Performance (GAP). Esse grupo é composto por fabricantes, importadores, distribuidores, comerciantes e entidades gestoras. Para a avaliação dos resultados, os responsáveis pela implementação da logística reversa devem prestar informações ao GAP e ao SINIR (Sistema Nacional de Informações sobre a Gestão dos Resíduos Sólidos). O GAP divulga anualmente um relatório com os dados fornecidos (BRASIL, 2020).

A partir do Decreto 10.240/2020, foi oficializado em 29/04/2020 o Grupo de Acompanhamento e Performance do Setor Eletroeletrônico (GAP), ao qual aderiram a ABINEE (Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica), ABRADISTI (Associação Brasileira dos Distribuidores de Produtos e Serviços de Tecnologia da Informação), CNC (Confederação Nacional do Comércio), ASSESPRO (Federação das Associações das Empresas Brasileiras de Tecnologia da Informação) e GREEN ELETRON (Gestora para Resíduos de Equipamentos Eletroeletrônicos Nacional) (ELETRON, 2021). Compete ao GAP o acompanhamento da implementação e operacionalização do sistema de logística reversa, devendo identificar problemas e desafios que impeçam o cumprimento desta obrigação.

Para cumprir a legislação, os responsáveis pela logística reversa fundaram duas entidades gestoras que atualmente são responsáveis pela estruturação, implementação e operacionalização da logística reversa no Brasil: a ABREE (Associação Brasileira de Reciclagem de Eletroeletrônicos e Eletrodomésticos) e a GREEN ELETRON (ALÓS; MILAN; EBERLE, 2023). Comparando as entidades gestoras e as PROs, verifica-se que ambas possuem funções e responsabilidades diferentes. As PROs têm um foco mais operacional no sistema de logística reversa, enquanto as entidades gestoras possuem funções mais amplas de supervisão e coordenação do sistema como um todo (FAVOT; GRASSETTI; MASSARUTTO; VEIT, 2022; FU; ZHONG; CHEN; LIU, 2020).

A ABREE, empresa sem fins lucrativos fundada em 29/06/2011, realizou em 2021 a gestão da logística reversa de 54 empresas, representando 186 marcas de produtos eletroeletrônicos de uso doméstico. Esta gestora contrata, fiscaliza e audita os serviços prestados por terceiros, que incluem a coleta de produtos eletroeletrônicos domésticos e seus componentes descartados pelos consumidores no comércio varejista, municípios, campanhas ou pontos itinerantes, todos mediante parceria previamente estabelecida. Em 2021, a ABREE atuava em 1.224 municípios e 3.417 Pontos de Entrega Voluntária (PEV), dos quais 26,45% estavam instalados na cidade de São Paulo. Foram destinados de forma ambientalmente adequada 1.245 toneladas

de resíduos eletroeletrônicos e eletrodomésticos, representando 1% da quantidade em peso dos eletroeletrônicos e eletrodomésticos colocados no mercado por suas associadas, que foram encaminhados para 7 recicladoras (ELETRODOMÉSTICOS, 2022).

A GREEN ELETRON, também uma empresa gestora sem fins lucrativos, foi fundada pela ABINEE (Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica) em 2016. Atualmente, a GREEN ELETRON possui 60 empresas associadas, 14 empresas distribuidoras e 63 empresas varejistas parceiras. Em 2021, a GREEN ELETRON operava 812 Pontos de Entrega Voluntária (PEV) e procedeu com a destinação ambientalmente adequada de 715,83 toneladas de REEE, que foram encaminhados para 7 recicladoras, atendendo 221 municípios em 14 estados (ELETRON, 2021).

A operacionalização do sistema de logística reversa pode ser realizada coletivamente, por meio de entidades gestoras constituídas como pessoas jurídicas sem fins lucrativos ou por associações de fabricantes e importadores (BRASIL, 2020). Nesse caso, os responsáveis pela logística reversa devem estabelecer contratos com as entidades gestoras, estipulando o pagamento direto dos recursos financeiros (BRASIL, 2020). Alternativamente, a operacionalização pode ser desenvolvida individualmente, diretamente pelas empresas ou por terceiros, devendo ser comprovado aos órgãos ambientais que não haverá atuação de entidades gestoras (BRASIL, 2020).

Na Tabela 3, apresentam-se as obrigações estabelecidas aos responsáveis pela implementação da logística reversa e gestão dos REEE, de acordo com as legislações mencionadas.

Tabela 3 - Obrigações dos atores na Logística Reversa nos termos da legislação brasileira

Fabricantes	Decreto 10.240/2020 Decreto 10.936/2022	a) Adesão ao sistema coletivo (entidades gestoras). b) Adesão ao sistema individual (empresa ou terceiros). c) Participação na execução dos planos de comunicação e de educação ambiental não formal. d) Estruturar, implementar e operar os sistemas de logística reversa, assegurando a sua sustentabilidade econômico-financeira. e) Adotar procedimento de compra de produtos e instituir pontos de entrega dos resíduos.
Importadores	Decreto 10.240/2020	a) Adesão ao sistema coletivo (entidades gestoras). b) Adesão ao sistema individual (empresa ou terceiros). c) Participação na execução dos planos de comunicação e de educação ambiental não formal.
Distribuidores	Decreto 10.240/2020	a) Adesão às entidades gestoras. b) Formalização de sua participação no sistema individual. c) Instalação de PEVs
Comerciantes de produtos Eletroeletrônicos	Decreto 10.240/2020	a) Adesão às entidades gestoras. b) Formalização de sua participação no sistema individual. c) Instalação de PEVs
Entidades gestoras	Decreto 10.240/2020	a) Declarar os resultados da logística reversa, contabilizados pelo peso dos produtos eletrônicos colocados no mercado e sua destinação final ambientalmente adequada. b) Demonstrar o cumprimento das metas estabelecidas. c) Acompanhar a estruturação, a implementação, a operação e a gestão do sistema de logística reversa. d) Contratar ou subcontratar terceiros para a prestação de serviços. e) Participação na execução dos planos de comunicação e de educação ambiental não formal. f) Prestar informações ao Grupo de Acompanhamento de Performance e ao Sinir. g) Prestar informações ao Ministério do Meio Ambiente, quando necessário.
Cooperativas e Associações de Catadores	Decreto 10.936/2022	a) Empresas formalizadas poderão integrar o sistema de logística reversa, mediante acordo formal estabelecido com as Entidades Gestoras.
Consumidores	Decreto 1.0936/2022	a) Acondicionar e disponibilizar adequadamente os resíduos para coleta ou devolução.
Governo (União, Estados, Municípios e Distrito Federal)	Decreto 10.936/2022 Lei 12.305/2010	a) Compete ao Distrito Federal e Municípios a gestão integrada de resíduos sólidos gerados em seus territórios. b) A fiscalização será realizada pelos órgãos federais, Sisnama, SNVS (Sistema Nacional de Vigilância Sanitária) e SUASA (Sistema Unificado de Atenção à Sanidade Agropecuária). c) Compete aos Estados e Distrito Federal planejar, promover e executar funções públicas de gestão dos resíduos sólidos. d) Compete aos Estados e Distrito Federal atividade de geradores de resíduos sólidos através do licenciamento ambiental. e) Compete aos Estados e Distrito Federal incentivar a limpeza urbana e manejo de resíduos sólidos de forma regionalizada através de consórcios ou arranjos. f) Compete a União, os Estados, o Distrito Federal e os Municípios a organização e manutenção dos Sistema Nacional de Informações sobre a Gestão dos Resíduos Sólidos (Sinir), Sinisa e o Sinima. g) Devem os Estados, o Distrito Federal e os Municípios fornecer à União informações (na forma e periodicidade) da lei para o Sinir.

Fonte: Adaptada de BRASIL (2010, 2020, 2022, 2023).

A PNRS permite ao poder público instituir medidas indutoras e linhas de financiamento para iniciativas focadas na prevenção e redução da geração de resíduos sólidos, implementação de sistemas de coleta seletiva e logística reversa, descontaminação de áreas contaminadas, entre outras. Essas linhas de crédito podem ser oferecidas por instituições oficiais (BRASIL, 2010).

O Decreto 10.936/2022, que revogou o Decreto 7.404/2010, estabelece que os estados, o Distrito Federal e os municípios podem acessar recursos financeiros da União, destinados a serviços correspondentes à gestão de resíduos sólidos, desde que elaborem planos de resíduos sólidos, comprovem regularidade fiscal e disponibilizem informações atualizadas no Sinir, abrangendo os REEE (BRASIL, 2022).

O Decreto 10.240/2020 determina que não haverá remuneração, ressarcimento ou pagamento aos consumidores que entregam produtos eletroeletrônicos nos pontos de recebimento, exceto quando houver mecanismos de incentivos oferecidos pelas empresas ou entidades gestoras (BRASIL, 2020). A sustentabilidade financeira do sistema de logística reversa deverá ser alcançada através de recursos financeiros pagos pelos fabricantes e importadores diretamente às entidades gestoras ou por sistemas individuais realizados diretamente pelos fabricantes e importadores. Esses recursos devem cobrir todas as fases do sistema, incluindo educação ambiental e planos de comunicação não formal, proporcionais à participação no mercado de eletroeletrônicos de uso doméstico e ajustados para cada tipo de eletroeletrônico com base em critérios técnicos, econômicos e nas particularidades dos produtos (BRASIL, 2020).

O Decreto 10.240/2020 permite que os valores correspondentes aos recursos financeiros sejam informados integralmente na venda do produto através da nota fiscal. Além disso, especifica que os custos e despesas relacionados ao descarte dos produtos serão pagos exclusivamente pelos consumidores ou pela pessoa que realize o descarte, isentando as empresas, entidades gestoras ou outros participantes do sistema de logística reversa (BRASIL, 2020).

A União, os estados, municípios e o Distrito Federal podem, respeitando a Lei de Responsabilidade Fiscal, conceder incentivos fiscais, financeiros e creditícios para empresas de limpeza urbana, indústrias de reciclagem e projetos relacionados à responsabilidade pelo ciclo de vida dos produtos (BRASIL, 2010). Embora a legislação autorize esses incentivos, na prática, eles ocorrem em poucas situações, não promovendo uma expansão significativa na gestão de REEE (SOUZA, 2019). Um exemplo é o ICMS Ecológico (Imposto sobre Operações relativas à Circulação de Mercadorias e sobre Prestações de Serviços), um instituto financeiro que

incentiva práticas ambientais nos municípios, destinado ao meio ambiente natural, regulamentado em alguns estados do país, mas que não abrange especificamente a gestão de REEE. Infelizmente, este instituto financeiro ambiental tende a acabar com a reforma tributária (OLIVEIRA; VALIM, 2018; MATTA; ANTUNES, 2023).

No Brasil, além das legislações federais, os estados e municípios também podem estabelecer regramentos específicos para suas regiões, desde que em conformidade com a Constituição e as legislações federais. Alguns estados, inclusive, já possuíam leis estaduais antes da realização do acordo setorial e do Decreto de 2020, conforme pode ser verificado no Anexo I. As empresas e pessoas físicas que descumprem as legislações ambientais podem ser responsabilizadas civil, criminal e administrativamente. As penalidades podem incluir multas, determinações de medidas corretivas do dano causado, revogação de licenças, indenizações e até mesmo prisão (RODRIGUES; BOSCOV; GÜNTHER, 2020).

Com a ratificação da Convenção da Basiléia no Brasil, através dos Decretos 875/1993 e 4.581/2003 e a Resolução Conama 452/2012, são proibidas as importações de resíduos definidos como “outros resíduos” e são restritas as importações dos resíduos “controlados”. O órgão responsável pela emissão de autorização para importação, exportação e trânsito de resíduos perigosos ou controlados é o Ibama, que se fundamenta em seus regulamentos, como a Instrução Normativa 12/2003 e a Portaria 2.334/2021. Parte dos resíduos produzidos na Europa e nos Estados Unidos não é reciclada devido aos altos custos envolvidos neste processo. Esses resíduos são então exportados para países em desenvolvimento com a justificativa de que serão reutilizados, como China, Índia, Paquistão, Nigéria e Brasil (OLIVEIRA; NETO; SILVA; MACHADO SANTOS, 2020; PATIL; RAMAKRISHNA, 2020).

Na logística reversa formal, os resíduos são entregues em pontos comerciais, Pontos de Entrega Voluntária (PEVs) ou através de campanhas realizadas pelo consumidor ou assistência técnica. Esses resíduos são coletados e transportados pela entidade gestora até as recicladoras formais ou aos fabricantes, distribuidores ou importadores, e posteriormente enviados para a indústria processadora. Um grande desafio é a combinação dos atores formais e informais, e a integração destes informais com condições de trabalho adequadas, o que possibilitaria a melhoria na eficiência e nos métodos de tratamento (BRITO; RUIZ; KNISS; SANTOS, 2022).

As pessoas físicas podem entregar voluntariamente seus resíduos nos PEVs, utilizar a coleta porta-a-porta realizada pelo município através da coleta seletiva, ou entregar diretamente na sede em caso de contratos para grandes volumes (GIESE; XAVIER; OTTONI;

ARAÚJO, 2022). O envolvimento das cooperativas de catadores ou dos próprios catadores como atores da logística reversa é um diferencial na legislação brasileira, devido ao seu papel importante na coleta e tratamento. No entanto, questões relacionadas à saúde, segurança e proteção ambiental, especialmente para os informais, muitas vezes não são consideradas (DEMAJOROVIC; AUGUSTO; SOUZA, 2016; GIESE; XAVIER; OTTONI; ARAÚJO, 2022; SOUZA, 2019).

No Brasil, foram identificadas 379 empresas, 43 cooperativas e associações, 5 ONGs (Organizações Não Governamentais) e 12 CRCs (Centros de Recondicionamento de Computadores) relacionadas de acordo com seu CNAE (Classificação Nacional das Atividades Econômicas) e que possivelmente atuam na cadeia de REEE. Destas empresas, 67% estão localizadas na região Sudeste, 18% no Sul, 7% no Nordeste, 5% no Centro-Oeste e 3% no Norte. A maioria dessas empresas, cerca de 81,8%, são microempresas com um faturamento de até 360 mil reais. As grandes empresas, que são produtoras, representam 1,6% e têm faturamentos de até 3 milhões de reais, efetuando reparos, remanufatura e processamento de materiais secundários (XAVIER; OTTONI; SIERPE, 2021).

Até 2021, as empresas de reciclagem possuíam crédito em relação ao COFINS e PIS/PSEP na aquisição de materiais recicláveis como insumos, até que o Supremo Tribunal Federal (STF) julgou essa prática inconstitucional por falta de regulamentação (BRASIL, 2021). Posteriormente, iniciou-se o trâmite do Projeto de Lei 1.800/21, que prevê a permissão às empresas tributadas pelo lucro real obterem crédito de COFINS e PIS/PSEP na aquisição de resíduos sólidos como matérias-primas e isenta a venda de resíduos. Junto com ele, tramita o Projeto de Lei 4.035/21, que prevê isenção de COFINS e PIS/PSEP para a cadeia de reciclagem. Além disso, a Lei 14.260/21 estabelece que a União concederá benefícios e incentivos fiscais para projetos que estimulem a cadeia de reciclagem, utilizando parte do Imposto de Renda. No entanto, essa lei ainda não foi regulamentada, o que impede sua plena aplicação (SOLER, 2023).

As cooperativas formalizadas são empresas sem fins lucrativos que atuam no pós-consumo, realizando a coleta, seleção (separação e classificação) e destinação final de REEE (aterro ou envio a recicladoras). Grande parte das cooperativas não atua exclusivamente com REEE, o que impacta nas questões fiscais, tanto para impostos estaduais quanto municipais (GIESE; XAVIER; OTTONI; ARAÚJO, 2022).

Os resíduos aproveitáveis e não perigosos são vendidos para recicladoras ou como sucata, por valores previamente acordados, que podem ser estabelecidos por unidade ou lote

(GIESE; XAVIER; OTTONI; ARAÚJO, 2022). A sucata muitas vezes é misturada aos demais recicláveis e destinada ao aterro sanitário. Alguns itens são mais valorizados pelas cooperativas ou não considerados como sucata, como CPUs de computador, CRTs (telas de tubo de raios catódicos, não considerados como sucata devido aos materiais que podem ser recuperados, como placas de circuito interno, fios de cobre e cabos), monitores de PC, fornos de micro-ondas e máquinas de lavar roupas. Desses itens, são retiradas as placas de circuito impresso, fios de cobre/alumínio e cabos. Estes materiais são comercializados pelas cooperativas aos atravessadores (entre outros mercados secundários informais), por valores mais altos, e depois são encaminhados para indústrias de reciclagem (OLIVEIRA; NETO; SILVA; MACHADO SANTOS, 2020).

Os resíduos que podem ser reaproveitados apresentam, como exemplo, os seguintes valores aproximados: computador desmontado vendido para reciclagem (US\$ 1.93 a US\$ 5.81), pentes de memória (US\$ 3.87 a US\$ 19.37 cada) e CPU (US\$ 11.62 a US\$ 38.74). Como as cooperativas obtêm renda também da comercialização desses resíduos, é necessário elaborar um relatório com informações e imagens dos resíduos descaracterizados e verificar a regularidade do comprador (GIESE; XAVIER; OTTONI; ARAÚJO, 2022).

Os resíduos perigosos devem ser destinados de forma ambientalmente correta, devendo ser realizado por serviço especializado. Tanto para a destinação dos componentes valiosos quanto para a disposição dos rejeitos perigosos, é necessária uma auditoria da empresa prestadora do serviço (GIESE; XAVIER; OTTONI; ARAÚJO, 2022).

As cooperativas são consideradas empresas de serviços ambientais e, portanto, possuem custos relacionados a transporte, mão de obra e destinação final. Os custos relacionados aos impostos incidentes sobre a atividade das cooperativas, que impactam diretamente na sua viabilidade financeira, podem ser observados na Tabela 4 (GIESE; XAVIER; OTTONI; ARAÚJO, 2022).

Tabela 4 - Custos relacionados aos impostos incidentes sobre a atividade das cooperativas

TIPO DE TRIBUTO	FATO GERADOR/INCIDÊNCIA	ALÍQUOTA
Imposto de Renda	Incide sobre parte do faturamento com variação de acordo com a atividade (8% vendas de bens ou 32% prestação de serviços).	15% + 10% sobre a parcela que excede R\$ 20.000,00 por mês.
Contribuição Social Sobre o Lucro Líquido (CSLL ou CSSL)	Incide sobre parte do faturamento com variação de acordo com a atividade (8%, 12% ou 32%).	9%
Imposto Sobre Serviços (ISS)	Incide sobre o valor total do serviço prestado, imposto municipal.	2% ou 5%
Imposto Sobre Produtos Industrializados (IPI)	Não incide.	.
Imposto Sobre Circulação de Mercadoria (ICMS)	Imposto Estadual que incide sobre venda de mercadorias a terceiros (considerados como atos não cooperativos).	Em geral entre 17% e 18% (com variação por cada Estado).
Programa de Integração Social (PIS)	Incide sobre a folha de pagamento	1%
Contribuição para Financiamento da Seguridade Social (COFINS)	Imposto que incide sobre o faturamento mensal (atos não cooperativos). Posicionamento dos Tribunais pela não incidência às Cooperativas.	3%

Fonte: GIESE; XAVIER; OTTONI; ARAÚJO, 2022.

O Decreto 10.936/2022 determina que as atividades das cooperativas serão priorizadas no sistema de coleta seletiva, devendo ser promovida a inclusão destas no sistema de logística reversa (BRASIL, 2022). A legislação brasileira prevê o envolvimento das cooperativas formais no sistema de logística reversa. Entretanto, o sistema informal continua existindo e sendo um ponto a ser considerado na gestão dos resíduos eletroeletrônicos (EUGÊNIA; AUGUSTO; DEMAJOROVIC, 2014).

Outro ator da logística reversa são as oficinas de reparação ou assistências técnicas que, após a verificação de conserto do produto deixado pelo consumidor, destinam os produtos ou materiais que não têm mais reutilização à coleta convencional. Alternativamente, eles podem comercializar esses materiais com catadores autônomos ou sucateiros, e, em alguns casos, destinam-nos para os fabricantes ou distribuidores (BARROS; VARELLA; COUTO; DUARTE, 2015).

Os instrumentos econômicos, quando implantados, também funcionam como mecanismos de controle. No Brasil, esses instrumentos atendem à Constituição Federal, que exige a manutenção de um ambiente ecologicamente equilibrado para toda a sociedade, e cumprem a obrigação do Governo de proteger e respeitar o meio ambiente. Legislações preventivas ou repressivas, incluindo fiscalizações, podem induzir ao desenvolvimento do mercado e a comportamentos desejados, o que também é possível com a implementação de instrumentos econômicos (OLIVEIRA; VALIM, 2018).

A PNRS determina que a União, os Estados e os Municípios podem fornecer incentivos fiscais e financeiros para as indústrias de reciclagem, entidades, empresas de limpeza urbana e projetos que se responsabilizam pelo ciclo de vida dos produtos, priorizando as atuações em conjunto com cooperativas ou associações de catadores. O Art. 42 da Lei nº 12.305/2010 prevê que o poder público pode adotar medidas indutoras e linhas de financiamento para fomentar a gestão sustentável de resíduos. Entre as possibilidades estão: o incentivo ao desenvolvimento de produtos com menor impacto ambiental, o apoio à estruturação de cooperativas de catadores, a implantação de sistemas de coleta seletiva e logística reversa, e o aprimoramento da gestão ambiental nas empresas (BRASIL, 2010).

5.4 ANÁLISE COMPARATIVA DOS SISTEMAS ADOTADOS

Aproximadamente 67 países adotaram o EPR como sistema de gestão dos REEE. Esses países tendem a ter um expressivo número de postos de coleta, demonstrando maior efetividade, com uma coleta de aproximadamente 27%, em comparação aos 10% coletados por países que possuem legislação, mas não aplicam o EPR (BALDÉ; KUEHR; YAMAMOTO; MCDONALD *et al.*, 2024).

No sistema de responsabilidade estendida do produtor (EPR) atribui a responsabilidade ao produtor até a fase pós-consumo do ciclo de vida de um produto, ou seja, são responsáveis pela coleta, triagem e tratamento final, preferencialmente através da reciclagem, tendo como objetivo a redução de resíduos destinados à disposição final, incentivando a produção de produtos de fácil reciclagem. Na tabela 5, podemos verificar os resultados da implementação dos sistemas adotados relativos aos números de resíduos formalmente coletados.

Tabela 5 - Dados de geração e coleta formal na China, Europa e Brasil

PAÍSES	GERAÇÃO REEE (kg/ano)	GERAÇÃO REEE PER CAPITA	COLETA FORMAL
China	12 bilhões	22kg	20%
Europa	13 bilhões	17,6 kg	42,80%
Brasil	2,4 bilhões	11,4 kg	3%

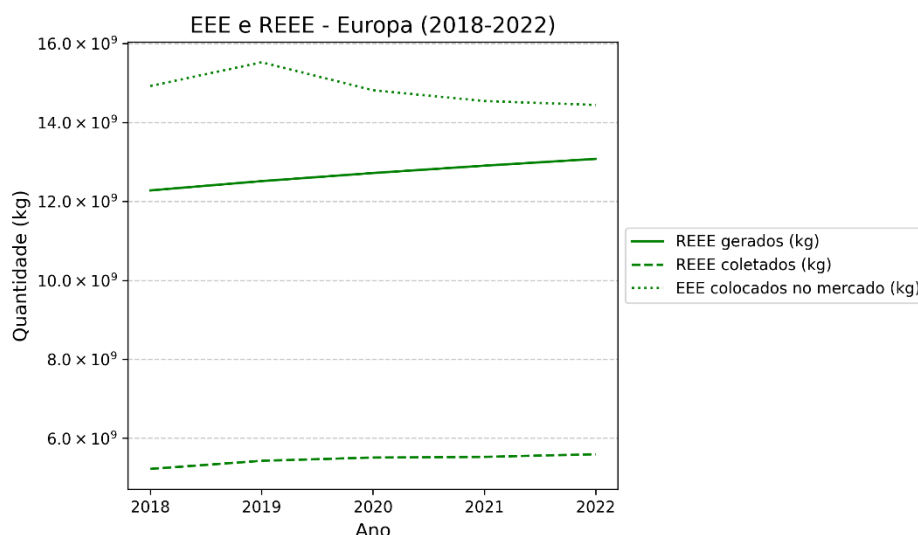
Fonte: BALDÉ; KUEHR; YAMAMOTO; MCDONALD *et al.* (2024).

Os sistemas EPR, na maioria dos casos, cobrem total ou parcialmente os custos operacionais líquidos, que incluem a coleta, tratamento, administração, relatórios e comunicação, descontadas as receitas das vendas de materiais recuperados. No entanto, os custos totais

do tratamento de produtos em fim de vida abrangem diversas atividades adicionais, como campanhas de informação, prevenção de resíduos e monitoramento, que muitos EPRs não cobrem. Os cálculos dos custos líquidos são complexos e podem variar significativamente com as mudanças nos preços dos materiais secundários (OECD, 2001).

Analizadas as características de cada sistema adotado pelas regiões objeto deste estudo, identifica-se que os subsídios, as taxas e os incentivos fiscais são instrumentos que podem impactar os resultados e a eficiência do sistema de logística reversa. Partindo dessa premissa, e considerando que na Europa a meta de coleta estabelecida corresponde a 85% dos REEE gerados, ou 65% considerando os REEE gerados nos últimos 3 anos, verifica-se na Fig. 4 que os níveis relacionados à coleta dos REEE ainda não apresentam uma evolução significativa no contexto geral, mesmo com os maiores percentuais de coleta.

Figura 4 - Gráfico comparando os EEE colocados no mercado, REEE gerados e reciclados na Europa



Fonte: PARTNERSHIP (2024).

A Europa desenvolveu um controle na produção de EEE, o que impacta na geração dos REEE, buscando o desenvolvimento da economia circular e a redução de impactos ambientais (SALHOFER; STEUER; RAMUSCH; BEIGL, 2016). Uma vez estabelecidas metas mais altas de coleta dos REEE, os resultados da reciclagem também se elevam, visando o cumprimento das obrigações estabelecidas pelo EPR aos fabricantes. Essa conduta é reflexo também do estabelecimento do sistema de penalidades, pois existe uma aplicação de penalidades aos fabricantes que não cumprirem as metas estabelecidas (CAI; CHOI, 2019).

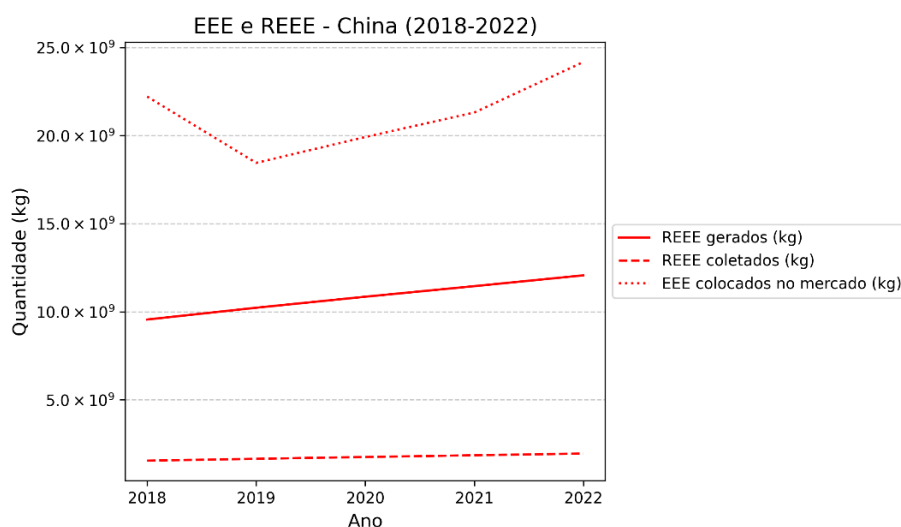
O sistema adotado pela Europa tem demonstrado eficiência, com aumentos nos percentuais de coleta e reciclagem, como exemplificado pela Alemanha e Suíça. No entanto, variações entre os países europeus impactam a eficácia geral do sistema. A complexidade, os custos elevados de implementação e a necessidade de constante fiscalização também geram impactos significativos (SOUSA; AGANTE; CEREJEIRA; PORTELA, 2018).

O sistema de subsídios adotado pela China aumenta a eficácia da reciclagem e o cumprimento das normas ambientais. Também melhora a padronização e aumenta a capacidade das indústrias de reciclagem, incentivando sua formalização e expansão. Recicladores formais veem seus lucros aumentarem devido aos subsídios, assim, como regulamentações mais rígidas reduzem a ocorrência de fraudes (FU; ZHONG; CHEN; LIU, 2020).

Analizando os dados referente a China, verifica-se uma queda na quantidade de eletroeletrônicos gerados entre 2019 e 2021, entretanto, esses números voltaram a crescer em 2022. Na Figura 5, podemos observar que, embora uma política de subsídios seja aplicada na China, ainda há necessidade de melhorias para demonstrar maior efetividade nos resultados.

Recompensar apenas os recicladores pode reduzir os lucros dos fabricantes. Quando a China prioriza apenas os recicladores formais, sem desenvolver políticas de integração dos informais, a eficácia dos subsídios pode ser reduzida. A falha na estrutura da logística reversa, como o processamento e a capacidade de coleta que não são bem distribuídos, pode comprometer sua eficácia (LIU; LEI; DENG; LEONG *et al.*, 2015; TONG; WANG; CHEN; WANG, 2018).

Figura 5 - Gráfico comparando os EE colocados no mercado, REEE gerados e reciclados na China

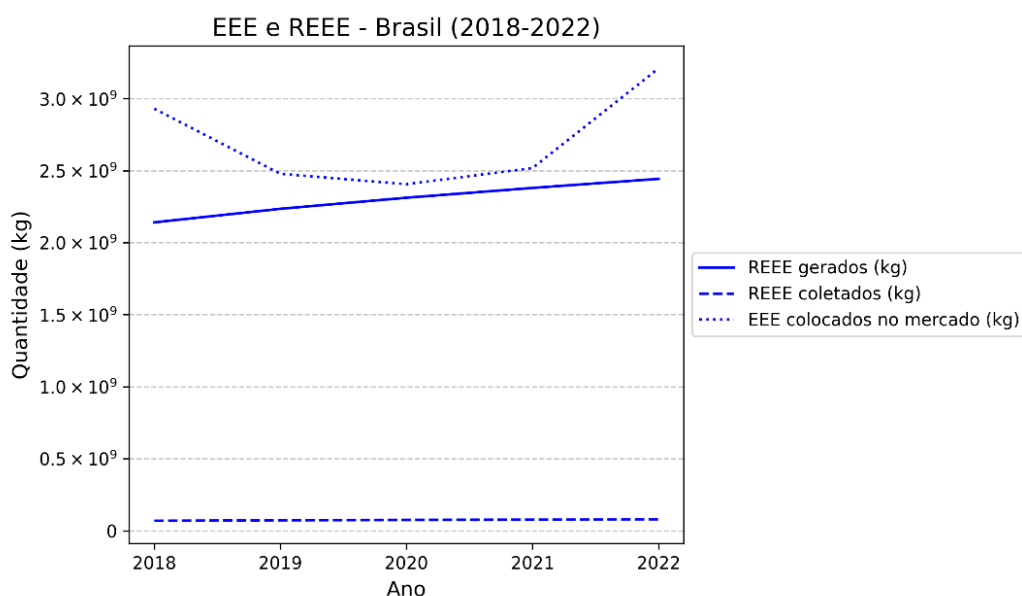


Fonte: PARTNERSHIP (2024).

As providências tomadas pela China demonstram sua preocupação com os impactos ambientais decorrentes das ineficiências na gestão e implementação da logística reversa dos REEE. O estabelecimento de legislações, a atribuição de responsabilidade ao fabricante pelo seu produto até o final do ciclo de vida e o fornecimento de subsídios para fomentar a reciclagem evidenciam uma movimentação em busca de uma melhoria na quantidade de reciclagem (FU; ZHONG; CHEN; LIU, 2020). Entretanto, os levantamentos constantes da Tabela 5, corroborados pelos números apresentados na Fig. 5, mostram que ainda há um longo caminho a ser percorrido para uma evidente melhoria nos números relacionados à coleta e ao tratamento de REEE oficialmente declarados.

O Brasil também está se movimentando em busca de maior efetividade na coleta e tratamento oficial dos REEE. Várias legislações foram promulgadas visando melhorias na gestão e implementação da logística reversa, estabelecendo metas para serem cumpridas pelos responsáveis, projetadas para uma coleta e tratamento de pelo menos 17% dos REEE até 2025 (BRASIL, 2020). Embora seja uma meta modesta, conforme mostrado na Fig. 6, representará um avanço significativo diante do cenário atual.

Figura 6 - Gráfico comparando os EE colocados no mercado, REEE gerados e reciclados no Brasil



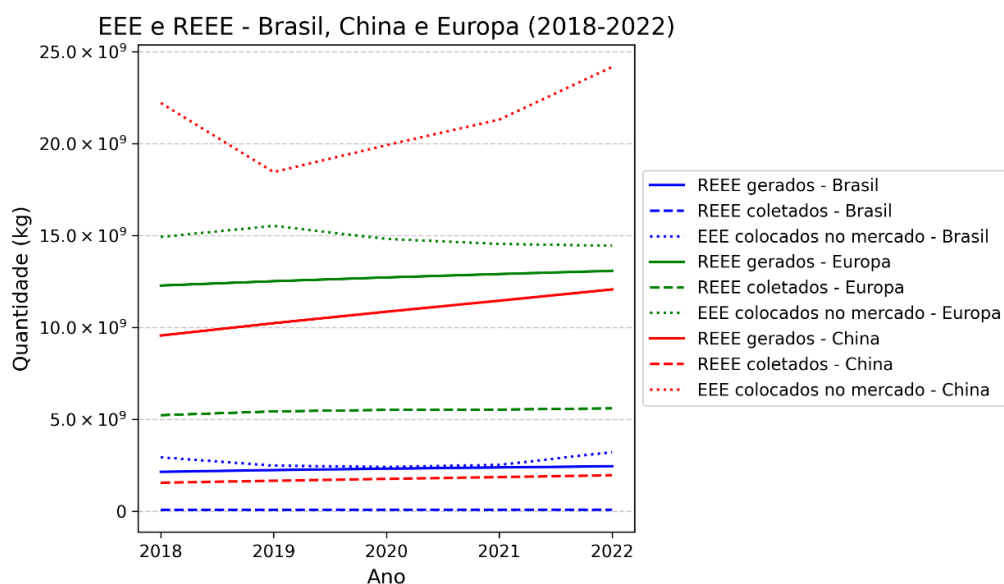
Fonte: PARTNERSHIP (2024).

A PNRS Lei nº 12.305/2010, é uma legislação importante para a gestão e implementação da logística reversa dos REEE no Brasil. No entanto, o desenvolvimento e implemen-

tação da responsabilidade compartilhada tem sido lenta e gradual, carecendo de uma cooperação eficaz entre o Estado, o mercado e a sociedade. Ajustes são necessários em toda a cadeia reversa de REEE. No caso específico do Brasil, a promulgação do Decreto 10.240/20, pode não ser suficiente para garantir a efetividade na implementação da logística reversa. É necessário implementar incentivos financeiros para melhorar a eficácia do sistema, conforme observado nas demais áreas geográficas estudadas (SANT'ANNA, 2015). Ajustar subsídios aos custos operacionais e à quantidade de resíduos reciclados é uma medida para equilibrar e incentivar a indústria de reciclagem e o desenvolvimento de novas tecnologias (SHIH, 2017).

De modo geral, considerando as três regiões geográficas (Figura 7), um ponto comum é que todas possuem legislações e sistemas implementados. No entanto, não apresentam um progresso significativo na coleta e tratamento dos REEE anualmente, quando comparados com a geração de EEE. Outro ponto que não pode ser desconsiderado é a atuação do sistema informal, que impacta na discrepância entre os REEE gerados e os oficialmente coletados. Isso reflete uma preocupação comum, pois traduz-se em um impacto direto nos números oficiais de REEE coletados e tratados.

Figura 7 - Gráfico comparando os EE colocados no mercado, REEE gerados e reciclados nas três regiões



Fonte: PARTNERSHIP (2024).

Outro desafio consiste na implementação dos requisitos atuais de tratamento dos REEE e no combate a atividades criminosas relacionadas à gestão desse tipo de resíduo. É essencial aumentar ainda mais a coleta, reciclagem e reutilização dos REEE (AUDITORS,

2021). Na Tabela 6 apresenta-se um quadro comparativo entre as áreas geográficas de estudo, analisando as vantagens e desvantagens nas escolhas relacionadas a gestão de REEE.

Tabela 6 - Quadro comparativo entre os sistemas adotados na China, Europa e Brasil

	China	Europa	Brasil
Sistemas de gestão de REEE	EPR (Responsabilidade Estendida do Produtor)	EPR (Responsabilidade Estendida do Produtor)	Responsabilidade compartilhada (consumidores, fabricantes, importadores, distribuidores e comerciantes de produtos eletrônicos)
Participação do Governo	Intervencionista	Regulador	Regulador
Subsídio	sim	não	não
Desafios relacionados a sustentabilidade financeira dos sistemas adotados	1) Regulamentações com mais abrangência sobre todo o ciclo de vida dos EE, melhorando a fiscalização. 2) Incentivos mais expressivos, apoio político, pois os recicladores dependem destes recursos para manter a competitividade e sustentabilidade. 3) Setor informal, que por terem menos custos, competem de forma desleal com o sistema formal. 4) Crescimento na geração de REEE. 5) Incentivo destinado a reciclagem, mas não a remanufatura. 6) Elevados custos de transporte e logística.	1) Dificuldade de monitoramento se os REEE enviados para fora do País cumprem a legislação. 2) Custos operacionais elevados e necessidade de processo logístico robusto. Necessitando de uma minimização para todos os participantes do sistema EPR. 3) Processamento inadequado, gestão dos componentes e integridade dos REEE, especialmente em relação aos informais. 4) Rastreio e reais custos com o tratamento de REEE. Demonstrando a transparência e eficiência do sistema. 5) Registros e coleta de dados, verificando o cumprimento da meta de coleta em 85% dos REEE. 6) Proibição de certificação de pequenas empresas.	1) Desafios em suas legislações fragmentadas. 2) Sustentabilidade financeira do sistema formal, com recursos financeiros para todas as fases da logística reversa, incluindo educação ambiental e comunicação. 3) Maior abordagem do modelo adotado de responsabilidade compartilhada, como a coordenação dos atores, a integração dos sistemas formal, informal e cooperativas. 4) Falta de infraestrutura para coleta e tratamento, custos de transportes, avanços tecnológicos. 5) Questões de saúde e de impacto ambiental relacionadas às atividades dos informais e cooperativas.
Vantagens dos sistemas adotados	1) Proatividade e abordagem estruturada na gestão dos REEE com base na Diretiva da Europa, com o intervencionismo do Governo subsidiando empresas formais de reciclagem. 2) Políticas de subsídios aumentam a capacidade de gestão do REEE e o torna mais eficaz.	1) Implementação do EPR com demonstração de melhores percentuais de coleta, tratamento e reciclagem. 2) Metas expressivas e desafiadoras. 3) Taxas de reciclagem que financiam todo o sistema de gestão dos REEE. 4) Sistemas de devolução, como conveniência, recompensa e caridade que	1) Pressões internacionais impactam na estrutura jurídica interna. 2) Responsabilidade compartilhada, integrando todos os atores na gestão dos resíduos. 3) Previsão na legislação para implementação de incentivos fiscais e linhas de crédito.

	China	Europa	Brasil
	3) Aumento da reciclagem dos REEE, pois os subsídios aumentam os lucros. 4) Redução dos informais à medida que estabelecem a competitividade entre os formais, gerando uma melhoria no impacto ambiental. 5) Benefícios econômicos para os consumidores com preços mais baixos e melhor qualidade de produtos. 6) Empresas formais utilizam tecnologias de ponta.	incentivam o consumidor na devolução dos REEE, aumentando a quantidade de retorno. 5) O estabelecimento de normas com requisitos técnicos e administrativos, garantindo um tratamento eficiente e seguro.	4) O incentivo na integração das cooperativas no sistema de logística reversa. 5) Certificado de Crédito de Reciclagem de Logística Reversa (CCRLR) e Certificado de Estruturação e Reciclagem de Embalagens em Geral.
Desvantagens dos sistemas adotados	1) Aumento na geração de REEE, importações e grande volume de comercialização de EEE e a dificuldade na fiscalização dos REEE. 2) As taxas cobradas dos fabricantes podem reduzir os custos. 3) O fornecimento de subsídios impacta na sustentabilidade dos recicladores, pois podem ficar dependentes destes recursos. 4) Taxas elevadas prejudicam os fabricantes. 5) A sustentabilidade da política de fundos pode ser comprometida quando os subsídios são maiores que as taxas. 6) Falta de subsídios destinados a remanufatura.	1) Dificuldade de implementação e regulamentação geral, uma vez que cada País adota políticas próprias. 2) Altos custos operacionais. 3) Interferência do sistema informal (pontos positivos e negativos). 4) Uma complexa coordenação entre os diversos atores (PROs, TPOs, consumidores e governo).	1) Legislação fragmentada, levando a uma dificuldade de implementação da logística reversa em todo o País. 2) Não existem muitos recicladores no País que estejam adequados à legislação e certificação. 3) Procedimentos administrativos complexos e custos operacionais altos. 4) A certificação facultativa que pode levar ao descumprimento das metas e dificuldade de rastreamento dos REEE. 5) A falta de maior implementação de incentivos fiscais, embora permitidos por lei. 6) Falta de participação dos Consumidores, diante da vedação de pagamento pela entrega de REEE.

Fonte: Elaborado pelos Autores baseado nos artigos de BALDÉ; KUEHR; YAMAMOTO; MCDONALD *et al.* (2024); DEMAJOROVIC; AUGUSTO; SOUZA (2016); DIESTE; VIAGI; PANIZZOLO; DOS SANTOS *et al.* (2018); MIGLIANO; DEMAJOROVIC; XAVIER (2014); LI; DONG; LIU; SONG (2016); LIU; LEI; DENG; LEONG *et al.* (2015); LIU; TANG; LI; WANG (2017); LIU; LI; LEONG (2022); MAYERS; BUTLER (2013); SONG; LU; WU (2019); SOUSA; AGANTE; CEREJEIRA; PORTELA (2018); STEUER (2017); TESAR; KARIGL; LAMPERT; NEUBAUER *et al.* (2021); VEENSTRA; WANG; FAN; RU (2010); WANG; HUO (2023), LIU; XU; TIAN; WANG *et al.* (2019).

A Tabela 6 confirma que qualquer sistema a ser implementado na gestão dos REEE encontra desafios. A avaliação dos sistemas EPR é dificultada pela escassez de dados e dificuldades metodológicas. Para que a implementação do EPR seja eficaz, deve ser bem planejada e

contar com a aplicação correta de incentivos, buscando a colaboração das partes interessadas e a aplicação de inovações tecnológicas (CAI; CHOI, 2019).

Algumas sugestões para resolver os problemas enfrentados são: envolver os comerciantes de sucata, catadores e recicladores informais na cadeia de valor dos REEE; criar programas de formalização e capacitação dos informais; estabelecer um sistema de verificação de relatórios para garantir a qualidade dos dados; harmonizar práticas e entendimentos entre os Estados-Membros sobre o que acompanhar, rastrear e relatar; e garantir condições de competição justas para o tratamento de REEE (COMMISSION; ENVIRONMENT; EUROPE, 2017).

A eficácia dos sistemas implementados e da logística reversa é afetada pelo mercado informal, o que demonstra a complexidade no monitoramento dos dados referentes à coleta e ao proveito econômico (BARROS; VARELLA; COUTO; DUARTE, 2015). A promoção de estratégias com a finalidade de integrar efetivamente os consumidores no sistema de logística reversa deve ser ampliada, pois isso conduz a uma gestão mais sustentável (DEMAJOROVIC; AUGUSTO; SOUZA, 2016).

As regiões estudadas desenvolveram estruturas diversificadas buscando a eficiência da gestão de REEE e da logística reversa. Observa-se que todas enfrentam desafios consideráveis e que, apesar de metas ambiciosas, como no caso da Europa, ainda há um longo caminho a ser percorrido para demonstrar uma efetiva eficiência nos dados de coleta dos REEE.

A participação intervencionista do governo chinês, implementando legislações que atuam em todo o ciclo de vida do produto, tende a promover uma melhor fiscalização, mas ainda há necessidade de atenção quanto à ocorrência de fraudes. O fornecimento de subsídios, especialmente na China, é uma forma eficaz de incentivo, pois fortalece o setor formal causando impactos ambientais consideráveis. No entanto, a falta de subsídios para a remanufatura, a dependência dos subsídios e o alto custo de transporte são desafios que comprometem o sistema a longo prazo.

A Europa, por sua vez, mesmo implementando o sistema EPR, optou por uma atuação mais reguladora, com normas rígidas e metas expressivas de reciclagem, além da imposição de taxas e penalidades. Os sistemas adotados de devolução consistem em boas práticas que incentivam o envolvimento e a participação dos consumidores no sistema, auxiliando na sua eficiência. Entretanto, os altos custos, a coordenação entre todos os atores do sistema e a dificuldade no controle e regulamentação dos fluxos de REEE, especialmente as exportações, impactam negativamente a gestão dos REEE.

Ao ser promulgada a legislação que determina a implantação e operacionalização da logística reversa no Brasil, optou-se pela responsabilidade compartilhada. Essa prática, num primeiro momento, mostra-se mais inclusiva, porém todos os atores precisam compreender e ter bem definidas suas responsabilidades dentro do sistema, caso contrário não se alcançará a eficiência desejada.

Os parágrafos do artigo 33 descrevem deveres inerentes aos consumidores, que devem devolver os produtos e embalagens após o uso aos comerciantes e distribuidores, e por sua vez, estes últimos devem devolver aos fabricantes ou importadores. No entanto, as regras ali dispostas, não tem caráter impositivo, pois não regulamenta a execução destas obrigações e também não impõe qualquer penalidade pela falta de cumprimento, e muito menos aplica incentivos ao seu cumprimento (BRASIL, 2010).

A integração das cooperativas praticada efetivamente favorece a economia circular e a responsabilidade social. A previsão legal para implementação de incentivos fiscais, financeiros e de linhas de crédito impacta positivamente a gestão dos REEE, mas é necessário um empenho na efetiva regulamentação e implementação por parte do governo.

5.5 CONCLUSÕES

Esta revisão comparou os sistemas de gestão de REEE na China, Europa e Brasil, analisando vantagens e desvantagens e destacando a importância de incentivos financeiros, subsídios e regulamentações fiscais na eficácia do sistema de logística reversa. A infraestrutura e o contexto econômico e social de cada região impactam o desenvolvimento e a eficiência da logística reversa.

Os sistemas da China e Europa possuem regulamentações mais rigorosas e robustas, com variações na implementação do sistema EPR. No Brasil, adotou-se a responsabilidade compartilhada para a logística reversa, enfrentando desafios na regulamentação e implementação de políticas adequadas.

Os subsídios na China, financiados pelas taxas de descarte pagas pelos fabricantes, fortalecem o sistema formal, promovendo competitividade frente aos informais que não possuem os mesmos custos e preocupações ambientais. A sustentabilidade financeira deste sistema é uma preocupação a longo prazo, devido à dependência dos subsídios pelos recicladores.

A transferência das obrigações do fabricante para os PROs e empresas subcontratadas na Europa impacta os custos da gestão de REEE e logística reversa. Metas de reciclagem

elevadas, taxas, penalidades e a falta de padronização das legislações, como ocorre na Europa, mostram que isoladamente não são suficientes para a eficiência da logística reversa.

No Brasil, embora haja previsão legal para incentivos fiscais e financeiros, ainda é necessária a regulamentação e efetividade na concessão desses benefícios. A lei brasileira prevê a inclusão de cooperativas e associações de catadores na logística reversa, responsabilidade das entidades gestoras. Legislações fragmentadas, como na Europa, onde há desafios com a falta de padronização dos procedimentos, refletem ineficiência no sistema de logística reversa. O desenvolvimento e implementação da responsabilidade compartilhada têm sido lentos, carecendo de cooperação eficaz entre o Estado, o mercado e a sociedade.

A presença dos informais é uma preocupação comum em todas as regiões. Integrar o setor informal ao formal pode maximizar os benefícios e minimizar os impactos negativos, promovendo uma gestão mais eficiente e sustentável dos REEE.

Subsídios, incentivos fiscais e financeiros, taxas e outros instrumentos promovem comportamentos desejados na logística reversa, alinhando interesses econômicos com a proteção ambiental. A troca de melhores práticas entre regiões e a adaptação contínua das políticas são importantes para melhorar a gestão global de REEE.

As limitações deste estudo incluem a implementação diversificada de EPR nos países, sendo obrigatória em alguns e facultativa em outros, além da existência de legislações específicas em cada país da Europa. Outra limitação é a dificuldade de encontrar dados precisos sobre custos, instrumentos e subsídios relacionados à gestão de REEE em todas as áreas estudadas, além da escassez de estudos no Brasil.

6. SEGUNDO ARTIGO

Análise do impacto de incentivos fiscais na logística reversa de Resíduos de Equipamentos Eletroeletrônicos (REEE) no Brasil: uma simulação da dinâmica de sistemas.

Keity Symonne dos Santos Silva Abreu¹, Ricardo Gabbay de Souza².

¹ *Universidade Estadual Paulista – UNESP, Av. Eng. Luís Edmundo Carrijo Coube, 14-01 - Núcleo Res. Pres. Geisel, Bauru, SP, 17033-360, Brasil.*

² *Department of Environmental and Resource Engineering, Technical University of Denmark, Kongens Lyngby 2800, Denmark.*

* Autor correspondente.

E-mail: keity.abreu@unesp.br +55 14 981111061

Endereço: Rua Triagem, 8-33, Santa Luzia, Bauru, SP 17025-290, Brasil.

Endereço de e-mail:

¹ Keity Symonne dos Santos Silva Abreu - keity.abreu@unesp.br

² Ricardo Gabbay de Souza – ricardo.souza@unesp.br

Resumo

A crescente geração de resíduos eletroeletrônicos, aliada a significativa atuação do sistema informal e à ausência de infraestrutura adequada, evidencia a necessidade de políticas públicas mais eficazes que impulsionem a coleta e reciclagem formal. Este estudo analisa os impactos da aplicação de incentivos fiscais na logística reversa de resíduos de equipamentos eletroeletrônicos (REEE) no Brasil, utilizando a metodologia de dinâmica de sistemas. Foram simulados dois cenários, com e sem incentivos fiscais aplicados no custo da coleta, por meio do software Vensim PLE, considerando dados nacionais. Os resultados indicam que os incentivos fiscais, quando aplicados de forma progressiva e em conjunto com as metas estabelecidas na legislação, possibilitariam o aumento de até 18,66% na coleta formal, 20,59% na reciclagem formal. Contudo, quando isolados, os incentivos fiscais apresentam impacto limitado, considerando uma redução de -2,38 na reciclagem informal e -3,45% na disposição de resíduos sem controle, não sendo suficientes para reverter a predominância da informalidade e os impactos ambientais. A ampliação dos efeitos dos incentivos fiscais depende de sua implementação conjunta com incentivos a fabricantes, estímulos aos consumidores para a destinação correta, apoio a operadores logísticos e recicladores, demonstrando ser uma alternativa mais eficaz do que políticas isoladas.

Abstract

The increasing generation of waste electrical and electronic equipment (WEEE), combined with the significant role of the informal sector and the lack of adequate infrastructure, highlights the need for more effective public policies to promote formal collection and recycling. This study analyzes the impacts of applying fiscal incentives in the reverse logistics of WEEE in Brazil, using the system dynamics methodology. Two scenarios were simulated—with and without fiscal incentives applied to collection costs—using national data and the Vensim PLE software. The results indicate that fiscal incentives, when applied progressively and in conjunction with the targets established by legislation, could enable an increase of up to 18.66% in formal collection and 20.59% in formal recycling. However, when implemented in isolation, fiscal incentives have a limited impact, with a reduction of only -2.38% in informal recycling and -3.45% in uncontrolled disposal, proving insufficient to reverse the dominance of informality and associated environmental impacts. The expansion of the effects of fiscal incentives depends on their integration with complementary measures, including incentives for manufacturers, encouragement for consumers to dispose of waste correctly, and support for logistics operators and recyclers. This integrated approach proves to be more effective than isolated policies.

6.1 INTRODUÇÃO

Os REEE consistem em um dos resíduos mais desafiadores, diante de seu exponencial crescimento de produção e consumo, os avanços tecnológicos e rápida obsolescência, e o descarte inadequado são ameaças ao meio ambiente e a saúde humana, devido a presença de substâncias tóxicas nestes resíduos, como cádmio, chumbo, mercúrio (GHISOLFI; DINIZ CHAVES; RIBEIRO SIMAN; XAVIER, 2017).

Em 2022, estima-se que o mundo gerou 62 bilhões de kg de REEE, o equivalente a 7,8 kg *per capita* por ano, com apenas 22,3% sendo oficialmente coletados e reciclados, com projeção de crescimento de 82 bilhões de kg de REEE em 2030 (BALDÉ; KUEHR; YAMAMOTO; MCDONALD *et al.*, 2024). O custo global para a gestão dos REEE formalmente coletados é estimado em 37 bilhões de dólares. Mesmo com políticas, legislações ou regulamentações em 81 países, são necessários mais esforços na gestão dos REEE para melhorar as infraestruturas de coleta e reciclagem (BALDÉ; KUEHR; YAMAMOTO; MCDONALD *et al.*, 2024).

Na Europa, a Diretiva Europeia sobre Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos (WEEE Directive) impõe metas de coleta e reciclagem, com a responsabilidade aos fabricantes e distribuidores do retorno e destinação correta dos resíduos. Nos Estados Unidos foi adotada uma política descentralizada, variando conforme a legislação de cada Estado. Os países asiáticos, como a China, Japão e Coreia do Sul, combinam incentivos, restrições ao descarte inadequado e sistemas avançados de reciclagem (PUTRI; KUSUMASTUTI, 2021; ZHENG; HUANG; WU, 2022).

No Brasil, a gestão de REEE é regida pela Política Nacional de Resíduos sólidos (Lei 12.305/2010) e o Decreto 10.240/20 que definem a implementação da logística reversa, entretanto, apesar dos avanços normativos, os desafios persistem, como a deficiência da infraestrutura e baixa adesão ao sistema formal, demonstrando que são necessárias mais políticas e incentivos fiscais que ampliem a coleta e reciclagem formal (BESIOU; GEORGIADIS; VAN WASSENHOVE, 2012; GUZZO; RODRIGUES; PIGOSSO; MASCARENHAS, 2022; RODRÍGUEZ; ESCALANTE, 2020). Devido a informalidade na reciclagem de REEE e a falta de infraestrutura são gerados impactos ambientais, sociais, econômicos significativos (GHISOLFI; DINIZ CHAVES; RIBEIRO SIMAN; XAVIER, 2017; BESIOU; GEORGIADIS; VAN WASSENHOVE, 2012). A implementação de incentivos fiscais na logística reversa po-

dem trazer um grande impulso na coleta e reciclagem, aliado a reduções de impactos ambientais, com aumento do reaproveitamento de materiais, promoção de inclusão social e fortalecimento da economia circular (GHISOLFI; DINIZ CHAVES; RIBEIRO SIMAN; XAVIER, 2017; WANG; CHANG; CHEN; ZHONG *et al.*, 2014).

Incentivos fiscais são mecanismos financeiros utilizados por governos para estimular comportamentos social e ambientalmente desejáveis, reduzindo os custos de adoção de práticas sustentáveis. No contexto da logística reversa, esses incentivos podem assumir a forma de subsídios, isenções tributárias, créditos fiscais ou apoio direto a cooperativas, recicladores e fabricantes (CHU; ZHONG; JIA, 2023; WANG; CHANG; CHEN; ZHONG *et al.*, 2014). Estudos indicam que, quando bem estruturados, tais instrumentos podem aumentar significativamente a eficiência da logística reversa e promover a inclusão social por meio da valorização do trabalho de catadores e cooperativas (GHISOLFI; DINIZ CHAVES; RIBEIRO SIMAN; XAVIER, 2017; RODRÍGUEZ; ESCALANTE, 2020).

Entretanto, a literatura também aponta que a ausência ou inadequação desses mecanismos compromete a eficácia dos sistemas, podendo inclusive reforçar práticas informais e ineficientes (GUZZO; RODRIGUES; PIGOSSO; MASCARENHAS, 2022; WANG; CHANG; CHEN; ZHONG *et al.*, 2014). Para analisar os impactos dessas políticas em sistemas complexos como o da gestão de REEE, a modelagem de sistemas dinâmicos tem se mostrado uma ferramenta eficaz na simulação de cenários e avaliação da performance de políticas públicas (ARDI; LEISTEN, 2016; GHISOLFI; DINIZ CHAVES; RIBEIRO SIMAN; XAVIER, 2017). Modelos desenvolvidos demonstram que a implementação de incentivos fiscais, como isenções tributárias para recicladores, subsídios para pesquisa e desenvolvimento e créditos para cooperativas, podem potencializar um aumento significativo da eficiência de logística reversa (BESIOU; GEORGIADIS; VAN WASSENHOVE, 2012).

Apesar dos avanços normativos e do volume crescente de estudos internacionais, ainda se observa uma lacuna na literatura quanto à análise dos impactos dos incentivos fiscais sobre a coleta formal de resíduos eletroeletrônicos (REEE) no Brasil, especialmente sob a perspectiva de simulações sistêmicas.

Pesquisas anteriores aplicaram a metodologia de dinâmica de sistemas à gestão de REEE no país, modelando o Acordo Setorial Brasileiro para Equipamentos Eletroeletrônicos (BIAEEE) com o objetivo de simular diferentes cenários de políticas públicas, como ampliação da cobertura, melhoria da conveniência e introdução de incentivos, avaliando seus efeitos sobre a taxa de coleta formal, com foco nos resíduos de smartphones. Contudo, em função da escassez

de dados econômicos detalhados, esses estudos optaram por representar os incentivos de forma funcional, sem incorporar explicitamente a estrutura de custos unitários ou os mecanismos de repasse fiscal (GUZZO; RODRIGUES; PIGOSSO; MASCARENHAS, 2022).

Noutro estudo, a dinâmica de sistemas foi utilizada para avaliar os efeitos da formalização de catadores e agentes informais no sistema de gestão de REEE, analisando os impactos sociais e operacionais da inclusão desses atores. Contudo, o modelo adotou simplificações sobre o comportamento do setor informal e não contemplou variações regionais (GHISOLFI; DINIZ CHAVES; RIBEIRO SIMAN; XAVIER, 2017).

O presente estudo tem como objetivo identificar e comparar cenários de implementação de incentivos fiscais na logística reversa de resíduos REEE no Brasil, para estimar os impactos na eficiência da coleta e reciclagem formal decorrentes dessa política no contexto brasileiro e avaliar a viabilidade e aplicabilidade de novas práticas, com base nos cenários simulados, voltadas ao fortalecimento da logística reversa no país.

6.2 REVISÃO DE LITERATURA

6.2.1 Logística Reversa

A logística reversa tem como objetivo a recuperação de resíduos pós-consumo decorrente da cadeia de abastecimento direta, envolvendo ações e estratégias que visam a coleta, triagem, reaproveitamento e destinação adequada destes materiais, promovendo a economia circular e a minimização de impactos ambientais, podendo gerar benefícios econômicos, ambientais e sociais (GHISOLFI; DINIZ CHAVES; RIBEIRO SIMAN; XAVIER, 2017; WANG; CHANG; CHEN; ZHONG *et al.*, 2014; ZHENG; HUANG; WU, 2022).

No aspecto econômico, a logística reversa pode recuperar materiais valiosos, reduzindo a dependência de recursos naturais, impulsionando a reciclagem. Contribuindo para a redução de emissões de gases de efeito estufa e a mitigação da poluição, representando menos impacto ambiental (RODRÍGUEZ; ESCALANTE, 2020). No aspecto social proporciona a integração de trabalhadores informais em cadeias formais de reciclagem promovendo inclusão social e melhoria das condições de trabalho (ARDI; LEISTEN, 2016; RODRÍGUEZ; ESCALANTE, 2020).

6.2.2 Logística Reversa de REEE no Brasil

A Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), instituída pela Lei nº 12.305/2010 e regulamentada pelo Decreto nº 10.936/2022, estabelece a logística reversa como instrumento fundamental para a gestão sustentável de resíduos no Brasil. Em seu artigo 33, define a responsabilidade compartilhada entre consumidores, fabricantes, importadores, distribuidores e comerciantes de produtos eletrônicos, atribuindo a esses atores a obrigação de estruturar e implementar o Sistema de Logística Reversa (BRASIL, 2010). O Decreto nº 10.240/2020, por sua vez, regulamenta especificamente a logística reversa de REEE, disciplinando o funcionamento do sistema, desde a coleta até a destinação final adequada (BRASIL, 2020).

Conforme essas normas, os resíduos descartados em pontos de recebimento são encaminhados a pontos de consolidação, onde devem permanecer até sua destinação ambientalmente adequada. A legislação proíbe expressamente a comercialização, doação ou qualquer tipo de transferência desses materiais a agentes que não integrem o sistema formal de logística reversa (BRASIL, 2020).

Para atender às exigências legais, foram constituídas duas entidades gestoras: a ABREE e a Green Eletron. Essas organizações, compostas por fabricantes, importadores ou suas associações, têm a finalidade de estruturar, implementar e operacionalizar a logística reversa no Brasil (ALÓS; MILAN; EBERLE, 2023). A legislação prevê que a operacionalização do sistema pode ocorrer de forma coletiva, por meio de entidades gestoras sem fins lucrativos, ou individual, desde que os responsáveis comprovem aos órgãos ambientais que não haverá participação de entidade gestora, garantindo a rastreabilidade e conformidade com as exigências legais (BRASIL, 2020).

Mais recentemente, a Lei nº 14.260/2021, regulamentada pelo Decreto nº 12.106/2024, instituiu o Programa de Incentivo à Reciclagem (ProRecicle), criando Fundos de Investimentos para Projetos de Reciclagem. Por meio dessa normativa, pessoas jurídicas tributadas com base no lucro real e pessoas físicas podem deduzir parte do imposto de renda em apoio a projetos aprovados pelo Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima, conforme os critérios estabelecidos na Portaria GM/MMA nº 1.250/2024 (BRASIL, 2021; 2024).

Apesar dessas iniciativas, a efetivação da logística reversa no Brasil enfrenta desafios estruturais. A responsabilidade pela destinação ambientalmente adequada dos REEE impõe obstáculos significativos aos fabricantes e importadores, especialmente diante da ausência de infraestrutura adequada e da baixa adesão ao sistema formal (GHISOLFI; DINIZ CHAVES;

RIBEIRO SIMAN; XAVIER, 2017; GUZZO; RODRIGUES; PIGOSSO; MASCARENHAS, 2022). A governança da PNRS ainda carece de mecanismos econômicos robustos capazes de atrair a participação ativa dos agentes envolvidos (DEMAJOROVIC; AUGUSTO; SOUZA, 2016).

Além disso, o gerenciamento de REEE apresenta complexidades adicionais, como a diversidade de materiais, a dispersão geográfica dos resíduos e a coexistência de sistemas formais e informais de reciclagem. Estudos apontam que o setor informal, composto por catadores, pequenos comerciantes e recicladores informais, desempenha papel relevante na coleta e triagem, mas frequentemente opera com baixa eficiência e de forma ambientalmente inadequada (ARDI; LEISTEN, 2016; CHU; ZHONG; JIA, 2023). A ausência de incentivos econômicos consistentes e de regulamentações claras agrava a situação, limitando o engajamento tanto de empresas quanto de consumidores (ELIA; GNONI; TORNESE, 2018; GEORGIADIS; VLACHOS, 2004).

Nesse cenário, a adoção do princípio da responsabilidade estendida do produtor (EPR) tem se mostrado uma abordagem eficaz em diversos países. Ao responsabilizar os fabricantes por todo o ciclo de vida dos produtos, o sistema EPR estimula o design sustentável, a reutilização e a reciclagem. Instrumentos complementares, como subsídios públicos e incentivos fiscais, podem ainda incentivar a formalização de agentes informais e elevar os índices de reaproveitamento de materiais (GHISOLFI; DINIZ CHAVES; RIBEIRO SIMAN; XAVIER, 2017; WANG; CHANG; CHEN; ZHONG *et al.*, 2014).

No Brasil, a aplicação da metodologia de dinâmica de sistemas tem se mostrado útil para compreender as interações entre variáveis como percentual de coleta, capacidade instalada, incentivos econômicos e participação do setor informal (GHISOLFI; DINIZ CHAVES; RIBEIRO SIMAN; XAVIER, 2017; GUZZO; RODRIGUES; PIGOSSO; MASCARENHAS, 2022). Essa abordagem permite a simulação de políticas públicas e a avaliação de seus efeitos ao longo do tempo, mesmo em contextos marcados por incertezas e escassez de dados precisos (ELIA; GNONI; TORNESE, 2018; WANG; CHANG; CHEN; ZHONG *et al.*, 2014).

6.2.3 Dinâmica de Sistemas (DS) na gestão de REEE

A Dinâmica de Sistemas (DS) é uma abordagem teórica e metodológica utilizada para modelar, simular e compreender sistemas complexos que envolvem interações dinâmicas entre diversos componentes (ARDI; LEISTEN, 2016; CHU; ZHONG; JIA, 2023). Dinâmica

de sistemas oferece ferramentas para estudar a estrutura, o comportamento e as interações de sistemas ao longo do tempo, incluindo estoques, fluxos e loops de feedback, loops de retroalimentação (GEORGIADIS; VLACHOS, 2004; PUTRI; KUSUMASTUTI, 2021).

Os modelos desenvolvidos com a dinâmica de sistemas possibilitam o estudo de cenários futuros e auxiliam a entender a influência de diferentes variáveis na gestão dos REEE. Os estudos analisados exploraram diferentes problemas e propõem soluções baseadas em simulação dinâmica para otimizar processos de reciclagem, remanufatura e gestão de REEE (GEORGIADIS; BESIOU, 2009; GHISOLFI *et al.*, 2017a; WANG; CHANG; CHEN; ZHONG *et al.*, 2014). A sustentabilidade das cadeias de suprimento de ciclo fechado, investigando sua viabilidade ambiental e econômica (GEORGIADIS; BESIOU, 2009); o impacto das políticas de subsídios na remanufatura de peças automotivas na China, concluindo que subsídios combinados são mais eficazes do que subsídios individuais (WANG; CHANG; CHEN; ZHONG *et al.*, 2014); a formalização de catadores no sistema de logística reversa de computadores e laptops, com foco na regulamentação e na concorrência das empresas (GHISOLFI; DINIZ CHAVES; RIBEIRO SIMAN; XAVIER, 2017), consistem nos problemas analisados nestes estudos.

Na análise sobre a competição entre os setores formais e informais na Indonésia demonstraram que, políticas de conscientização e fundos de processamento podem melhorar a reciclagem formal (PUTRI; KUSUMASTUTI, 2021). Ao analisar estratégias de risco na cadeia de suprimentos fechada de REEE, verifica-se que a combinação de subsídios e incentivos ambientais podem resultar em redução de riscos associados ao setor (ZHENG; HUANG; WU, 2022). Políticas de impostos ambientais e subsídios incentivam a integralização de catadores autônomos ao sistema formal (CHU; ZHONG; JIA, 2023).

Os resultados indicaram que subsídios combinados impactariam significativamente na promoção da remanufatura e coleta de materiais (WANG; CHANG; CHEN; ZHONG *et al.*, 2014). A formalização de catadores no Brasil consiste num longo processo e depende de incentivos políticos e apoio logístico para que possa garantir uma competitividade com o setor privado (GHISOLFI; DINIZ CHAVES; RIBEIRO SIMAN; XAVIER, 2017). Regulamentações que incentivam a reciclagem podem reduzir a necessidade de matérias-primas virgens, possibilitando o aumento da sustentabilidade econômica (GEORGIADIS; BESIOU, 2009). A imposição de metas de coleta e reciclagem pelos governos, conjuntamente com campanhas de conscientização dos consumidores, pode influenciar positivamente a recuperação de produtos (GEORGIADIS; VLACHOS, 2004).

Os estudos apontam como limitações a dificuldade de obtenção de dados precisos sobre o sistema informal, resistência a regulamentação, necessidade de um longo período para implementação de políticas públicas e com relação aos modelos, uma impossibilidade de demonstração de todas as variáveis comportamentais e econômicas (CHU; ZHONG; JIA, 2023; ELIA; GNONI; TORNESE, 2018; PUTRI; KUSUMASTUTI, 2021; ZHENG; HONG, 2021).

6.3 METODOLOGIA

Este estudo aplica o método de Dinâmica de Sistemas (DS) para simular o impacto de incentivos fiscais na logística reversa. A metodologia de dinâmica de sistemas utiliza o sistema computacional para modelar, simular e analisar a interação de elementos em sistemas dinâmicos ao longo do tempo. Essa abordagem é indicada para lidar com problemas onde múltiplas variáveis interagem de maneira não linear, gerando efeitos acumulativos e de retroalimentação, buscando entendimento da complexidade dos sistemas modernos (STERMAN, 2000).

O presente trabalho foi desenvolvido através de um levantamento bibliográfico baseado em artigos publicados que utilizam este mesmo método, para identificar as principais variáveis, componentes e relações de causa e efeito do sistema. Estes artigos foram pesquisados nas bases de dados *Scopus* e *Web of Science*, utilizando-se as palavras chaves “*system dynamics*” and “*system dynamic model*” and “*Waste electrical and electronic equipment*” and “*WEEE*” and “*e-waste*”. Foram localizados 22 artigos, dentre os quais 12 deles embasaram o presente estudo por terem o mesmo escopo da pesquisa relativa à gestão de REEE, a efetividade da logística reversa, a implementação de incentivos fiscais, econômicos ou subsídios, bem como a aplicação do mesmo método, conforme tabela 7.

O presente método é desenvolvido em cinco etapas:

1) Definição do problema, que compreende a delimitação do sistema, identificando quais elementos e relações são importantes para o desenvolvimento de uma resposta a questão proposta (STERMAN, 2000). No presente estudo, identificamos que uma questão relevante seria a análise se o fornecimento de incentivos fiscais geraria impacto na coleta de REEE.

2) Desenvolvimento de uma representação do sistema, que consiste na possibilidade de tentar explicar o comportamento do problema identificado (STERMAN, 2000), consistente na análise de como o sistema comporta, identificando as variáveis (que podem ser de estoque,

fluxos ou auxiliares) que influenciam os fluxos no sistema analisado (MEADOWS, 2009; STERMAN, 2000).

Os estoques são representados as quantidades acumuladas, podendo corresponder a informação ou materiais. Já os fluxos têm como função a alteração dos estoques, com a entrada ou saída de dos materiais ou informações. As variáveis auxiliares se conectam aos estoques e fluxos demonstrando uma relação de causa e efeito, denominando-se como feedbacks positivos (reforço) quando representa um crescimento ou declínio exponencial ou feedbacks negativos (balanceamento) que ao serem aplicados apresentam um equilíbrio, com função de estabilizar o sistema (MEADOWS, 2009; STERMAN, 2000).

3) Construção do modelo demonstrando os elementos componentes do sistema e como eles se conectam, desenvolvidos através de diagramas causais ou estruturais que contemplam estoques, fluxos e variáveis (MEADOWS, 2009; STERMAN, 2000).

Para isso, é necessário um diagrama com variáveis estruturadas como estoques (acumuladores) e fluxos (taxas de entrada ou saída). Esse modelo estrutural é então transformado em um modelo quantitativo, onde os estoques são descritos por equações diferenciais. Essa conversão permite simular o comportamento do sistema ao longo do tempo, testando cenários e políticas (STERMAN, 2000; MEADOWS, 2009).

4) Realização de testes no modelo para verificação de sua consistência e adequação ao propósito do estudo. Neste momento são verificados e analisados cenários, considerando possibilidades, ajustando para uma melhor correspondência entre o modelo e o cenário real (MEADOWS, 2009; STERMAN, 2000).

5) Ao final as conclusões podem auxiliar na tomada de decisões sobre o problema analisado, pois ao comparar as hipóteses com a realizada, compreendendo os efeitos da mudança proposta, como o intuito de promoção de melhorias no sistema (MEADOWS, 2009; STERMAN, 2000).

6.3.1 Modelagem na dinâmica de sistemas

No presente estudo foi utilizado o sistema computacional Vensim PLE, software gratuito, com capacidade de desenvolver de forma intuitiva as interações de sistemas complexos, facilitando a experimentação de diferentes cenários e sua análise de consistência.

A construção do modelo iniciou-se com o levantamento dos principais elementos do sistema, variáveis-chaves e relações de causa e efeito que determinam a estrutura do sistema.

Essas informações são utilizadas para construir o diagrama de loop causal do sistema de logística reversa de REEE analisado. Em seguida, foi elaborado um diagrama de estoques e fluxos, contemplando os principais estoques (como consumo de EEE, geração de REEE, reciclagem formal e informal), fluxos (vendas, descarte, coleta) e variáveis auxiliares e constantes (percentuais de venda, descarte, coleta, etc), com foco específico na logística reversa de REEE, em especial no comportamento da coleta formal.

Assim como outros sistemas, a logística reversa tem uma grande complexidade de variáveis que a influenciam. Pensar na implementação de incentivos, verificou-se que as medidas podem ser adotadas em relação aos fabricantes, consumidores, entidades gestoras ou recicladores, de forma isolada ou todas ao mesmo tempo.

No entanto, para o presente estudo, houve uma limitação para a compreensão do impacto dos incentivos fiscais no momento da coleta, que no sistema de logística reversa brasileiro, corresponde a incentivos fornecidos para as entidades gestoras, que operacionalizam a coleta formal.

A estruturação do diagrama de estoques e fluxos, representa o ciclo de vida dos equipamentos EEE até sua disposição final, com especial atenção à geração, coleta e reciclagem dos REEE, simulando o comportamento dinâmico do sistema brasileiro de gestão de REEE no período de 2025 a 2035.

6.3.2 Definição do problema e variáveis

As variáveis e parâmetros adotados no modelo foram levantados a partir de uma revisão da literatura, análise de documentos técnicos, legislação vigente e bases de dados relacionadas ao desenvolvimento da logística reversa no Brasil. Conforme apresentado na Tabela 7, foi possível identificar variáveis aplicadas em sistemas que já contemplam concessão de subsídios à reciclagem (como no setor de autopeças), incentivos financeiros diretos, restrições regulatórias, bem como elementos que modelam a interação entre recicladores formais e informais. Também foi considerada a variável de inclusão gradual dos catadores informais no sistema formal, refletindo discussões presentes na literatura internacional sobre sustentabilidade em cadeias reversas e políticas de reciclagem inclusiva (BESIOU; GEORGIADIS; VAN WASSENHOVE, 2012; GEORGIADIS; BESIOU, 2009; GUZZO; RODRIGUES; PIGOSSO; MASCARENHAS, 2022; WANG; CHANG; CHEN; ZHONG *et al.*, 2014).

Tabela 7 - Principais variáveis para o desenvolvimento do modelo

Referência	Objetivo do Estudo	Região Estudada	Principais Variáveis utilizadas
WANG; CHANG; CHEN; ZHONG <i>et al.</i> , 2014	Avaliar a eficácia de várias políticas de subsídios governamentais na indústria de reciclagem e remanufatura com foco no setor de autopeças.	China	Produção novos produtos Consumidores Reciclagem legal Subsidio reciclagem
GEORGIADIS; BESIOU, 2009	Oferecer insights para melhorar as estruturas legislativas e as práticas corporativas para aumentar a sustentabilidade ambiental e econômica na indústria eletrônica.	Grécia	Percentual coleta REEE Custo pela Coleta - consumidor Custo pela Coleta - fabricante Metas de coleta Total descarte Percentual total reciclada Percentual reciclagem Limite de reciclagem Tempo legislação Custo coleta Custo reciclagem Custo design Custo consumidor Custo aterro sanitário Custo penalidade
BESIOU; GEORGIADIS; VAN WASSENHOVE, 2012	Investigar a interação entre os sistemas formais de recuperação de resíduos e as atividades informais de limpeza, no contexto da reciclagem de REEE.	Grécia	Descarte Incontrolável Disponibilidade de Aterros Legislação Ambiental Porcentagem de Arrecadação Legislativa Conformidade com a legislação Custo de coleta de catadores Procura Esforço alocado para colaboração
ARDI; LEISTEN, 2016	Analisar o impacto das condições de mercado na sustentabilidade dos setores informais e formais de coleta de REEE ao longo de um período de simulação de 20 anos.	Índia	Percentual de coleta Capacidade de coleta formal Percentual de coleta formal Capacidade de coleta informal Custo recuperação Demanda produtos de segunda mão Valor por produto recuperado (Dólar/unidade) Custo recuperação por produto (Dólar/unidade) Procura Mercado segunda mão Porcentagem de reuso informal
RODRÍGUEZ; ESCALANTE, 2020	Estimar os impactos de diferentes instrumentos de política administrativa, econômica e de informação sobre os fluxos financeiros, econômicos e de informação de REEE na América Latina.	São Paulo, Bogotá e La Paz	Produção, Importação e Exportação Percentual de Penetração Preço dos Equipamentos Impostos sobre REEE Eficiência Energética Consumo de Energia Percentual de Coleta e Reciclagem Percentual de Renovação de Equipamentos Fluxo Físico de EEE Instrumentos de Política Capacidade de Aterros Eficiência Energética
GUZZO; RODRIGUES; PIGOSSO; MASCARENHAS, 2022	Examinar a implementação de intervenções de Economia Circular por meio de um modelo de simulação de dinâmica	Brasil	Condição dos EEE Coletados Destino nos Caminhos de Tratamento Idade dos Produtos Razão para o Descarte Aspectos de Hibernação

Referência	Objetivo do Estudo	Região Estudada	Principais Variáveis utilizadas
	de sistemas adaptado para a coleta de smartphones no Brasil.		Caminhos dos EEE para se REEE Disponibilidade de Pontos de Coleta Conveniência do Sistema de Coleta Incentivos e Recompensas Engajamento do Consumidor
GHISOLFI; DINIZ CHAVES; RIBEIRO SIMAN; XAVIER, 2017	Propor um modelo adaptando os modelos existentes para incluir os catadores como parte da responsabilidade compartilhada pela gestão do ciclo de vida dos produtos nos termos da Política Nacional de Resíduos Sólidos.	Brasil	Extração de Recursos Naturais Estoque de Matérias-Primas Distribuição de Estoque Percentual de Coleta de WEEE Capacidade de Infraestrutura Percentual de Reciclagem População de Catadores Informais Produtos em Uso Atraso de Demanda Atraso de Pedidos Atraso de Produção Quantid. de Aquisição de Recursos Naturais Quantid. de Produção Quantid. de Descarte Quantid. de Formalização de Catadores Inventário de Material Reciclável Porcentagem de Retorno Desvio
GEORGIADIS; VLACHOS, 2004	Explorar o impacto de fatores ambientais, como a "imagem verde" de uma empresa e as políticas ambientais, no comportamento de longo prazo de uma cadeia de suprimentos de circuito fechado focada na recuperação de produtos.	Grécia	Inventário de matérias-primas Inventário de produtos usados Inventário de produtos novos Inventário de produtos remanufaturados Percentual de produção Percentual de coleta Percentual de remanufatura Percentual de descarte Fator de imagem verde Comportamento do mercado Índice de pressão de políticas ambientais Estratégias de adição de capacidade de remanufatura
ELIA; GNONI; TORNESE, 2018	Avaliar e aumentar a eficiência dos sistemas de coleta de REEE por meio da transição de modelos tradicionais de agendamento fixo para modelos de agendamento dinâmico.	Itália	Frequência de Coleta Distância Total Percorrida Número de Serviços de Coleta Quantidade de REEE Coletada Custo Operacional Fluxo "um para zero" Fluxo "one-to-one" Vendas de EEE Nível de Estoque de REEE Coeficiente de Zona Nível Crítico de Controle
CHU; ZHONG; JIA, 2023	Desenvolver estratégias de incentivo eficazes para integrar mantenedores autônomos no sistema formal de reciclagem de REEE sem infringir seus interesses.	China	Quantidade de coleta pelo coletor formal Quantidade de coleta pela manutenção independente Quantidade de coleta pelo comerciante de resíduos Quantidade processada pelo processador formal Renda do mantenedor residencial Renda do processador formal Renda do processador informal Fundo de processamento Quantidade de REEE negociada com o processador informal Quantidade de REEE negociada com o processador

Referência	Objetivo do Estudo	Região Estudada	Principais Variáveis utilizadas
			formal Quantidade de REEE vendida no mercado de segunda mão Lucro por unidade de negociação Preço de compra por unidade do processador formal Preço de revenda por unidade Preço de compra por unidade do processador informal
PUTRI; KUSUMASTUTI, 2021	Identificar os fatores que influenciam a gestão formal, avaliar seu desempenho atual e elaborar melhores políticas melhorando o desempenho da logística reversa e os benefícios econômicos na gestão REEE.	Indonésia	Produto coletado formalmente Geração REEE Reutilização Reciclagem
ZHENG; HUANG; WU, 2022	Explorar e analisar soluções eficazes para gerenciar vários riscos no processo de reciclagem de REEE.	China	Percentual de Recuperação Normal Percentual de Recuperação Informal Aceitabilidade produtos reutilizados Iniciativa de Reciclagem Empresarial Quantid. de Desmontagem Informal Risco Social Risco Ambiental Risco Econômico

Fonte: Elaborado pelos Autores (2025).

A análise de sistemas complexos, como o da logística reversa, envolve diversos elementos interdependentes, incluindo as etapas de produção, distribuição, uso, coleta, fiscalização, reciclagem, os sistemas formais e informais, além da disposição final dos resíduos. Nesse contexto, instrumentos como incentivos fiscais ou financeiros, subsídios e mecanismos de ajuste de taxas configuram-se como ferramentas estratégicas para aprimorar a gestão dos REEE (GUZZO; RODRIGUES; PIGOSSO; MASCARENHAS, 2022; MICHEAUX; AGGERI, 2020; RODRÍGUEZ; ESCALANTE, 2020). Taxas pagas por produtores são ajustadas baseadas no eco-design (MICHEAUX; AGGERI, 2020), impostos sobre aterros, taxas de descarte, crédito reciclagem e subsídios para incentivar a utilização de materiais reciclados (RODRÍGUEZ; ESCALANTE, 2020), medidas fiscais e recompensas também podem ser aplicados para melhorar a eficácia do sistema de logística reversa (GUZZO; RODRIGUES; PIGOSSO; MASCARENHAS, 2022).

6.3.3 Compreensão do sistema a ser modelado

O Brasil atualmente é o maior gerador de REEE na América do Sul, com 2,4 bilhões de kg/ano, o equivalente a 11,4 kg per capita, representando um crescimento de 15% em relação

a 2019, com uma coleta formal de 3% (BALDÉ; KUEHR; YAMAMOTO; MCDONALD *et al.*, 2024). A coleta e manuseio dos REEE são realizados através de sistemas formais e informais, e ambos causam impactos ambientais significativos. A coleta formal, regida pela legislação, diminui o impacto ambiental destinando-os adequadamente, enquanto, o sistema informal, costuma a adotar métodos inadequados e sem preocupação em cumprimento da legislação, gerando um impacto negativo no meio ambiente (ARDI; LEISTEN, 2016; GUZZO; RODRIGUES; PIGOSSO; MASCARENHAS, 2022).

Neste sistema, quanto mais produção de EEE, aumenta-se as vendas. E quanto mais vendas, aumenta-se a produção. Aumentando a fabricação aumenta o consumo, uma vez que os eletroeletrônicos têm se tornado cada vez mais obsoletos, com ciclos de vida mais curtos, decorrentes do rápido consumo em buscas de produtos mais tecnológicos, aumentando consequentemente a geração de REEE (PUTRI; KUSUMASTUTI, 2021; ZHENG; HONG, 2021).

Os REEE são descartados quando se tornam obsoletos ou atingem o fim de sua vida útil, demonstrando um acúmulo ao longo do tempo (PUTRI; KUSUMASTUTI, 2021). A taxa de descarte de REEE disponíveis para reciclagem, apresentam desta forma um atraso, denominado na dinâmica de sistemas o Delay (STERMAN, 2000). Alguns fatores podem influenciar nestes atrasos, tais como, os consumidores que postergam o descarte, mesmo quando obsoletos, ausência de incentivos ou informações claras que estimulem o descarte, carência de infraestrutura ou ainda, legislações que não determinam prazos específicos para realização do descarte (PUTRI; KUSUMASTUTI, 2021; ZHENG; HUANG; WU, 2022).

O sistema formal, pela necessidade de cumprimento da legislação e destinação adequada dos REEE, acaba tendo custos operacionais mais elevados em relação ao sistema informal. A implementação de subsídios diretos (incentivos financeiros) pode proporcionar uma maior competitividade ao sistema formal, por reduzir os custos operacionais. Incentivos verdes, associados aos incentivos financeiros, incentivam a adoção de práticas ecologicamente corretas, reduzindo os riscos ambientais e sociais (CHU; ZHONG; JIA, 2023; GHISOLFI; DINIZ CHAVES; RIBEIRO SIMAN; XAVIER, 2017; ZHENG; HUANG; WU, 2022). O aumento e fortalecimento do sistema formal, tendem a diminuir o sistema informal, entretanto, tal medida não se demonstra automática, mas sim dependem de implementações de regulamentações e incentivos, tanto para aumento da coleta quanto para que os consumidores sejam incentivados a realizar o descarte para o sistema formal (ARDI; LEISTEN, 2016; GUZZO; RODRIGUES; PIGOSSO; MASCARENHAS, 2022).

6.3.4 Desenvolvimento do diagrama de estoques e fluxos

O modelo apresentado descreve a dinâmica de um sistema complexo, relacionado à produção, consumo, descarte de REEE, sistemas de coleta formal e informal e a implementação dos incentivos fiscais, que sugerem, ao serem implementados, o aumento da coleta formal. A implementação de políticas fiscais, combinadas com as metas legislativas ambientais, podem corresponder a um aumento na coleta de REEE, e consequentemente reduzir os impactos ambientais decorrentes de descarte inadequado (WANG; CHANG; CHEN; ZHONG *et al.*, 2014).

Após a compreensão do sistema, no qual se analisou as influências e variáveis a serem consideradas, desenvolveu-se um diagrama de estoques e fluxos.

O software Vensim PLE utiliza como padrão o método de integração Euler (SYSTEMS, 2023) que representam acumulação dos dados ao longo do tempo, consistindo na lógica central de algumas simulações de sistemas, como existentes neste artigo.

Os parâmetros temporais estabelecidos neste modelo são anuais, vez que os relatórios e as políticas de coleta de resíduos também são considerados anualmente. O *time step* (passo do tempo) deve ser coerente com a escala de tempo dos dados disponíveis e a velocidade de mudanças no sistema, o *saverper* considerado nos mesmos parâmetros do *time step*, corresponde a qual frequência os dados são armazenados, ou seja, em ciclo anuais (FORRESTER, 1997; STERMAN, 2000).

O desenvolvimento do modelo baseou-se em premissas estruturais e comportamentais, principalmente relacionada a coleta formal e informal e o papel dos incentivos fiscais. A primeira premissa consiste na influência da coleta formal, diminuindo a coleta informal, isto porque existe uma disputa entre os resíduos, e o mesmo não poderá ser coletado duas vezes, desta forma, quando a coleta formal aumenta impulsionada por políticas públicas a informal diminui (GEORGIADIS; BESIOU, 2009; GHISOLFI; DINIZ CHAVES; RIBEIRO SIMAN; XAVIER, 2017). As equações desenvolvidas, buscam garantir que os resíduos coletados, não superem o estoque disponível, e demonstrem a competição pelos REEE.

Outra premissa importante consiste no impacto dos incentivos fiscais diretamente na coleta formal, pensando no oferecimento às entidades gestoras responsáveis pelo gerenciamento da coleta. Os percentuais de reciclagem formal têm uma equação de crescimento limitada, estimada no modelo em no máximo 90%. E a reciclagem informal é considerada de forma proporcional, uma vez que nem todo REEE é reciclado, sendo parte destinada inadequadamente

no meio ambiente. Na modelagem de sistemas dinâmicos complexos é importante a interdependência entre fluxos, assim, como aplicado no modelo desenvolvido relacionado aos efeitos dos incentivos diretos e a redução da coleta informal mediante a melhoria da coleta formal (MICHEAUX; AGGERI, 2020; RODRÍGUEZ; ESCALANTE, 2020; STERMAN, 2000).

Considerando o estoque de novos produtos de EEE, em 2022, foram colocados no mercado 3.210.000.000 kg/ano (PARTNERSHIP, 2024). Estes valores são variáveis, assim, para chegar ao mais próximo da realidade, considerando o curto período de dados disponíveis (2021 a 2024), foi utilizada a média dos percentuais, considerando os resultados de aumento ou diminuição do mercado neste período, resultando em 12%, considerando para o sistema um crescimento linear (ELETROS, 2024), conforme Tabela 8.

A produção anual de novos equipamentos eletroeletrônicos (EEE) foi modelada utilizando uma função de crescimento, em que a produção do ano-base (2022) é multiplicada por um fator de crescimento baseado na quantidade média de aumento da produção. Em seguida, subtrai-se a quantidade de unidades vendidas no período. As quantidades utilizadas como base para esta simulação (EEE colocados no mercado, REEE gerados e REEE coletados), foram calculados considerando a média ponderada dos pesos, baseado no método Laspeyres, ou seja, pesos fixos do período-base, baseando-se nas quantidades em um período de referência, para calcular a variação de preços ou custos ao longo do tempo (PARTNERSHIP, 2024; IBGE, 2004).

O estoque referente ao consumo de EEE, é influenciado por dois fluxos principais: entrada, via vendas, e saída, por meio do descarte. A variável percentual de vendas foi estabelecida em 45%, e o descarte, em 70%, já considerando um percentual de retenção de 30% (CHU; ZHONG; JIA, 2023; GHISOLFI; DINIZ CHAVES; RIBEIRO SIMAN; XAVIER, 2017; PUTRI; KUSUMASTUTI, 2021; ZHENG; HUANG; WU, 2022). A lacuna entre o consumo e o efetivo descarte de EEE, pode ser influenciado por fatores emocionais, econômicos e culturais, além da ausência de incentivos ou da falta de conscientização ambiental.

O valor inicial da geração total de REEE corresponde a 2.443.000.000 kg/ano em 2022 (PARTNERSHIP, 2024). Esses resíduos seguem diferentes caminhos: reciclagem formal, com valor inicial de 19.959.540 kg/ano (ELETRODOMÉSTICOS, 2022; ELETRON, 2021), reciclagem informal, ou são descartados sem controle. A estimativa da reciclagem informal considera 72% da geração total de REEE, conforme dados da Tabela 8 e com base em estudos que apontam a informalidade como predominante na cadeia de reciclagem no Brasil, sendo apontado em pesquisa realizada pela entidade gestora Green Eletron que 25% dos REEE são

descartados em lixo comum (ELETRON, 2023). Outros estudos, informam que aproximadamente 90% dos recicladores operam fora de sistemas organizados (GEORGIADIS; BESIOU, 2009; GHISOLFI; DINIZ CHAVES; RIBEIRO SIMAN; XAVIER, 2017).

A quantidade de resíduos descartados sem controle foi obtida pela subtração do total somado de reciclagem formal e informal da geração total de resíduos. Adicionalmente, o modelo considera que nem todo resíduo coletado informalmente é reciclado, estabelecendo, assim, uma diferença entre a coleta e o reaproveitamento real do material no sistema informal.

A reciclagem formal, neste modelo, parte de um percentual inicial de 3%, inferior à meta legal de 17% prevista para 2025, nos termos do Decreto nº 10.240/2020 (BRASIL, 2020), demonstrando que a realidade brasileira ainda está aquém do cumprimento efetivo dessa meta (BALDÉ; KUEHR; YAMAMOTO; MCDONALD *et al.*, 2024). Portanto, optou-se por representar o avanço da legislação como uma função de crescimento gradual, utilizando a função RAMP, que eleva o percentual de 3% para 17% ao longo do período de análise.

A análise de cenários permite a simulação de diferentes condições, possibilitando a visualização de consequências de decisões políticas para sua implementação e aperfeiçoamento na realidade (GHISOLFI; DINIZ CHAVES; RIBEIRO SIMAN; XAVIER, 2017). A simulação comparativa possibilita a identificação de estratégias que tenham impactos positivos, minimizando os impactos negativos (CHU; ZHONG; JIA, 2023). Para desenvolvimento deste artigo foram desenvolvidos dois cenários, o primeiro com os dados obtidos (cenário base) e sem incentivos. O segundo cenário apresenta os incentivos fiscais de forma evolutiva de 0 a 15%, alterando apenas algumas variáveis para aplicação na modelagem, conforme Tabela 8.

Tabela 8 - Variáveis e equações Diagrama– Cenário Base e Cenário com Incentivos (simulação 2025 – 2035)

Tipo		Equações				
Variável		Cenário Base	Cenário com Incentivos	Valor Inicial	Unidade	Fonte Dados
Estoque	Fabri- cação de no- vos EEE (F)	PRODUCTION OF NEW PRODUCTS EEE= INTEG (PRODUCTION YEAR 2022*(1+PRODUCTI ON INCREASE RATE) - SALES, PRODUCTION YEAR 2022)	Equações mantidas conforme o cenário base.	3.210.000.0 00	KG	PARTNERSHIP, 2024
Variável Constante	Au- mento Produ- ção (AP)	PRODUCTION INCREASE RATE = 0.12	Equações mantidas conforme o cenário base.	12%	Dmnl	ELETROS, 2024 (média 2021/2024)
Variável Constante	Produ- ção do Ano (P)	PRODUCTION YEAR 2022 = 3.21e+09	Equações mantidas conforme o cenário base.	3.210.000.0 00	KG/Year	PARTNERSHIP, 2024
Fluxos	Ven- das (V)	SALES = SALES RATE * PRODUCTION OF NEW PRODUCTS EEE	Equações mantidas conforme o cenário base.		KG	
Variável Constante	Per- cen- tual de Ven- das (PV)	SALES RATE = 0.45	Equações mantidas conforme o cenário base.	45%	Dmnl	ELIA; GNONI; TORNESE, 2018
Estoque	Con- sumo de EEE (C)	CONSUMPTION OF EEE = INTEG (SALES - DISCARD, 1.4445e+09)	Equações mantidas conforme o cenário base.	1.444.500.0 00	KG	Assumido com base ELIA; GNONI; TORNESE, 2018.
Fluxos	Des- carte (D)	DISCARD = CONSUMPTION OF EEE * DISCARD RATE	Equações mantidas conforme o cenário base.		KG/Year	Assumido com base em GHISOLFI; DINIZ CHAVES; RIBEIRO SIMAN; XAVIER, 2017
Variável Constante	Per- cen- tual de Des- carte (PD)	DISCARD RATE = 0.7	Equações mantidas conforme o cenário base.	70%	Dmnl	

Tipo		Equações				
Variável		Cenário Base	Cenário com Incentivos	Valor Inicial	Unidade	Fonte Dados
Estoque	Total REEE Gerados (TRG)	TOTAL WEEE STOCK = INTEG (DISCARD - FORMAL COLLECTION - INFORMAL COLLECTION, 2.443e+09)	Equações mantidas conforme o cenário base.	2.443.000.000	KG	PARTNERSHIP, 2024
	Coleta Formal (CF)	FORMAL COLLECTION = FORMAL COLLECTION RATE * TOTAL WEEE STOCK				
Variável Auxiliar	Per-centage de Coleta Formal (PCF)	FORMAL COLLECTION RATE = BASE COLLECTION RATE + (ENVIRONMENTAL LAW)	FORMAL COLLECTION RATE = BASE COLLECTION RATE + (ENVIRONMENTAL LAW) + (1 - UNIT COST WITH INCENTIVES / UNIT COST) * SENSITIVITY INCENTIVE	US\$ 0.09491/kg	Dmnl	INDUSTRIAL, 2013
	Custo Unitário (C)	UNIT COST = 0.09491	UNIT COST WITH INCENTIVES = UNIT COST * (1 - FISCAL INCENTIVES)			
Variável Auxiliar	Custo Coleta Formal (CCF)	COST COLLECTION FORMAL = FORMAL COLLECTION * UNIT COST	COST COLLECTION FORMAL = FORMAL COLLECTION * UNIT COST WITH INCENTIVES	3%	US\$/Year	BALDÉ; KUEHR; YAMAMOTO; MCDONALD <i>et al.</i> , 2024
Variável Constante	Per-centage de Coleta Base (PCB)	BASE COLLECTION RATE = 0.03	Equações mantidas conforme o cenário base.			
Variável Constante	Per-centage Base de Disposição (PBD)	BASE DISPOSED RATE = 0.25	Equações mantidas conforme o cenário base.	25%	Dmnl	ELETRON, 2023

Tipo		Equações				
Variável		Cenário Base	Cenário com Incentivos	Valor Inicial	Unidade	Fonte Dados
Variável Auxiliar	Leis Ambientais (LA)	ENVIRONMENTAL LAW = RAMP (0.014,2025,2035)	Equações mantidas conforme o cenário base.	3 a 17%	Dmnl	Decreto 10.240/20
Variável Auxiliar	Percentual de Disposição (PDisp)	DISPOSED RATE = BASE DISPOSED RATE * (1 - FORMAL COLLECTION RATE)	Equações mantidas conforme o cenário base.		Dmnl	
Estoque	Reciclagem Formal (RF)	FORMAL RECYCLING = INTEG (MAX (0, MIN (FORMAL COLLECTION * FORMAL RECYCLING RATE, FORMAL COLLECTION))), 1.98595e+07)	Equações mantidas conforme o cenário base.	19.859.540	KG	ELETRON, 2023
Variável Auxiliar	Percentual de Reciclagem Formal (PRF)	FORMAL RECYCLING RATE = MIN (0.65 + RAMP (0.02, 2025, 2035), 0.9)	Equações mantidas conforme o cenário base.	65%	Dmnl	INDUSTRIAL, 2013
Fluxos	Coleta Informal (CI)	INFORMAL COLLECTION = INFORMAL COLLECTION RATE * (TOTAL WEEE STOCK - FORMAL COLLECTION)	Equações mantidas conforme o cenário base.		KG/Year	
Variável Auxiliar	Percentual de Coleta informal (PCI)	INFORMAL COLLECTION RATE = MIN (1, BASE INFORMAL RATE * (1 - FORMAL COLLECTION RATE))	Equações mantidas conforme o cenário base.		Dmnl	
Estoque	Reciclagem Informal (RI)	INFORMAL RECYCLING = MAX (0, MIN (INFORMAL COLLECTION * INFORMAL RECYCLING RATE, INFORMAL COLLECTION))	Equações mantidas conforme o cenário base.	1.054.960.460	KG	Assumido com base em ELETRON, 2023

Tipo		Equações			
Variável		Cenário Base	Cenário com Incentivos	Valor Inicial	Unidade Fonte Dados
Variável Auxiliar	Per- cen- tual de Reci- cla- gem Infor- mal (PRI)	INFORMAL RECYCLING RATE = MAX (0, MIN (BASE INFORMAL RATE * (1 - FORMAL RECYCLING RATE / 0.9), BASE INFORMAL RATE))	Equações mantidas conforme o cenário base.		Dmnl
Variável Constante	Per- cen- tual Base de In- formal (PBI)	BASE INFORMAL RATE=0.72	Equações mantidas conforme o cenário base.	72%	Dmnl Assumido com base em ELETRON, 2023; BALDÉ; KUEHR; YAMAMOTO; MCDONALD <i>et al.</i> , 2024
Variável Auxiliar	Resí- duos Des- carta- dos sem Con- trole (RDsC)	WEEE DISPOSED WITHOUT CONTROL= MIN (TOTAL WEEE STOCK, MAX (0, TOTAL WEEE STOCK * DISPOSED RATE) + (TOTAL WEEE STOCK - FORMAL COLLECTION- INFORMAL COLLECTION) + (INFORMAL COLLECTION - INFORMAL RECYCLING))	Equações mantidas conforme o cenário base.		KG
Variável Auxiliar	Resí- duos Des- carta- dos com Con- trole (RDcC)	WEEE DISPOSED WITH CONTROL = FORMAL RECYCLING	Equações mantidas conforme o cenário base.		KG/Year
Variável Auxiliar	Incen- tivos Fiscais (IF)	Equações inexistentes no cenário base.	FISCAL INCENTIVES=MI N (0.1, RAMP (0.0333, 2025,2030)) + MIN (0.05, RAMP (0.025, 2031,2035))	0% a 10% (2025 a 2030) 10% a 15% (2031 a 2035)	Dmnl

Tipo		Equações			
Variável		Cenário Base	Cenário com Incentivos	Valor Inicial	Unidade
Variável Constante	Fator Sensibilidade Incentivos (FSI)	Equações inexistentes no cenário base.	0.2	0.2	Dmnl

Fonte: Elaborado pelos Autores (2025).

Neste estudo optou-se por considerar fatores de sensibilidade apenas em relação aos incentivos fiscais. Parte-se da premissa que a legislação se constitui em um documento vinculante, aplicando neste contexto de forma linear, mesmo com algumas defasagens operacionais. Na variável leis ambientais (*environmental law*) espera-se a aplicabilidade de funções que simulem crescimento gradual, no entanto, no caso do contexto brasileiro espera-se que em 2035 esteja com coleta em pelo menos 17%, uma vez que tal meta, na legislação, era estabelecida para a data inicial do modelo (BRASIL, 2020; STERMAN, 2000).

Aplicou-se neste modelo o fator 0.2, representando que a cada ponto percentual (1%) de aumento do incentivo fiscal de 2025 a 2035, a coleta aumenta em 0,2 pontos percentuais. Diante do escopo deste trabalho, apresentando a implementação de incentivos apenas na coleta, de forma isolada, os mesmos não representam impacto proporcional a coleta. Este comportamento é representado quando aplicamos o fator de sensibilidade menor que 1, reduzindo o impacto direto dos incentivos, refletindo a existência de outros fatores que também podem impactar na coleta como limitações operacionais, institucionais e logísticas (MICHEAUX; AGGERI, 2020; RODRÍGUEZ; ESCALANTE, 2020).

A equação de resíduos descartados sem controle, representa a parcela dos resíduos que não passa por processos formais ou informais de reciclagem, e a diferença entre os resíduos coletados informalmente e não reciclados. Esta equação tem uma limitação a quantidade existente no estoque de REEE, denominadas como (MIN..., MAX...). As limitações aplicadas são importantes para assegurar que os fluxos de descarte não excedam a quantidade total de resíduos acumulados, respeitando os limites físicos (MEADOWS, 2009; STERMAN, 2000).

6.3.5 Testes de sensibilidade dos parâmetros do modelo

Em modelos dinâmicos é importante a análise de sensibilidade, etapa que verifica as variações nos parâmetros de entrada e saída que impactam as variáveis de interesse do sistema, permitindo identificar os elementos mais críticos do modelo (STERMAN, 2000). Especificamente, em relação a logística reversa existem variáveis comportamentais e econômicas que afetam diretamente os fluxos formais e informais (GEORGIADIS; BESIOU, 2009). Ademais, em sistemas complexos, a resposta não é linear, e pequenas mudanças podem influenciar significativamente os estoques e fluxos simulados (FORRESTER, 1997; STERMAN, 2000).

No caso deste estudo, o sistema Vensim PLE realiza o teste de sensibilidade com variações de $\pm 10\%$ em torno dos valores de referência para os principais parâmetros, buscando entender quais as variáveis que exercem maior influência sobre o comportamento do sistema.

6.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este modelo foi desenvolvido com base na abordagem de dinâmica de sistemas, utilizando os elementos fundamentais: estoques, fluxos e variáveis auxiliares. Os resultados indicam que tais incentivos contribuem para o aumento da coleta e reciclagem formal, ao mesmo tempo em que promovem a redução da coleta informal e do descarte inadequado. No entanto, quando aplicados isoladamente, os incentivos não são suficientes para garantir a plena efetividade do sistema.

As variáveis relacionadas às entradas do sistema (produção, vendas e descarte) e aos mecanismos de coleta, com destaque para a coleta informal, demonstraram-se as mais sensíveis e críticas para o comportamento dinâmico do modelo. A modelagem teve como foco o impacto dos incentivos fiscais na coleta formal, com a construção de dois cenários: o cenário base, que considera apenas a legislação vigente, e o cenário com incentivos (Figura 8), que incorpora incentivos fiscais crescentes ao longo do tempo.

A resposta do sistema à introdução de incentivos não é imediata nem linear. Verificou-se que a coleta formal cresce progressivamente, enquanto a coleta informal tende a cair, premissas consideradas na elaboração, porém, esses efeitos são mais evidentes quando combinados com a aplicação simultânea de outros instrumentos regulatórios e financeiros (GUZZO; RODRIGUES; PIGOSSO; MASCARENHAS, 2022; RODRÍGUEZ; ESCALANTE, 2020).

O setor informal, por sua vez, apresenta resposta mais pontual a variáveis econômicas, como o valor de revenda dos materiais, do que a incentivos governamentais. Isso limita a substituição direta entre os sistemas formal e informal (ARDI; LEISTEN, 2016), conforme evidenciado na Tabela 9, demonstrando que em pontos percentuais, a coleta informal não tem praticamente alteração.

Tabela 9 - Dados simulados (2025-2035) – Valores Finais

Variáveis	Cenário Base (Kg) (2035)	Cenário com Incentivos (Kg) (2035)	Diferença entre cenários (%)
FORMAL COLLECTION	900.156.000	1.068.190.000	18,66%
INFORMAL COLLECTION	2.626.380.000	2.461.120.000	-6,29%
FORMAL RECYCLING	3.022.730.000	3.645.410.000	20,59%
INFORMAL RECYCLING	3.470.130.000	3.387.410.000	-2,38%
FORMAL COLLECTION RATE	17%	20%	
INFORMAL COLLECTION RATE	59%	57%	
WEEE DISPOSED WITHOUT CONTROL	2.023.470.000	1.953.560.000	-3,45%

Fonte: Elaborado pelos Autores (2025).

Com a implementação progressiva de incentivos fiscais, modelada por uma equação RAMP, e um fator de sensibilidade de 0,2, os dados de 2035 demonstram, em comparação com o cenário base, um aumento de 18,66% na coleta formal e de 20,59% na reciclagem formal. O fortalecimento do setor formal provoca o enfraquecimento do setor informal, demonstrando que os incentivos atuam como mecanismo de aumento da competitividade para o sistema regularizado (ARDI; LEISTEN, 2016; GUZZO; RODRIGUES; PIGOSSO; MASCARENHAS, 2022), demonstrando uma queda na coleta informal de -6,29%, na reciclagem informal -2,38% e na disposição sem controle de -3,45%.

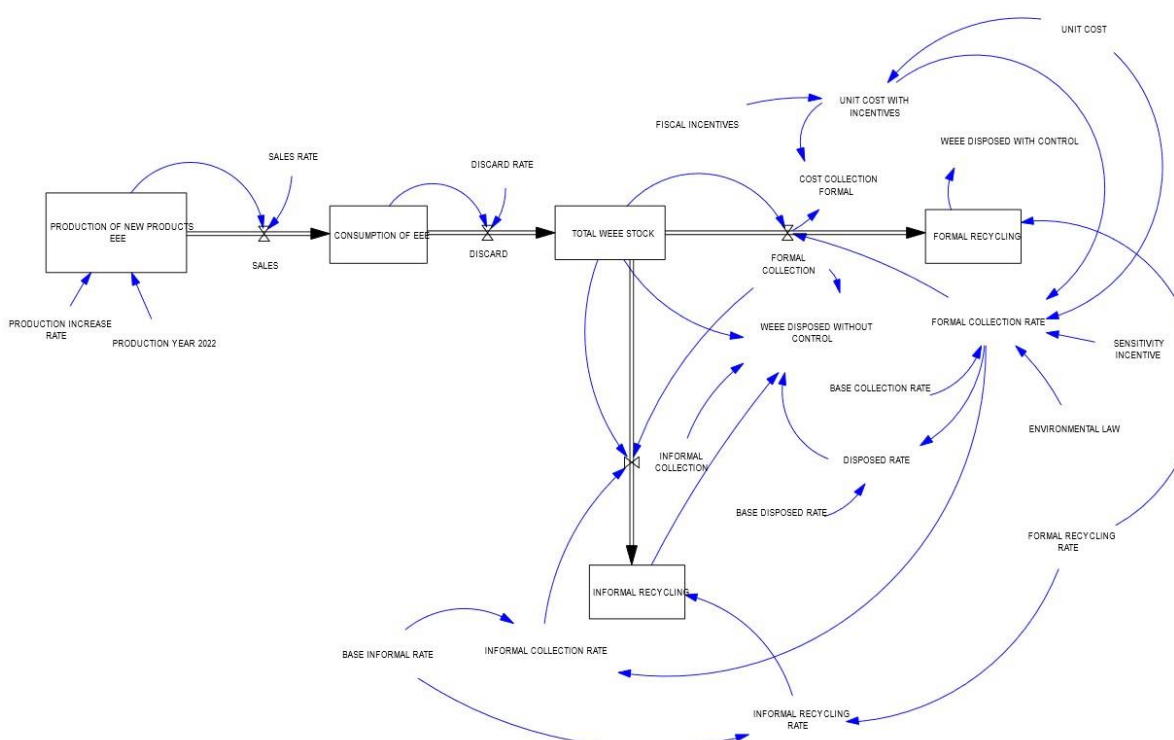
No presente modelo, os incentivos fiscais foram aplicados sobre o custo dos REEE representados, considerando-se um valor médio de US\$ 94,91 por tonelada coletada (INDUSTRIAL, 2013). Com base nesse parâmetro, foram implementadas as variáveis custo unitário, que representa o custo médio por tonelada, e o custo unitário com Incentivo, que reflete a redução proporcional desse valor diante da aplicação de incentivos fiscais implementados progressivamente no período de 2025 a 2035.

Em contextos de elevada complexidade sistêmica e escassez de dados econômicos detalhados, é metodologicamente aceitável adotar representações funcionais diretas para intervenções políticas, como os incentivos fiscais. Essa abordagem permite simular efeitos propor-

cionais e controlados sobre variáveis-chave, sem comprometer a validade das análises de cenários nem a extração de aprendizados sobre políticas públicas (STERMAN, 2000). Em estudos de dinâmica de sistemas, o foco está em compreender os padrões de comportamento ao longo do tempo, mais do que na reprodução exata de relações econômicas detalhadas, muitas vezes inviáveis diante da incerteza ou inexistência de dados financeiros precisos.

Dessa forma, os incentivos foram modelados como um fator de aumento progressivo no percentual de coleta formal, permitindo observar sua influência sobre o sistema ao longo do tempo. Essa representação mantém a coerência estrutural do modelo e alinha-se às diretrizes da literatura especializada, que reconhece a validade de abordagens funcionais simplificadas em situações com limitações empíricas (GUZZO; RODRIGUES; PIGOSSO; MASCARENHAS, 2022; MICHEAUX; AGGERI, 2020; RODRÍGUEZ; ESCALANTE, 2020).

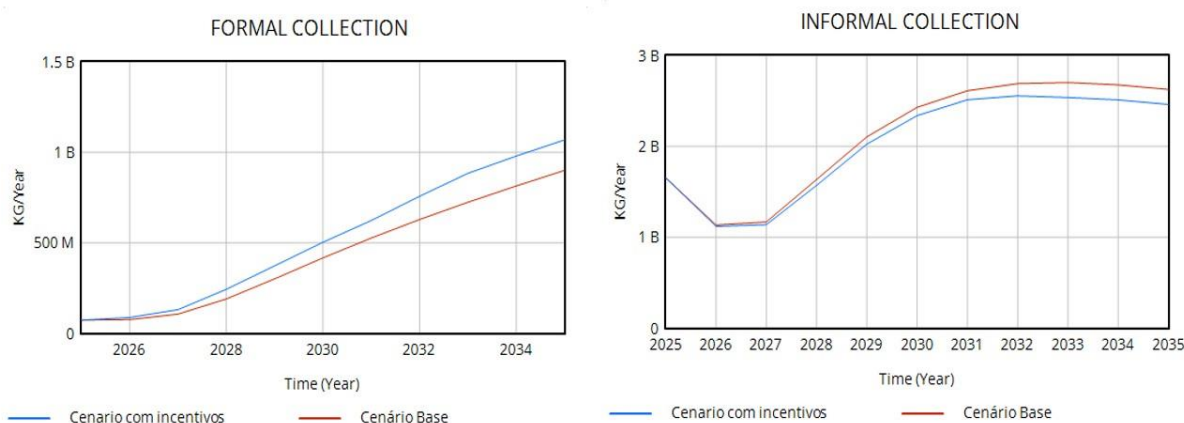
Figura 8 - Diagrama de estoques e fluxos (Cenário com Incentivos)



Fonte: Elaborado pelos Autores (2025).

Os resultados da modelagem comparando a coleta formal e informal estão representados na Figura 9.

Figura 9 - Comparativo entre a Coleta Formal e Informal



Legenda: B=bilhões de kg/ano.

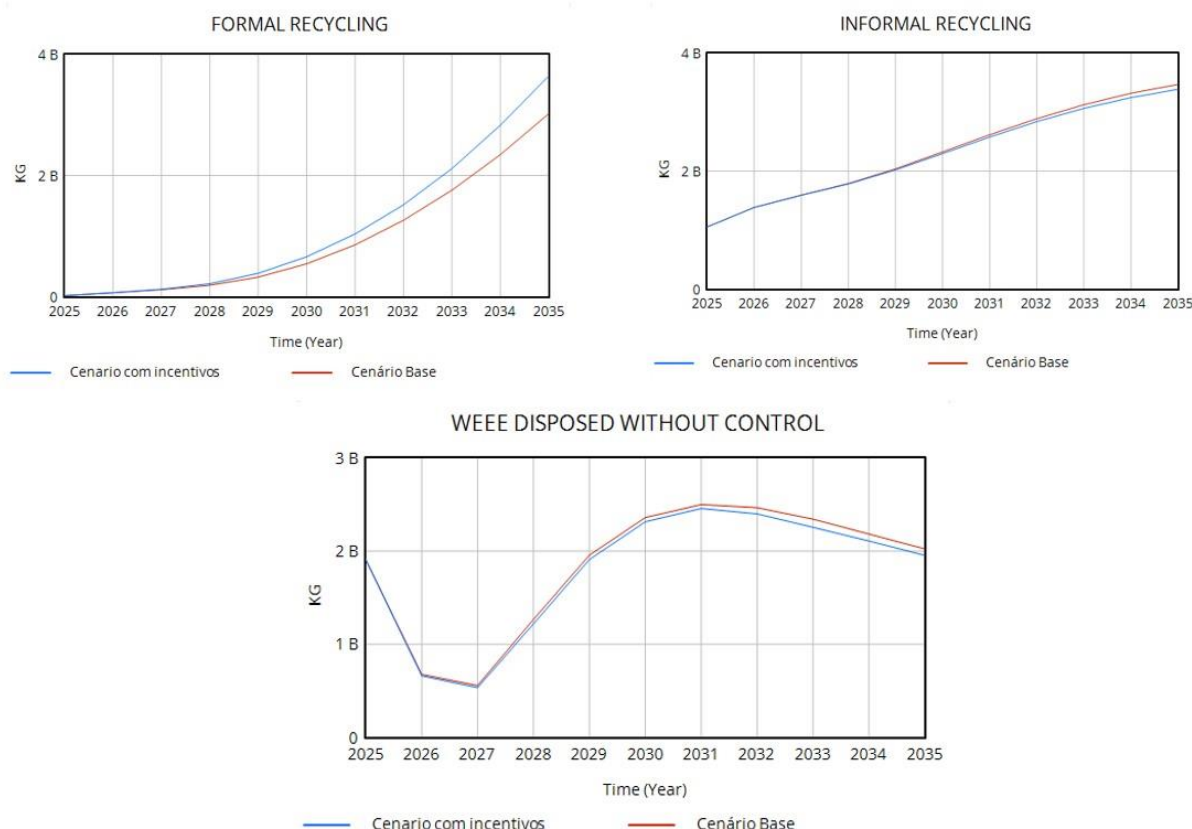
Fonte: Elaborado pelos Autores (2025).

No gráfico de coleta formal (Figura 9), pode-se identificar que o reflexo da legislação e incentivos são mais expressivos em 2030, quando os incentivos são de 10%, demonstrando o impacto positivo em relação a coleta. Incentivos e políticas estruturadas favorecem o aumento progressivo da coleta formal (GHISOLFI; DINIZ CHAVES; RIBEIRO SIMAN; XAVIER, 2017).

Os dados apresentados em relação a coleta informal, apresentando uma queda em 2026 e 2028, demonstram o impacto da legislação aplicada com crescimento gradual, entretanto, a partir de 2028 retoma o crescimento. Este resultado demonstra que a implementação de incentivos fiscais isoladamente, sem desenvolvimento de uma política estruturada, não reflete em eficácia plena, mas sim em reduções lentas (GHISOLFI; DINIZ CHAVES; RIBEIRO SIMAN; XAVIER, 2017).

A Figura 10 apresenta a diferença projetada entre a reciclagem formal e informal e o impacto na disposição sem controle de REEE.

Figura 10 - Diferenças entre Reciclagem formal, informal e disposição sem controle



Legenda: B=bilhões de kg/ano.

Fonte: Elaborado pelos Autores (2025).

Ao analisar a representação gráfica da reciclagem formal e informal verifica-se que à medida que o sistema formal se estrutura e se fortalece, há um enfraquecimento do sistema informal. O sistema informal é persistente, até porque mantém vantagens econômicas em relação ao sistema formal, entretanto, há possibilidade de fortalecimento do sistema formal por meio de incentivos e regulação (ARDI; LEISTEN, 2016).

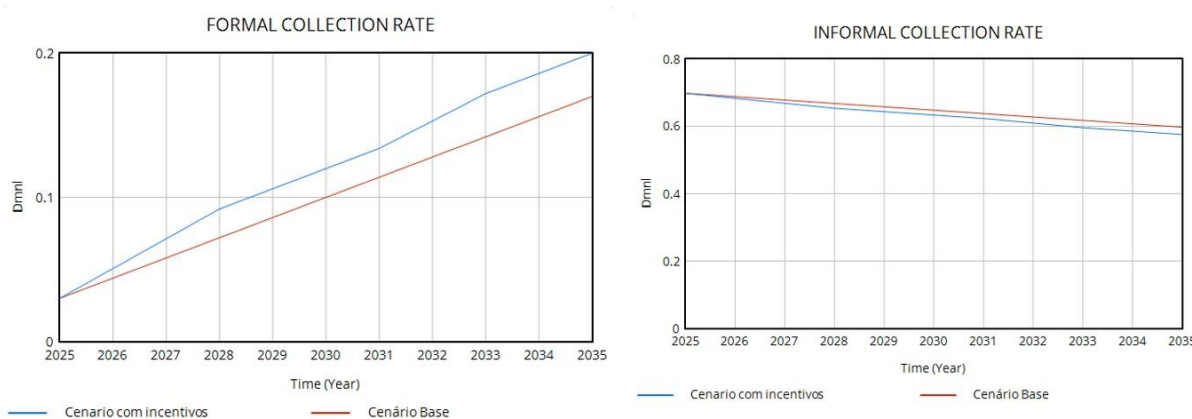
A redução de -3,45% na disposição sem controle aponta para uma mudança de fluxos anteriormente informais ou inadequados para canais formalizados, o que contribui diretamente para o objetivo central da logística reversa, que é garantir a destinação ambientalmente correta dos resíduos (CHU; ZHONG; JIA, 2023; ZHENG; HUANG; WU, 2022), conforme ilustrado na Figura 10.

Em ambos os cenários a implementação gradual da legislação impacta na redução da disposição sem controle, entretanto, a partir de 2027, observa-se um crescimento gradual, atingindo seu pico em 2031, que se relaciona com o crescimento contínuo na geração de REEE, em face a fabricação de EEE. O distanciamento entre os resultados dos cenários a partir de 2029

reflete os efeitos cumulativos, consistente com a implementação dos incentivos aliados a legislação. Neste contexto, os incentivos não produzem impacto imediato, mas sim gradualmente, por meio da expansão da infraestrutura, do fortalecimento institucional e do estímulo à participação de cooperativas e empresas no sistema formal (WANG; CHANG; CHEN; ZHONG *et al.*, 2014; GHISOLFI; DINIZ CHAVES; RIBEIRO SIMAN; XAVIER, 2017).

A Figura 11 apresenta os resultados da projeção para o percentual de coleta formal e informal, representando no cenário base apenas a legislação e no outro cenário com a implementação dos incentivos fiscais.

Figura 11 - Percentual de coleta formal e informal nos dois cenários avaliados



Fonte: Elaborado pelos Autores (2025).

Enquanto a coleta formal cresce de forma acentuada (sendo superior a 17% no cenário com incentivos), a coleta informal diminui modestamente, com queda inferior a 10% no mesmo período, demonstrando que resíduos coletados pelo sistema formal não derivam exclusivamente da redução da coleta informal, mas de outras frentes como o descarte inadequado e aumento da geração de REEE. Esses resultados estão de acordo com a literatura, na qual projetam que percentuais formais podem crescer até 20–22% com incentivos e rede estruturada (GUZZO; RODRIGUES; PIGOSSO; MASCARENHAS, 2022).

Verifica-se que políticas públicas aplicadas isoladamente e apenas em uma frente não resultam em impactos significativos. O setor informal mantém altos percentuais de coleta quando não há políticas integrativas, e apenas incentivos formais são insuficientes para reduzir drasticamente sua participação, resultando em pouca afetação da coleta informal, reforçando a visão de que a informalidade não desaparece apenas com incentivo ao formal (ARDI; LEISTEN, 2016).

6.5 CONCLUSÕES

Embora os incentivos fiscais tenham potencial para impulsionar a logística reversa e contribuir para os objetivos de uma economia circular, os resultados deste estudo reforçam que sua efetividade depende diretamente da forma como são implementados. Quando aplicados de forma isolada ou restrita a uma única frente, os efeitos podem ser insatisfatórios ou até contrários aos objetivos propostos (ARDI; LEISTEN, 2016; GUZZO; RODRIGUES; PIGOSSO; MASCARENHAS, 2022).

As simulações indicaram que, quando os incentivos são implementados de maneira gradual e combinados com instrumentos regulatórios, como no cenário com legislação ambiental e sensibilidade ajustada, a coleta formal pode crescer até 18,66%, enquanto a disposição sem controle é reduzida em -3,45%. No entanto, a aplicação direta dos incentivos sobre o percentual de coleta formal, adotada neste modelo pela ausência de dados sobre a estrutura de custos, evidencia uma limitação estrutural. A falta de integração com mecanismos realistas de precificação pode superestimar os impactos. Incentivos mal planejados ou desvinculados de políticas estruturantes podem até fortalecer o setor informal, desviando resíduos para cadeias menos seguras e ambientalmente danosas (MICHEAUX; AGGERI, 2020).

Nesse contexto, a experiência brasileira simula um alerta importante: em cenários de políticas fragmentadas, a força transformadora dos incentivos fiscais é enfraquecida, podendo resultar em aumento da informalidade e ampliação dos impactos ambientais, ou resultados insatisfatórios.

A adoção de uma abordagem integrada, que contemple incentivos a fabricantes, estímulos aos consumidores para a destinação correta e apoio a operadores logísticos e recicladores, apresenta-se como alternativa mais eficaz do que políticas isoladas.

Os cenários modelados demonstram que os incentivos fiscais, ao fortalecerem a coleta formal, beneficiam diretamente as entidades gestoras e os recicladores, promovendo a redução da informalidade e o aumento dos resíduos processados legalmente. A articulação entre incentivos, legislação ambiental e estruturação da coleta constrói um ambiente favorável a ganhos econômicos no sistema formalizado.

Este estudo recomenda, ainda, a implementação de mecanismos de monitoramento e avaliação contínua das políticas de incentivo, possibilitando ajustes dinâmicos, maior eficácia e transparência. Da mesma forma, destaca-se a importância de fomentar a inclusão social dos

atores da cadeia informal, por meio de sua formalização, capacitação ou integração em programas de coleta estruturada.

Para pesquisas futuras, sugere-se o aprofundamento da análise com base em dados reais sobre custos operacionais e retorno financeiro dos agentes envolvidos, bem como a modelagem de diferentes formatos de implementação de incentivos fiscais, de modo a ampliar a contribuição da dinâmica de sistemas na formulação de políticas públicas ambientais.

7. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O fornecimento de subsídios oferece benefícios econômicos, pois estimula a economia, promove a inclusão social, aumenta o consumo e apoia atividades de reciclagem. A redução de impostos como parte desses subsídios pode ampliar tais benefícios, impulsionando melhorias ambientais e socioeconômicas (ALÓS; MILAN; EBERLE, 2023).

Incentivos financeiros são importantes e podem melhorar a gestão da logística reversa de REEE. Cooperativas de catadores e pequenas empresas de gestão de resíduos eletrônicos, ao receberem incentivos, podem expandir suas iniciativas, gerar empregos e fortalecer a reciclagem (GHISOLFI; DINIZ CHAVES; RIBEIRO SIMAN; XAVIER, 2017; GUARNIERI; E SILVA; LEVINO, 2016; SOUZA, 2019).

Garantindo a coleta e reciclagem adequadas de REEE, os subsídios mitigam a degradação ambiental e os riscos à saúde associados ao descarte inadequado. Isso pode resultar em benefícios econômicos a longo prazo, reduzindo custos de saúde e preservando recursos naturais essenciais para atividades futuras (GHISOLFI; DINIZ CHAVES; RIBEIRO SIMAN; XAVIER, 2017; MIHAI; GNONI; MEIDIANA; EZEAH *et al.*, 2019).

Subsídios, incentivos fiscais e financeiros podem impulsionar a coleta de REEE pelo setor formal através de campanhas ou políticas governamentais, incentivando a reciclagem. Com esses subsídios, é possível investir em melhorias no setor de coleta, aumentando a quantidade de REEE reciclados formalmente (LIU; LI; LEONG, 2022).

Analisando o contexto internacional, a implementação de subsídios pode trazer ao Brasil uma redução no impacto ambiental e ganhos econômicos para fabricantes e recicladores (OLIVEIRA; NETO; SILVA; MACHADO SANTOS, 2020). No contexto nacional, existem oportunidades econômicas para cooperativas de catadores, que a legislação brasileira já contempla no sistema formal, prevendo também incentivos fiscais, financeiros e de crédito para a logística reversa (DEMAJOROVIC; AUGUSTO; SOUZA, 2016).

A implementação de incentivos fiscais fortalece o sistema formal, aumentando a atratividade e reduzindo o espaço da atuação do setor informal (ARDI; LEISTEN, 2016). Entretanto, pode-se verificar que a implementação de incentivos em apenas uma frente da logística reversa, não é capaz sozinho de modificar o sistema significativamente, há necessidade do estabelecimento de políticas públicas complementares incidindo na fabricação, no consumo, na educação ambiental, etc. (SANT'ANNA, 2015; LIU; LI; LEONG, 2022).

O método de dinâmica de sistemas, mesmo com restrição de dados, possibilita a representação das interações complexas entre variáveis sociais, ambientais e econômicas, comparando cenários e entendendo os possíveis efeitos das políticas implementadas, indicando possibilidades de melhoria (STERMAN, 2000).

8. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Neste estudo, ao examinar a aplicação de incentivos fiscais e econômicos na logística reversa de resíduos eletroeletrônicos (REEE), comparando as práticas desenvolvidas na China, Europa e Brasil, verificou-se que experiências consolidadas, como as da China e da Europa, evidenciam que políticas bem estruturadas de apoio financeiro são decisivas para impulsionar a coleta e reciclagem formal, ao mesmo tempo em que limitam a atuação de cadeias paralelas não regulamentadas.

Na China, por exemplo, o oferecimento de subsídios aos operadores formais tem contribuído para ampliar sua competitividade, deslocando os recicladores informais devido à diferença nos custos operacionais (FU; ZHONG; CHEN; LIU, 2020).

Embora nossa legislação contemple a possibilidade de adoção de instrumentos fiscais para estimular a logística reversa, tais como os incentivos fiscais e financeiros, a ausência de regulamentação efetiva tem comprometido a eficácia da logística reversa e reciclagem de REEE (DEMAJOROVIC; AUGUSTO; SOUZA, 2016).

Os resultados obtidos com a modelagem desenvolvida nesta dissertação, apontam que a adoção progressiva de incentivos pode gerar avanços importantes no aumento da coleta formal e no controle do descarte inadequado. Contudo, esses incentivos, devem ser implementados de forma ampla, em várias frentes, para que tenham a capacidade para transformar a estrutura do sistema. Eles funcionam como mecanismos de reforço à competitividade do setor regulado, mas não substituem políticas integradas de apoio social e educacional (ARDI; LEISTEN, 2016).

O envolvimento coordenado entre setores públicos e privados, conjuntamente com os consumidores e governo, ao mesmo tempo, e não por medidas segregadas, é apontado como condição essencial para que os instrumentos econômicos (incentivos fiscais, econômicos, subsídios) resultem em impactos concretos na redução dos danos ambientais (LIU; LI; LEONG, 2022).

A adoção da dinâmica de sistemas mostrou-se especialmente útil para compreender o comportamento do sistema em cenários de incerteza e para simular os efeitos de diferentes arranjos institucionais e financeiros ao longo do tempo.

O investimento em campanhas de conscientização, uma vez que a participação do consumidor é determinante para o sucesso dos sistemas de coleta, influencia diretamente os resultados obtidos (ROMAGNOLI; DE BRUIJNE; DRAPEAU; OLLION *et al.*, 2022). Sistemas resilientes dependem de modelos que acompanhem suas transformações (MEADOWS,

2009). Como perspectiva para estudos futuros, sugere-se aprofundar a análise sobre a relação entre logística reversa e economia circular, avaliando o papel dos incentivos em várias frentes, uma delas relativa ao descarte e retenção pelo consumidor, no design ecológico e na remanufatura.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABALANSA, S.; EL MAHRAD, B.; ICELY, J.; NEWTON, A. Electronic Waste, an Environmental Problem Exported to Developing Countries: The GOOD, the BAD and the UGLY. 13, n. 9, p. 5302, 2021.
- ALÓS, J. d. S.; MILAN, G. S.; EBERLE, L. The Reverse Logistics operation of solid waste pos-consumption of electronic products for domestic use in Brazil. **Revista de Administração da UFSM**, 16, 2023.
- ANDERSEN, T. A comparative study of national variations of the European WEEE directive: manufacturer's view. **Environ Sci Pollut Res Int**, 29, n. 14, p. 19920-19939, Mar 2022.
- ANDERSEN, T.; JÆGER, B.; MISHRA, A. Circularity in Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE) Directive. Comparison of a Manufacturer's Danish and Norwegian Operations. **Sustainability (Switzerland)**, 12, n. 13, p. 5236, 2020.
- APPLE. **Trade in. Upgrade. Save. It's a win win win.** 2024. Disponível em: <https://www.apple.com/ie/shop/trade-in>. Acesso em: 3 fev. 2024.
- ARDI, R.; LEISTEN, R. Assessing the role of informal sector in WEEE management systems: A System Dynamics approach. **Waste Manag**, 57, p. 3-16, Nov 2016.
- AUDITORS, E. C. O. **Review No 4 – EU actions and existing challenges on electronic waste.** Luxembourg. 2021.
- BALDE, C. P.; KUEHR, R.; YAMAMOTO, T.; MCDONALD, R. *et al.* Global e-waste monitor 2024. International Telecommunication Union (ITU) and United Nations Institute for Training and Research (UNITAR) 2024.
- BARROS, R. T. d. V.; VARELLA, C. V. S.; COUTO, R. d. C. A.; DUARTE, S. F. Análise da situação de gestão de resíduos eletroeletrônicos em oficinas de reparação de equipamentos em Belo Horizonte (Brasil). In: VI Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental, 2015, Porto Alegre/RS. IBEAS – Instituto Brasileiro de Estudos Ambientais.
- BESIOU, M.; GEORGIADIS, P.; VAN WASSENHOVE, L. N. Official recycling and scavengers: Symbiotic or conflicting? **J European journal of operational research**, 218, n. 2, p. 563-576, 2012.
- BRASIL. **Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos.** 2010. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm. Acesso em: 8 fev. 2024.
- BRASIL. **DECRETO Nº 10.240, DE 12 DE FEVEREIRO DE 2020. Regulamenta a implementação de sistema de Logística Reversa.** 2020. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2020/decreto/d10240.htm. Acesso em: 6 fev. 2024.
- BRASIL. **Lei nº 14.260, de 8 de dezembro de 2021. Estabelece incentivos à indústria da reciclagem; e cria o Fundo de Apoio para Ações Voltadas à Reciclagem (Favorecycle) e**

Fundos de In-vestimentos para Projetos de Reciclagem (ProRecicle). 2021a. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2021/lei/l14260.htm. Acesso em: 11 abr. 2025.

BRASIL. Supremo Tribunal Federal. É inconstitucional regra que veda a apuração de créditos de PIS/Cofins na aquisição de insumos recicláveis. Notícias STF, Brasília, DF, 11 jun. 2021. 2021b. Disponível em: <https://noticias.stf.jus.br/postsnoticias/e-inconstitucional-regra-que-veda-a-apuracao-de-creditos-de-pis-cofins-na-aquisicao-de-insumos-recicla-veis/>. Acesso em: 13 abr. 2025.

BRASIL. Decreto nº 10.936, de 12 de janeiro de 2022. Regulamenta a Lei nº 12.305, de 2010. 2022. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2022/decreto/d10936.htm. Acesso em: 7 fev. 2024.

BRASIL. Decreto nº 12.106, de 10 de julho de 2024. Regulamenta o incentivo fiscal à cadeia produtiva da reciclagem estabelecido na Lei nº 14.260, de 8 de dezembro de 2021. Brasília, 2024. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2023-2026/2024/decreto/D12106.htm. Acesso em: 11 abr. 2025.

BRITO, J. L. R. d.; RUIZ, M. S.; KNISS, C. T.; SANTOS, M. R. d. Reverse remanufacturing of electrical and electronic equipment and the circular economy. **REGE Revista de Gestão**, 29, n. 4, p. 380-394, 12/06 2022.

CAI, Y.-J.; CHOI, T.-M. Extended Producer Responsibility: A Systematic Review and Innovative Proposals for Improving Sustainability. **IEEE Transactions on Engineering Management**, 04/26 2019.

CHANG, X.; WU, J.; LI, T.; FAN, T.-J. The joint tax-subsidy mechanism incorporating extended producer responsibility in a manufacturing-recycling system. **Journal of Cleaner Production**, 210, p. 821-836, 11/01 2018.

CHU, T.; ZHONG, Y.; JIA, W. Incorporating self-employed maintainers into WEEE formal recycling system: A system dynamic approach. **J Environ Manage**, 345, p. 118777, Nov 1 2023.

COMMISSION, E.; ENVIRONMENT, D.; EUROPE, D. Joint workshop on “all WEEE flows”: how can we improve information as regards collection of waste electrical and electronic equipment (WEEE) through all routes? **Brussels: European Commission**, 2017

DE OLIVEIRA, C. R.; BERNARDES, A. M.; GERBASE, A. E. Collection and recycling of electronic scrap: a worldwide overview and comparison with the Brazilian situation. **Waste Manag**, 32, n. 8, p. 1592-1610, Aug 2012.

DEMAJOROVIC, J.; AUGUSTO, E. E. F.; SOUZA, M. T. S. D. Reverse logistics of E-Waste in developing countries: Challenges and prospects for the Brazilian model. **Ambiente & Sociedade**, 19, 2016.

DIAS, P. R.; CENCI, M. P.; BERNARDES, A. M.; HUDA, N. What drives WEEE recycling? A comparative study concerning legislation, collection and recycling. **Waste Manag Res**, 40, n. 10, p. 1527-1538, Oct 2022.

DIESTE, M.; VIAGI, A. F.; PANIZZOLO, R.; DOS SANTOS, R. F. *et al.*, 2018, **Reverse logistics models for the collection of Waste Electrical and Electronic Equipment: the Brazilian case**. Ieee. 1-8.

ECHEGARAY, F.; HANSSTEIN, F. Assessing the intention-behavior gap in electronic waste recycling: The case of Brazil. **Journal of Cleaner Production**, 142, p. 180-190, 05/01 2016.

ELETRODOMÉSTICOS, ABREE - Associação Brasileira de Reciclagem de Eletroeletrônicos e Eletrodomésticos. **Relatório anual de desempenho do Sistema de Logística Reversa (SLR) de eletroeletrônicos e seus componentes de uso doméstico**. 2022. Disponível em: <https://abree.org.br/relatorio-anual>. Acesso em: 13 abr. 2025.

ELETRON, G. **Radar Pesquisas. Eletrônicos no Brasil**. 2021. Disponível em: https://greeneletron.org.br/download/RELATORIO_DE_DADOS.pdf. Acesso em: 12 abr. 2025.

ELETRON, G. **RADAR PESQUISAS. Resíduos eletrônicos no Brasil**. 2023. Disponível em: https://greeneletron.org.br/download/RELATORIO_DADOS_2023.pdf. Acesso em: 12 abr. 2025.

ELETROS, Associação Nacional de fabricantes de produtos eletroeletrônicos. **Indicadores Eletros**. 2024. Disponível em: <https://eletros.org.br/indicadoreseletros/>. Acesso em: 26 mar. 2025.

ELETROTÉCNICA, Comité Europeu de Normalização. **About CENELEC**. 2024. Disponível em: <https://www.cencenelec.eu/about-cenelec/>. Acesso em: 13 abr. 2025.

ELIA, V.; GNONI, M. G.; TORNESE, F. Improving logistic efficiency of WEEE collection through dynamic scheduling using simulation modeling. **Waste Manag**, 72, p. 78-86, Feb 2018.

EUGÊNIA, E.; AUGUSTO, F.; DEMAJOROVIC, J. A perspectiva dos atores sociais envolvidos na discussão do Acordo Setorial de Equipamentos Eletroeletrônicos no Estado de São Paulo. *In*: Encontro Internacional sobre Gestão Empresarial e Meio Ambiente, 2014, São Paulo.

EUROPE. **IVA - Imposto sobre o Valor Acrescentado**. 2024. Disponível em: https://europa.eu/youreurope/citizens/consumers/shopping/vat/index_pt.htm. Acesso em: 12 abr. 2025.

EUROPEIA, U. Diretiva 2002/96/CE do Parlamento Europeu e do Conselho, de 27 de janeiro de 2003. Relativa aos resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos (REEE). **Jornal Oficial das Comunidades Europeias**, 2003.

EUROSTAT. **Welcome to Eurostat - The home of high-quality statistics and data on Europe**. 2024. Disponível em: <https://ec.europa.eu/eurostat/web/main/home>. Acesso em: 13 abr. 2025.

FAVOT, M. Why manufacturers of electrical and electronic equipment (EEE) create producer responsibility organizations (PROS) to comply with the WEEE directive? the case of ERP Italia SRL with focus on costs. **Environmental engineering and management journal**, 14, n. 7, p. 1595-1602, 07/31 2015.

FAVOT, M.; GRASSETTI, L.; MASSARUTTO, A.; VEIT, R. Regulation and competition in the extended producer responsibility models: Results in the WEEE sector in Europe. **Waste Manag**, 145, p. 60-71, May 15 2022.

FORRESTER, J. W. Industrial dynamics. **Journal of the Operational Research Society**, 48, n. 10, p. 1037-1041, 1997.

FU, J.; ZHONG, J.; CHEN, D.; LIU, Q. Urban environmental governance, government intervention, and optimal strategies: A perspective on electronic waste management in China. **Resources, Conservation and Recycling**, 154, p. 104547, 03/01 2020.

GEORGIADIS, P.; BESIOU, M. Environmental and economical sustainability of WEEE closed-loop supply chains with recycling: A system dynamics analysis. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, 47, p. 475-493, 03/01 2009.

GEORGIADIS, P.; VLACHOS, D. The effect of environmental parameters on product recovery. **European Journal of Operational Research**, 157, n. 2, p. 449-464, 09/01 2004.

GHISOLFI, V.; DINIZ CHAVES, G. L.; RIBEIRO SIMAN, R.; XAVIER, L. H. System dynamics applied to closed loop supply chains of desktops and laptops in Brazil: A perspective for social inclusion of waste pickers. **Waste Manag**, 60, p. 14-31, Feb 2017.

GIESE, E. C.; XAVIER, L. H. d. S. M.; OTTONI, M. d. S. O.; ARAÚJO, R. A. d. Cooperatives and e-waste management in Brazil. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI 2022.

GUARNIERI, P.; E SILVA, L. C.; LEVINO, N. A. Analysis of electronic waste reverse logistics decisions using Strategic Options Development Analysis methodology: A Brazilian case. **Journal of Cleaner Production**, 133, p. 1105-1117, 2016/10/01/ 2016.

GUZZO, D.; RODRIGUES, V. P.; PIGOSSO, D. C. A.; MASCARENHAS, J. Analysis of national policies for Circular Economy transitions: Modelling and simulating the Brazilian industrial agreement for electrical and electronic equipment. **Waste Manag**, 138, p. 59-74, Feb 1 2022.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Indicadores conjunturais da indústria: produção**. Rio de Janeiro, 31, 2024.

IGNATUSCHTSCHENKO, E. E-waste management in China: bridging the formal and informal sectors. **Journal of Chinese Governance**, 2, n. 4, p. 385-410, 09/22 2017.

INDUSTRIAL, A. B. d. D. Logística reversa de equipamentos eletroeletrônicos: análise de viabilidade técnica e econômica. ABDI Brasília 2013.

JARROW, R.; MAKSIMOVIC, V.; ZIEMBA, W. Handbooks in Operations Research and Management Science. **Journal of The Operational Research Society**, 9, p. 1042-1043, 10/01 1997.

LANE, D.; STERMAN, J. Jay Wright Forrester. *In: SCIENCE., I. S. i. O. R. a. M. (Ed.)*. Springer: New York LLC, 2011. v. 147, p. 363-386.

LI, J.; DONG, Q.; LIU, L.; SONG, Q. Measuring treatment costs of typical waste electrical and electronic equipment: A pre-research for Chinese policy making. **Waste Manag**, 57, p. 36-45, Nov 2016.

LINDHQVIST, T. **Extended producer responsibility in cleaner production: Policy principle to promote environmental improvements of product systems**. Lund University, 2000. 9188902137.

LIU, G.; XU, Y.; TIAN, T.; WANG, T. *et al.* The impacts of China's fund policy on waste electrical and electronic equipment utilization and the perspectives on multi-objective optimization. **Journal of Cleaner Production**, p. 119582, 12/06 2019.

LIU, H.; LEI, M.; DENG, H.; LEONG, G. *et al.* A dual channel, quality-based price competition model for the WEEE recycling market with government subsidy. **Omega (United Kingdom)**, 59, p. 290-302, 07/01 2015.

LIU, H.; LI, T.; LEONG, G. Choice of competitive strategy of formal and informal sectors in recycling WEEE with fund subsidies: Service or price? **Journal of Cleaner Production**, 372, p. 133717, 08/01 2022.

LIU, Z.; TANG, J.; LI, B.-y.; WANG, Z. Trade-off between remanufacturing and recycling of WEEE and the environmental implication under the Chinese Fund Policy. **Journal of Cleaner Production**, 167, p. 97-109, 08/01 2017.

LOPES DOS SANTOS, K. The recycling of e-waste in the Industrialised Global South: the case of Sao Paulo Macrometropolis. **International Journal of Urban Sustainable Development**, 13, n. 1, p. 56-69, 2021/01/02 2021.

MATTA, J. L. d. F. d.; ANTUNES, P. d. B. **Habemus reforma tributária, mas e o ICMS ecológico?** 2023. Disponível em: <https://www.conjur.com.br/2023-dez-04/habemus-reforma-tributaria-mas-e-o-icms-ecologico/>. Acesso em: 13 abr. 2025.

MAYERS, K.; BUTLER, S. Producer Responsibility Organizations Development and Operations A Case Study. **Journal of Industrial Ecology**, 17, n. 2, p. 277-289, 04/01 2013.

MEADOWS, D. H. **Thinking in Systems: A primer**. London: Sustainability Institute, 2009. 978-1-84407-726-7.

MICHEAUX, H.; AGGERI, F. Eco-modulation as a driver for eco-design: A dynamic view of the French collective EPR scheme. **Journal of Cleaner Production**, 289, 12/01 2020.

MIGLIANO, J.; DEMAJOROVIC, J.; XAVIER, L. H. Shared responsibility and reverse logistics systems for e-waste in Brazil. **Journal of Operations and Supply Chain Management**, 7, p. 91, 12/26 2014.

MIHAI, F.-C.; GNONI, M.-G.; MEIDIANA, C.; EZEAH, C. *et al.* Chapter 1 - Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE): Flows, Quantities, and Management—A Global Scenario. *In*: PRASAD, M. N. V. e VITHANAGE, M. (Ed.). **Electronic Waste Management and Treatment Technology**: Butterworth-Heinemann, 2019. p. 1-34.

NGUYEN, H. T. T.; LEE, C.-H.; HUNG, R.-J. Willingness of end users to pay for e-waste recycling **J Global Journal of Environmental Science and Management**, 7, n. 1, p. 47-58, 2021.

NOGUEIRA ZON, J. L.; JACOBSEN LEOPOLDINO, C.; YAMANE, L. H.; RIBEIRO SIMAN, R. Waste pickers organizations and municipal selective waste collection: Sustainability indicators. **Waste Manag**, 118, p. 219-231, Dec 2020.

OECD. **Extended producer responsibility: a guidance manual for governments**. 2001. Disponível em: <https://www.oecd.org/env/tools-evaluation/extendedproducerresponsibility.htm>. Acesso em: 13 abr. 2025.

OECD. **Extended Producer Responsibility: updated guidance for efficient waste management**. 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1787/9789264256385-en>. Acesso em: 13 abr. 2025.

OLIVEIRA, J.; NETO, J.; SILVA, M.; MACHADO SANTOS, S. E-Waste Mistakenly Disposed of as Recyclable Waste: A Case Study from Brazil. **CLEAN - Soil Air Water**, 09/11 2020.

OLIVEIRA, T. S. d.; VALIM, B. F. d. C. A. Tributação ambiental: a incorporação do meio ambiente na reforma do sistema tributário nacional. **Reforma Tributária IPEA-OAB/DF**, 2018.

ORGANISATION, W. **WEEELABEX Conformity & Verification**. 2024. Disponível em: <https://www.weeelabex.org/weeelabex-conformity-verification/>. Acesso em: 13 abr. 2025.

PARTNERSHIP, G. E.-W. S. **Global E-waste Statistics Partnership**. 2024. Disponível em: <https://globalewaste.org/>. Acesso em: 22 mai. 2024.

PATIL, R. A.; RAMAKRISHNA, S. A comprehensive analysis of e-waste legislation worldwide. **Environ Sci Pollut Res Int**, 27, n. 13, p. 14412-14431, May 2020.

PUTRI, N.; KUSUMASTUTI, R. Reverse Logistics Analysis on Household Electronic Waste Management Using System Dynamics Simulation Approach. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, 940, p. 012025, 12/01 2021.

RODRIGUES, A. C.; BOSCOV, M. E. G.; GÜNTHER, W. M. R. Domestic flow of e-waste in São Paulo, Brazil: Characterization to support public policies. **Waste Manag**, 102, p. 474-485, Feb 1 2020.

RODRÍGUEZ, L.-A.; ESCALANTE, E. The impact of waste of electrical and electronic equipment public police in Latin America: analysis of the physical, economical, and information flow. *In: STUDIES, H. o. E. W. M. I. B. P. a. C. (Ed.).* 2020. p. 397-419.

ROMAGNOLI, V.; DE BRUIJNE, E.; DRAPEAU, P.; OLLION, L. *et al.* **Study on options for return schemes of mobile phones, tablets and other small electrical and electronic equipment in the EU.** Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2022. 9276534180.

SALHOFER, S. E-Waste Collection and Treatment Options: A Comparison of Approaches in Europe, China and Vietnam. *In: CHEMISTRY, H. o. E. (Ed.).* Springer Verlag, 2017. v. 63, p. 227.

SALHOFER, S.; STEUER, B.; RAMUSCH, R.; BEIGL, P. WEEE management in Europe and China - A comparison. **Waste Manag**, 57, p. 27-35, Nov 2016.

SANDER, K.; SCHILLING, S.; TOJO, N.; VAN ROSSEM, C. *et al.* **The producer responsibility principle of the WEEE directive.** p. 2007. 2007.

SANT'ANNA, L. **Logística reversa de resíduos eletroeletrônicos no Brasil e no mundo: uma revisão sistemática.** 2015. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/277004127>. Acesso em: 13 abr. 2025.

SCHEINBERG, A.; NESIĆ, J.; SAVAIN, R.; LUPPI, P. *et al.* From collision to collaboration - Integrating informal recyclers and re-use operators in Europe: A review. **Waste Manag Res**, 34, n. 9, p. 820-839, Sep 2016.

SEYRING, N.; KLING, M.; WEIßENBACHER, J.; HESTIN, M. *et al.* **Study on WEEE recovery targets, preparation for re-use targets and on the method for calculation of the recovery targets: final report.** 2015.

SHIH, H.-S. Policy analysis on recycling fund management for E-waste in Taiwan under uncertainty. **Journal of Cleaner Production**, 143, p. 345-355, February 01, 2017 2017.

SOLER, F. Brasil tem poucos instrumentos de estímulo à cadeia de reciclagem. **O Papel**, São Paulo, Legislação de Resíduos Sólidos, 2023.

SOLER, F. Novos certificados de créditos de logística reversa. **O Papel**, São Paulo, Legislação de Resíduos Sólidos, 2023.

SONG, X.; LU, B.; WU, W. Chapter 13 - Environmental Management of E-waste in China. *In: PRASAD, M. N. V. e VITHANAGE, M. (Ed.).* **Electronic Waste Management and Treatment Technology:** Butterworth-Heinemann, 2019. p. 285-310.

SOUSA, R.; AGANTE, E.; CEREJEIRA, J.; PORTELA, M. EEE fees and the WEEE system - A model of efficiency and income in European countries. **Waste Manag**, 79, p. 770-780, Sep 2018.

SOUZA, R. G. E-waste situation and current practices in Brazil. In: ELSEVIER (Ed.). **Handbook of Electronic Waste Management: International Best Practices and Case Studies**, 2019. p. 377-396.

STERMAN, J. Business Dynamics, System Thinking and Modeling for a Complex World. **Massachusetts Institute of Technology Engineering Systems Division**, 19, 01/01 2000.

STEUER, B. What Institutional Dynamics Guide Waste Electrical and Electronic Equipment Refurbishment and Reuse in Urban China? **Recycling**, 1, n. 2, p. 286-310, 09/08 2016.

STEUER, B. Is China's regulatory system on urban household waste collection effective? An evidence-based analysis on the evolution of formal rules and contravening informal practices. **Journal of Chinese Governance**, 2, n. 4, p. 411-436, 2017.

STEUER, B.; RAMUSCH, R.; PART, F.; SALHOFER, S. Analysis of the value chain and network structure of informal waste recycling in Beijing, China. **Resources, Conservation and Recycling**, 117, p. 137-150, 11/01 2016.

STEUER, B.; RAMUSCH, R.; SALHOFER, S. Can Beijing's informal waste recycling sector survive amidst worsening circumstances? **Resources Conservation and Recycling**, 128, p. 59 – 68, 09/25 2017.

STEUER, B.; RAMUSCH, R.; SALHOFER, S. IS THERE A FUTURE FOR THE INFORMAL RECYCLING SECTOR IN URBAN CHINA? **Detritus**, 4, p. 189-200, 11/09 2018.

SYSTEMS, V. **Vensim Reference Manual**. Harvard, 2023. Disponível em: <https://vensim.com/documentation/>. Acesso em: 13 abr. 2025.

TESAR, M.; KARIGL, B.; LAMPERT, C.; NEUBAUER, C. *et al.* Study on Quality Standards for the Treatment of Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE): Final Report. **European Commission, Directorate-General for Environment: Brussels, Belgium**, 2021.

TONG, X.; WANG, T.; CHEN, Y.; WANG, Y. Towards an inclusive circular economy: Quantifying the spatial flows of e-waste through the informal sector in China. **Resources, Conservation and Recycling**, 135, p. 163-171, 2018/8 2018.

TRENTINELLA, T. **EPR in Brazil and sectoral agreements: Developments and critique**. Osaka University: 2014. 1347-1355 p. 9781845648206.

UNIVERSITY, U. N.; NETHERLANDS, S.; DELOITTE, B. I. S. b.; CENTER, R. E. **Study on collection rates of waste electrical and electronic equipment (WEEE)**. Paris, p. 190. 2014.

VALLE, R.; SOUZA, R. G. d. **Logística reversa: processo a processo**. Rio de Janeiro: Atlas, 2013. 9788522486359. 19 p.

VARGAS, D.; CAMPOS, L.; LUNA, M. Brazil's Formal E-Waste Recycling System: From Disposal to Reverse Manufacturing. **Sustainability**, 16, n. 1, p. 66, 12/20 2023.

- VEENSTRA, A.; WANG, C.; FAN, W.; RU, Y. An analysis of E-waste flows in China. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, 47, n. 5, p. 449-459, 2010/03/01 2010.
- WANG, F.; KUEHR, R.; AHLQUIST, D.; LI, J. E-waste in China: A country report. **Green Paper Series**, 2013.
- WANG, H.; GU, Y.; LI, L.; LIU, T. *et al.* Operating models and development trends in the extended producer responsibility system for waste electrical and electronic equipment. **Resources, Conservation and Recycling**, 127, p. 159-167, 2017/12/01/ 2017.
- WANG, J.; LI, W.; MISHIMA, N.; ADACHI, T. Formalisation of informal collectors under a dual-recycling channel: A game theoretic approach. **Waste Management and Research**, 38, n. 5, p. 576-587, May 2020.
- WANG, Q.; KONG, L.; LI, J.; LI, B. *et al.* Behavioral Evolutionary Analysis between the Government and Uncertified Recycler in China's E-Waste Recycling Management. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, 17, n. 19, p. 1-15, Oct 2 2020.
- WANG, W.; QU, Y.; LIU, Y.; ZHANG, Y. Understanding the barriers for Internet-based e-waste collection system in China. **Journal of Environmental Planning and Management**, 63, n. 4, p. 1-22, 05/07 2019.
- WANG, Y.; CHANG, X.; CHEN, Z.; ZHONG, Y. *et al.* Impact of Subsidy Policies on Recycling and Remanufacturing Using System Dynamics Methodology: a Case of Auto Parts in China. **Journal of Cleaner Production**, 74, p. 161-171, 07/01 2014.
- WANG, Z.; HUO, J. Do government intervention measures promote e-waste recycling in China? **J Environ Manage**, 342, p. 118138, Sep 15 2023.
- XAVIER, L. H. d. S. M.; OTTONI, M. d. S. O.; SIERPE, R. Projeto Datare: relatório final, novembro 2021. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI 2021.
- YU, L.; HE, W.; LI, G.; HUANG, J. *et al.* The development of WEEE management and effects of the fund policy for subsidizing WEEE treating in China. **Waste Manag**, 34, n. 9, p. 1705-1714, Sep 2014.
- ZHAO, W.; YANG, J. An Effectiveness Assessment of China's WEEE Treatment Fund. **Int J Environ Res Public Health**, 15, n. 5, May 19 2018.
- ZHAO, X.; BAI, X. How to motivate the producers' green innovation in WEEE recycling in China? – An analysis based on evolutionary game theory. **Waste Management**, 122, p. 26-35, 2021/03/01/ 2021.
- ZHAO, Y.; WANG, W.; NI, Y. EPR system based on a reward and punishment mechanism: Producer-led product recycling channels. **Waste Manag**, 103, p. 198-207, Feb 15 2020.

ZHENG, B.; HONG, X. Effects of take-back legislation on pricing and coordination in a closed-loop supply chain. **Journal of Industrial & Management Optimization**, 18, n. 3, p. 1603-1627, 01/01 2021.

ZHENG, R.; HUANG, Z.; WU, Z. Risk control simulation of the closed-loop supply chain of waste electrical and electronic equipment based on system dynamics. **Frontiers in Energy Research**, 10, p. 963211, 08/30 2022.

ANEXOS

Neste anexo estão relacionadas as legislações existentes nos Estados brasileiros, demonstrando a existência de regras específicas sobre a coleta e tratamento dos REEE em alguns locais, enquanto em outros os regramentos se limitam ao tratamento de resíduos sólidos em geral.

Anexo A. Legislações brasileiras estaduais que abordam sobre logística reversa e REEE.

Estados	Capitais	Legislações Estaduais	Diretrizes
Acre	Rio Branco	Baseia-se na Legislação Federal	Não possui legislação Estadual.
Alagoas	Maceió	Lei 7.749/2015	Dispões sobre a Política de Resíduos Sólidos.
Amapá	Macapá	Lei 1.242/2008	Dispões sobre a Política Pública Estadual de Reciclagem de materiais
Amazonas	Manaus	Lei 247/2015	Institui normas e procedimentos para a reciclagem, gerenciamento e destinação final de lixo tecnológico.
Bahia	Salvador	Lei 9.536/2009	Programa de Reuso e Reciclagem de Equipamentos Eletrodomésticos, Eletroeletrônicos e Eletroportáteis
Ceará	Fortaleza	Lei 16.032/2016	Política Estadual de Resíduos Sólidos no âmbito do Estado do Ceará.
Espírito Santo	Vitória	Lei 9.941/2012	Estabelece normas e procedimentos para a coleta seletiva, o gerenciamento e a destinação final do "lixo tecnológico"
Goiás	Goiânia	Lei 21.983/2023	Institui a Política Estadual TI Verde
Maranhão	São Luís	Lei 11.326/2020	Estabelece a obrigatoriedade da implantação de logística reversa no Estado do Maranhão.
Mato Grosso	Cuiabá	Lei 8.876/2008	Dispõe sobre a coleta, reutilização, reciclagem, tratamento e destinação final do lixo tecnológico.
		Decreto 1.336/2022	Institui o Programa de Recondicionamento de Equipamentos Eletrônicos - Programa RECYTEC.
		Lei 2.661/2003	Política Estadual de Reciclagem de Materiais.
Mato Grosso do Sul	Campo Grande	Lei 3.367/2007	Dispões sobre a proibição de instalação e funcionamento de incineradores de lixo.
		Lei 3.970/2010	Institui normas para a reciclagem gerenciamento e destinação final do lixo eletrônico.
		Resolução SEMADE n.º 33/2016	Estabelece diretrizes e procedimentos para análise e aprovação das propostas de Logística Reversa.
Minas Gerais	Belo Horizonte	Lei 13.766/2000	Dispõe sobre a política Estadual de Apoio e incentivo à coleta coletiva de Resíduos Sólidos
		Lei 18.031/2009	Dispõe sobre a Política Estadual de Resíduos Sólidos
Pará	Belém	Baseia-se na Legislação Federal	Não possui legislação Estadual.
Paraíba	João Pessoa	Lei 9.129/2010	Institui normas e procedimentos para a reciclagem, gerenciamento e destinação final de lixo tecnológico.

Estados	Capitais	Legislações Estaduais	Diretrizes
Paraná	Curitiba	Lei 12.493/1999	Estabelece princípios, procedimentos, normas e critérios referentes a geração, acondicionamento, armazenamento, coleta, transporte, tratamento e destinação final dos resíduos sólidos.
		Decreto 4.167/2009	Dispõe sobre a obrigatoriedade da separação seletiva dos resíduos sólidos recicláveis gerados pelos órgãos e entidades da administração pública estadual direta e indireta.
Pernambuco	Recife	Lei 15.084/2013	Dispõe sobre a obrigatoriedade de instalação de coletores de lixo eletrônico pelas empresas que comercializam pilhas, baterias e aparelhos eletrônicos de pequeno porte.
Piauí	Teresina	Baseia-se na Legislação Federal	Não possui legislação Estadual.
Rio de Janeiro	Rio de Janeiro	Lei 9.679/2022	Institui Campanha de Conscientização para o correto descarte de produto eletroeletrônico doméstico.
Rio Grande do Norte	Natal	Lei 10.478/2019	Determina às empresas que comercializam pilhas, baterias e aparelhos eletrônicos de pequeno porte no Estado do Rio Grande do Norte a instalação de coletores de lixo eletrônico
Rio Grande do Sul	Porto Alegre	Lei 11.019/1997	Dispõe sobre o descarte e destinação final de pilhas que contenham mercúrio metálico, lâmpadas fluorescentes, baterias de telefone celular e demais artefatos que contenham metais pesados.
		Decreto 45.554/2008	Regulamenta a Lei Estadual nº 11.019/1997.
Rondônia	Porto Velho	Lei 2.962/2013	Institui normas e procedimentos para a reciclagem e destinação final de eletrodomésticos considerados como lixo tecnológico.
Roraima	Boa Vista	Lei 416/2004	Dispõe sobre a Política Estadual de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos.
Santa Catarina	Florianópolis	Baseia-se na Legislação Federal	Não possui legislação Estadual.
São Paulo	São Paulo	Lei 12.300/2006	Política Estadual de Resíduos Sólidos.
		Decreto 54.645/2009	Regulamentação da Política Estadual de Resíduos Sólidos.
		Lei 17.471/2020	Estabelece a obrigatoriedade da implantação de logística reversa no Município de São Paulo.
Sergipe	Aracaju	Decreto 525/2023	Estabelece as diretrizes para a implementação, a estruturação e a operacionalização do sistema de logística reversa de embalagens e institui o "Sergipe Recicla - Certificado de Crédito de Reciclagem do Estado de Sergipe", em atendimento a Lei 12.305/2010, o Decreto 10.936/2022 e 11.413/2023.
Tocantins	Palmas	Lei 3.614/2019	Institui a Política Estadual de Resíduos Sólidos – PERS.
Distrito Federal	Brasília	Lei Distrital 5.418/14	Define as obrigações de estruturar e implementar sistemas de logística reversa.

Fonte: Elaborado pela Autora.