

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EM GESTÃO E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO DE
SOROCABA

Lizete de Paula Ballerini

Revisão Sistemática da Literatura de Modelos de Otimização para o Planejamento de Redes
de Logística Reversa de Resíduos Eletroeletrônicos

Sorocaba

2026

Lizete de Paula Ballerini

Revisão Sistemática da Literatura de Modelos de Otimização para o Planejamento de Redes
de Logística Reversa de Resíduos Eletroeletrônicos

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção de Sorocaba para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção.

Orientação: Profa. Dra. Eli Angela Vitor Toso

Financiamento: Capes

Sorocaba

2026

Ballerini, Lizete de Paula

Revisão Sistemática da Literatura de Modelos de Otimização para o Planejamento de Redes de Logística Reversa de Resíduos Eletroeletrônicos / Lizete de Paula Ballerini -- 2026.
130f.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de São Carlos, campus Sorocaba, Sorocaba

Orientador (a): Eli Angela Vitor Toso

Banca Examinadora: João Eduardo Azevedo Ramos da Silva, Maristela Oliveira dos Santos

Bibliografia

1. Logística Reversa. 2. REEE. 3. Sustentabilidade. I. Ballerini, Lizete de Paula. II. Título.

Ficha catalográfica desenvolvida pela Secretaria Geral de Informática (SIn)

DADOS FORNECIDOS PELO AUTOR

Bibliotecário responsável: Maria Aparecida de Lourdes Mariano - CRB/8 6979

Lizete de Paula Ballerini

Revisão Sistemática da Literatura de Modelos de Otimização para o Planejamento de Redes
de Logística Reversa de Resíduos Eletroeletrônicos

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção de Sorocaba para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção. Sorocaba, 22 de abril de 2026.

Orientador(a)

Profa. Dra. Eli Angela Vitor Toso

Universidade Federal de São Carlos

Examinador(a)

Profa. Dra. Maristela Oliveira dos Santos

USP

Examinador(a)

Prof. Dr. João Eduardo Azevedo Ramos da Silva

Universidade Federal de São Carlos

RESUMO

BALLERINI, Lizete de Paula. Revisão Sistemática da Literatura de Modelos de Otimização para o Planejamento de Redes de Logística Reversa de Resíduos Eletroeletrônicos. 2026. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Produção – Universidade Federal de São Carlos *campus* Sorocaba, Sorocaba, 2026.

A geração global de resíduos está aumentando rapidamente, em resposta, indústrias e formuladores de políticas públicas estão priorizando iniciativas de economia circular e reciclagem de resíduos para reduzir o impacto ambiental e os custos operacionais. Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos (REEE) estão entre os fluxos de resíduos de crescimento mais rápido, e embora contenham materiais perigosos, também oferecem oportunidades de recuperação de recursos. No entanto, gerenciar REEE pode ser considerado complexo devido à alta capilaridade de pontos de coleta e os desafios da logística de transporte. A literatura sobre modelos de otimização para problemas de planejamento de redes reversas e sistemas de suporte à decisão podem ajudar a resolver esses problemas, melhorando a eficiência e o desempenho ambiental em estruturas de Logística Reversa e Circuito Fechado. Esta dissertação examina modelos de otimização para planejamento de redes de Logística Reversa, analisando como fatores sociais, ambientais e econômicos são considerados na tomada de decisão, como localização de instalações, transporte, gerenciamento de estoque e design de rede. As descobertas revelam que na Logística Reversa de REEE apenas 38% aplicam o sistema de circuito fechado, refletindo suas complexidades logísticas e tecnológicas. A minimização de custos continua sendo o objetivo dominante em 19% dos modelos, mas 60% integram considerações ambientais e 19% adotam uma abordagem de *Triple Bottom Line*, incorporando dimensões econômicas, ambientais e sociais. Apesar do transporte ser um fator crítico no planejamento de redes reversas, 22% dos modelos abordam a seleção de meios de transporte. Essas descobertas destacam a necessidade de abordagens de otimização que integrem tomada de decisão multiobjetivo e estruturas orientadas à sustentabilidade. Ao abordar essas lacunas, esta pesquisa contribui para o fortalecimento da Logística Reversa de REEE, oferecendo subsídios para a construção de sistemas mais eficientes, economicamente viáveis e ambientalmente sustentáveis.

Palavras-chave: logística reversa, CLSC, REEE, sustentabilidade.

ABSTRACT

Global waste generation is rapidly increasing; in response, industries and policymakers are prioritizing circular economy initiatives and waste recycling to reduce environmental impact and operational costs. Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE) is among the fastest-growing waste streams, and while it contains hazardous materials, it also offers opportunities for resource recovery. However, managing WEEE is complex due to the high capillarity of collection points and the challenges of transport logistics. The literature on optimization models for reverse network planning problems and decision support systems can help solve these problems, improving efficiency and environmental performance in Reverse Logistics and Closed Loop structures. This dissertation examines optimization models for Reverse Logistics network planning, analyzing how social, environmental, and economic factors are considered in decision-making, such as facility location, transportation, inventory management, and network design. The findings reveal that in WEEE Reverse Logistics, only 38% apply the closed-loop system, reflecting its logistical and technological complexities. Cost minimization remains the dominant objective in 19% of the models, but 60% integrate environmental considerations and 19% adopt a Triple Bottom Line approach, incorporating economic, environmental, and social dimensions. Despite transportation being a critical factor in reverse logistics planning, 22% of the models address the selection of transportation modes. These findings highlight the need for optimization approaches that integrate multi-objective decision-making and sustainability-oriented frameworks. By addressing these gaps, this research contributes to strengthening WEEE Reverse Logistics, providing support for the construction of more efficient, economically viable, and environmentally sustainable systems.

Keywords: *reverse logistics, CLSC, WEEE, sustainability.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Fluxograma Metodológico da Pesquisa.....	19
Figura 2 - Ciclo da Logística Direta e Reversa de REEE	30
Figura 3 – Organização Nacional Responsável pela Logística Reversa	33
Figura 4 - Empresas recicladoras	38
Figura 5 - Diagrama de Fluxo PRISMA 2020	48
Figura 6 - Publicações por ano	50
Figura 7 - Artigos e citações por países	50
Figura 8 - Rede de colaboração.....	53
Figura 9 - Nuvem de Palavras.....	55
Figura 10 - Dendrograma da classificação.....	57
Figura 11 - Conjunto de palavras por classes.....	58
Figura 12 - Análise de similitude	59
Figura 13 – Camadas da rede e decisões de abertura	66
Figura 14 - Restrições de Capacidade	82
Figura 15 - Restrições Estoque.....	84
Figura 16 - Objetivos	89
Figura 17 - Minimizar Custos	90
Figura 18 - Impactos ambientais	93
Figura 19 - Desempenho social.....	94
Figura 20 - Tipo de dados	97
Figura 21 – Distribuição por Fontes de Incerteza	99
Figura 22 – Soluções utilizadas nos modelos.....	101

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação dos artigos por citações	52
Tabela 2 - Modelos LR e CLSC.....	63
Tabela 3 - Decisões de Abertura em todas as camadas da Rede	67
Tabela 4 - Todas as Camadas da Rede sem decisão de abertura ou localização	69
Tabela 5 - Decisões de Abertura todas as camadas exceto Aterro	70
Tabela 6 - Decisões de Abertura nas camadas iniciais.....	72
Tabela 7 - Decisões de Abertura nas camadas intermediárias	73
Tabela 8 - Classificação das decisões de transporte nos modelos analisados	75
Tabela 9 - Decisões de Estoque.....	78
Tabela 10 - Restrições de Estoque	85
Tabela 11 - Artigos Mono Objetivo	89
Tabela 12 - Artigos Multiobjetivos	92
Tabela 13 - Técnicas de tratamento dos objetivos nos artigos de referência	96
Tabela 14 - Fontes de Incerteza.....	98
Tabela 15 - Métodos de solução heurística nos artigos de referência.	102

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Síntese Desafios e Oportunidades.....	43
--	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- 3R Reutilização, Remanufatura e Recuperação
- ABINEE Associação brasileira da indústria elétrica e eletrônica
- ABNT Associação Brasileira de Normas Técnicas
- ABRADISTI Associação brasileira da distribuição de produtos e serviços de tecnologia da informação
- ABRAMAR Associação Brasileira de Manufatura Reversa
- ABREE Associação Brasileira de Reciclagem de Eletroeletrônicos e Eletrodomésticos
- ABS butadieno, estireno e acrilonitrila
- ASSESPRO Federação das associações das empresas brasileiras de tecnologia da informação
- BID Banco Interamericano de Desenvolvimento
- CCRLR Certificado de Crédito de Reciclagem de Logística Reversa
- CD Centro de Distribuição
- CERE Certificado de Estruturação e Reciclagem de Embalagens em Geral
- CLSC Cadeias de Suprimentos de Circuito Fechado
- COVID-19 Doença do coronavírus 2019
- CRMs Matérias-primas críticas
- CTF-APP e RAPP Cadastro Técnico Federal das Atividades Potencialmente Poluidoras e Utilizadoras de Recursos Ambientais
- DVD Disco Digital Versátil
- EEE Equipamentos Eletroeletrônicos
- EoL Produtos em fim de vida
- EPR Responsabilidade Estendida do Produtor
- ERCC Centro de Coordenação de Reciclagem de Eletrônicos
- IoT Internet das Coisas
- ISO Organização Internacional para Padronização
- LCD Tela de cristal líquido
- LED Diodo Emissor de Luz
- LGPD Lei Geral de Proteção de Dados

LR Logística Reversa

PCR Reciclagem Pós-Consumo

PIR Recuperação Pós-Industrial

Planares Plano Nacional de Resíduos Sólidos

PNLR Programa Nacional de Logística Reversa

PNRS Política Nacional de Resíduos Sólidos

ERP Responsabilidade Estendida do Produtor

RMA Autorização de devolução de material

RSC Responsabilidade Social Corporativa

SINIR Sistema Nacional de Informações sobre a Gestão dos Resíduos Sólidos

SNIS Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento Básico

TBL *Triple Bottom Line* ou Triplo Resultado

UFSCar Universidade Federal de São Carlos

UNEP Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente

VHS Sistema Doméstico de Vídeo

VRP roteamento de veículos

REEE Resíduo de Equipamento Eletroeletrônico

WtE Resíduos para Energia

WtM Resíduos para Materiais

Sumário

1. INTRODUÇÃO	13
2. METODOLOGIA	18
3. LOGÍSTICA REVERSA DE REEE: CONTEXTO, ESTRUTURA E DESAFIOS .	23
3.1. EVOLUÇÃO DO CENÁRIO NORMATIVO INTERNACIONAL	23
3.2. O ARCABOUÇO REGULATÓRIO NO BRASIL	26
3.3. CARACTERIZAÇÃO DA LOGÍSTICA REVERSA NO BRASIL	28
3.3.1. Estrutura do sistema	28
3.3.2. Operação e configuração da rede	31
3.3.3. Desempenho e desafios	41
3.4. O PROBLEMA DE PLANEJAMENTO DA LR DE REEE NO BRASIL	43
4. REVISÃO SISTEMÁTICA DE MODELOS DE OTIMIZAÇÃO PARA LOGÍSTICA REVERSA	46
4.1. CONTEXTUALIZAÇÃO E ESCOPO DA REVISÃO	46
4.2. PROCEDIMENTOS DA REVISÃO SISTEMÁTICA	47
4.3. ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA DA LITERATURA SELECIONADA	49
4.4. ANÁLISE DE CONTEÚDO	56
5. ESTRUTURAS DE MODELAGEM – CARACTERÍSTICAS DO PROBLEMA ...	62
5.1. CARACTERIZAÇÃO DAS REDES	62
5.2. DECISÕES	65
5.2.1. Decisões de localização de instalações	65
5.2.2. Decisões de transporte	74
5.2.3. Decisões de estoque e capacidade	77
5.3. RESTRIÇÕES	81
5.3.1. Restrições de capacidade	82
5.3.2. Restrições de estoque	83
5.4. FUNÇÃO OBJETIVO	88
5.5. TIPO DE DADOS E TRATAMENTO DA INCERTEZA	96
5.6. MÉTODOS DE SOLUÇÃO	100
6. MODELOS PARA PLANEJAMENTO DA LR DE REEE NO BRASIL	103
6.1. MODELOS DIRETAMENTE APLICADOS A REEE	104
6.2. MODELOS DE PAÍSES COM DESAFIOS ESTRUTURAIS SEMELHANTES AO BRASIL	105

6.3. MODELOS ESTRUTURALMENTE ADERENTES AO CONTEXTO BRASILEIRO	
106	
6.4. SÍNTESE	107
7. CONCLUSÃO	109
REFERÊNCIAS	112

1. INTRODUÇÃO

A geração global de resíduos de equipamentos eletroeletrônicos (REEE ou *e-waste*) vem aumentando de forma contínua a cada ano, impulsionada pelo rápido avanço tecnológico, pela popularização de eletrônicos e pelo encurtamento do ciclo de vida dos produtos, fatores que contribuem para um impacto ambiental cada vez mais significativo. Segundo o relatório da Unep (2024) "*Global Waste Management Outlook 2024*" do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente, a quantidade de resíduos sólidos urbanos gerada pode chegar a 3,8 bilhões de toneladas até 2050, sendo que 3% destes resíduos correspondem a REEE, marcando um aumento aproximado de 80% em relação aos níveis de 2020. O mesmo documento aponta custos crescentes neste setor. Em 2020, o custo direto global da gestão de resíduos foi estimado em US\$ 252 bilhões, sendo que com os custos indiretos causados pelo impacto do descarte desses resíduos, o valor total sobe para US\$ 361 bilhões. Sem intervenções, esses custos anuais podem quase dobrar para US\$ 640,3 bilhões até 2050.

Esse crescimento dos REEE traz impactos relevantes para o meio ambiente e a saúde pública. Muitos desses resíduos contêm substâncias potencialmente perigosas ao meio ambiente e à saúde humana, como mercúrio, chumbo e retardantes de chama, que podem contaminar o solo e a água caso não sejam manejados de forma adequada. Por outro lado, esses resíduos também são fontes de materiais recuperáveis, como metais preciosos, plásticos e componentes eletrônicos, que podem ser recuperados e reinseridos nos processos de produção ao longo de toda cadeia de produção. Assim, o gerenciamento eficiente dos REEE se justifica não apenas pela urgência em mitigar seus impactos negativos decorrentes do descarte inadequado, mas também pelas oportunidades que oferecem para evitar o desperdício de recursos valiosos.

Em resposta aos desafios ambientais e à iminente escassez de recursos, têm sido implementadas políticas públicas voltadas para a gestão sustentável de REEE, que incluem legislação específica de logística reversa, programas de coleta seletiva, incentivos à reciclagem e iniciativas que promovem a economia circular (Brasil, 2020). No âmbito empresarial, há uma crescente preocupação em integrar práticas de reaproveitamento e reciclagem em seus processos produtivos, fomentando a reutilização de materiais e a reinserção de componentes recuperados no ciclo de produção (Wang, Y. et al., 2022). A reintegração de produtos no fim de sua vida útil aos ciclos de produção aumenta a eficiência no uso dos recursos e impulsiona o desenvolvimento de economias circulares, promovendo uma gestão mais sustentável dos materiais.

Nesse contexto, a logística reversa (LR) se apresenta como uma ferramenta fundamental para a gestão eficiente dos REEE. A Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) define LR como um instrumento de caráter econômico e social, composto por ações e procedimentos voltados à coleta e ao retorno de resíduos ao setor produtivo, possibilitando seu reaproveitamento em ciclos produtivos ou a destinação final ambientalmente adequada (Brasil, 2010). Essa abordagem inclui ações de coleta, transporte, armazenamento, triagem e classificação dos resíduos, bem como a gestão adequada das unidades de destino. A LR tem como objetivo otimizar os processos logísticos para reduzir custos, minimizar o impacto ambiental e garantir a conformidade com as regulações ambientais.

A aplicação do conceito de logística reversa foi expandida para toda a cadeia de suprimentos, resultando em novos termos como Gestão da Cadeia de Suprimentos Sustentável (*Sustainable Supply Chain Management* - SSCM) e Cadeia de Suprimentos de Circuito Fechado (*Closed-Loop Supply Chain* – CLSC), sendo que neste caso a abordagem busca integrar os fluxos direto (do fornecedor ao consumidor) e reverso (do consumidor ao fornecedor), promovendo uma visão sistêmica em que os produtos retornam ao ciclo produtivo por meio de atividades como remanufatura, reutilização e reciclagem. Estas abordagens são essenciais para apoiar a transição para modelos de economia circular, ao mesmo tempo em que contribuem para a redução de impactos ambientais, o uso eficiente de recursos e a geração de valor econômico (Detwal et al., 2023).

Diante desse cenário, o problema específico considerado neste estudo refere-se ao planejamento de redes de logística reversa (LR), entendido como a definição estruturada da configuração ótima da rede responsável pelo fluxo de retorno dos REEE. Esse problema envolve decisões estratégicas e táticas interdependentes, tais como a localização e dimensionamento de instalações (pontos de coleta, centros de triagem, unidades de remanufatura, reciclagem e disposição final), a definição dos fluxos de transporte entre os diferentes níveis da rede, a alocação de capacidades e a gestão de estoques ao longo do sistema. Adicionalmente, o planejamento dessas redes deve considerar a incerteza associada à quantidade, qualidade e distribuição geográfica dos resíduos retornados, bem como restrições operacionais, econômicas e ambientais. Em modelos de otimização, esse problema frequentemente pode ser formulado como um problema de programação matemática (por exemplo, programação inteira mista), no qual múltiplos objetivos, como minimização de custos, redução de emissões e maximização do nível de serviço, precisam ser simultaneamente considerados, evidenciando a natureza multiobjetivo e complexa do planejamento de redes de LR.

O uso de modelos de otimização e sistemas de suporte à decisão para o planejamento de LR pode apoiar o desenvolvimento de processos sustentáveis, não apenas com o objetivo de minimizar custos operacionais, mas também de reduzir desperdícios, minimizar impactos ambientais e sociais, promovendo a sustentabilidade em todas as suas vertentes (Govindan et al., 2015). Especialmente modelos baseados em abordagens multiobjetivo, tem como principal objetivo apoiar a tomada de decisão em sistemas complexos como os de LR em cadeias de suprimentos abertas e/ou fechadas. Esses modelos permitem equilibrar múltiplos critérios conflitantes, como a minimização de custos, a redução de impactos ambientais e a maximização da eficiência operacional, por meio de análises quantitativas e simulações. A integração de dados e algoritmos de otimização possibilita a identificação de soluções mais sustentáveis e economicamente viáveis, mesmo diante das incertezas e da variabilidade inerentes aos fluxos reversos. Assim, os modelos de otimização tornam-se ferramentas estratégicas para o planejamento de redes logísticas mais resilientes, ambientalmente responsáveis e alinhadas aos princípios da economia circular.

A literatura acadêmica tem acompanhado o movimento de intensificação das preocupações ambientais, com crescente interesse em explorar como modelos de otimização podem contribuir para o aprimoramento de sistemas de logística reversa, (Van Engeland et al., 2020), (Rachih et al., 2019), (Arab, 2022), (Zhang et al., 2024) e (Sar & Ghadimi, 2023). Esses modelos buscam oferecer suporte à tomada de decisão diante de diferentes especificidades e limitações dos sistemas, considerando tanto critérios econômicos quanto socioambientais. O crescente corpo de literatura sobre logística reversa e otimização de cadeia de suprimentos destaca a importância da recuperação eficiente de recursos e gerenciamento de resíduos.

Alguns avanços significativos da literatura sobre modelos de otimização aplicados à logística reversa são apontados por revisões abrangentes que consolidam diferentes vertentes do campo. Estudos como os de Govindan et al. (2017), Van Engeland et al. (2020), Rachih et al. (2019), Arab (2022), Sar e Ghadimi (2023) e Zhang et al. (2024) evidenciam a evolução dos modelos de planejamento de redes de LR tanto em termos estruturais quanto metodológicos. De modo geral, essas revisões destacam: (i) o avanço na modelagem de redes sob incerteza, incorporando diferentes paradigmas decisórios e configurações de rede; (ii) a ampliação do uso de abordagens multiobjetivo, com crescente inclusão de critérios ambientais e sociais, ainda que com predominância de objetivos econômicos; (iii) a adoção de técnicas heurísticas e meta-heurísticas para lidar com a complexidade computacional dos problemas; e (iv) a diversificação dos escopos analíticos, incluindo problemas de roteamento, design de rede e integração com tecnologias emergentes. Ademais, observa-se a aplicação desses modelos em diferentes setores,

como pneus (Banguera et al., 2018), vidro (Devika, Jafarian e Nourbakhsh, 2014), resíduos sólidos urbanos (Govindan, Paam e Abtahi, 2016), baterias (Hoyer, Kieckhäfer e Spengler, 2015) e resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos – REEE (Garg et al., 2015), evidenciando a versatilidade e relevância prática dessas abordagens. Apesar desses avanços, permanece uma lacuna relevante na integração equilibrada das dimensões do Triple Bottom Line, bem como na incorporação consistente de incertezas e aplicações práticas em contextos reais, indicando oportunidades para o desenvolvimento de modelos mais abrangentes e aderentes às demandas contemporâneas da logística reversa.

Assim, diferentemente das revisões anteriores, que tendem a enfatizar aspectos específicos como técnicas de solução, modelagem sob incerteza, abordagens multiobjetivo ou aplicações setoriais de forma agregada, esta pesquisa avança ao propor uma análise integrada e estruturada dos modelos de otimização aplicados ao planejamento de redes de logística reversa. Em particular, o estudo não se limita à classificação metodológica, mas busca examinar de forma sistemática os objetivos de desempenho, a estrutura de modelagem, bem como as decisões (por exemplo, localização, transporte e estoque) e restrições (como capacidade e fluxo) incorporadas nesses modelos, com foco específico nos resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos (REEE). Adicionalmente, diferencia-se por incorporar a caracterização do contexto brasileiro, avaliando em que medida os modelos identificados na literatura apresentam aderência às condições institucionais, regulatórias e operacionais do país. Assim, esta pesquisa pretende abordar uma lacuna crítica ao integrar essas dimensões analíticas de forma conjunta. Especificamente, busca responder à seguinte questão de pesquisa: **Q1: Quais são os principais objetivos, estruturas de modelagem, decisões e restrições considerados nos modelos de otimização aplicados ao planejamento de redes de logística reversa de resíduos eletroeletrônicos na literatura científica, e em que medida esses modelos são aderentes ao contexto brasileiro?**

A partir desta questão de pesquisa, este estudo busca aprimorar a compreensão de como os modelos de otimização são estruturados, quais objetivos eles priorizam e como eles contribuem para a eficiência e sustentabilidade das redes de logística reversa de REEE, e pretende contribuir para o entendimento do sistema de gerenciamento de resíduos sustentáveis e economicamente viáveis que se alinhem com iniciativas globais de economia circular. Os objetivos secundários concentram-se em responder à questão de pesquisa apresentada, resumindo-se em:

- Descrever a regulamentação e histórico sobre REEE.

- Caracterizar as políticas e a estrutura da rede de logística reversa de REEE no Brasil, avaliando as estruturas regulatórias e seu impacto na gestão sustentável de resíduos.
- Caracterizar a estrutura e das operações em quatro empresas brasileiras que operam no setor de reciclagem de REEE, identificando os desafios e práticas encontradas.
- Revisar sistematicamente a literatura sobre modelos de otimização para logística reversa, identificando as principais tendências, metodologias e lacunas no campo.
- Analisar de forma detalhada o conteúdo de artigos selecionados, com foco nos objetivos de otimização abordados em modelos de logística.

O presente trabalho está estruturado em sete capítulos.

O Capítulo 1 apresenta a introdução contendo o contexto, problemática, justificativa, objetivo e estrutura do trabalho.

O Capítulo 2 descreve a metodologia de pesquisa adotada, englobando a pesquisa documental e os protocolos da revisão sistemática.

O Capítulo 3 aborda a problemática do planejamento de redes de logística reversa de resíduos de equipamentos eletroeletrônicos (REEE), examinando as políticas públicas e a estrutura da rede logística no setor. Além disso, apresenta informações disponibilizadas em sites e relatórios anuais de quatro empresas atuantes na reciclagem de eletrônicos no Brasil.

O Capítulo 4 apresenta a aplicação da revisão sistemática da literatura sobre modelos de otimização aplicados ao planejamento de redes de logística reversa. A revisão adota uma abordagem ampla, sem se restringir exclusivamente aos resíduos de equipamentos eletroeletrônicos (REEE), com o objetivo de identificar modelos gerais que possam ser adaptados e aplicados ao planejamento de redes de logística reversa de REEE no contexto brasileiro.

O Capítulo 5 exibe a análise das estruturas de modelagem detalhada dos artigos selecionados e classificados na revisão sistemáticas realizada.

O capítulo 6 analisa a aderência dos modelos de otimização ao contexto brasileiro de logística reversa de REEE, considerando suas especificidades institucionais, regulatórias e operacionais. Para organizar a análise, os estudos são classificados em três grupos: (i) modelos diretamente aplicados a REEE; (ii) modelos desenvolvidos em contextos com desafios semelhantes ao brasileiro; e (iii) modelos estruturalmente aderentes, ainda que não aplicados diretamente ao país, permitindo identificar lacunas e oportunidades de adaptação.

O capítulo 7 apresenta as conclusões da pesquisa, bem como as considerações finais relacionadas às limitações da pesquisa e sugestões de trabalhos futuros na área.

2. METODOLOGIA

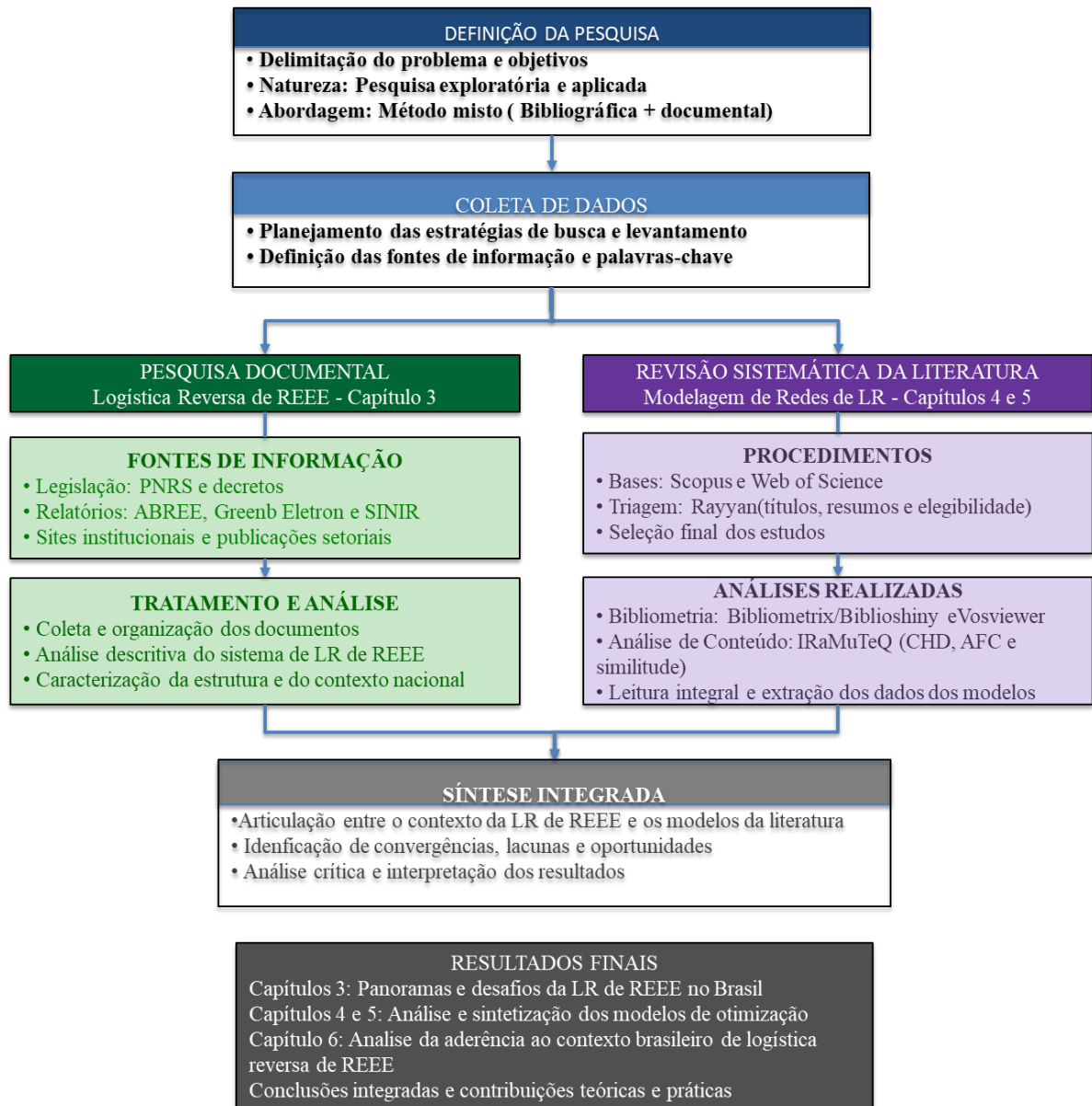
Este estudo foi classificado como pesquisa exploratória, conforme definido por Gil (2017), pois visa expandir o conhecimento sobre modelos de otimização para redes de logística reversa. Ao investigar como esses modelos são estruturados e aplicados, a pesquisa fornece informações sobre seu papel na melhoria da eficiência e sustentabilidade.

O presente estudo caracteriza-se como uma pesquisa de natureza teórico-analítica, fundamentada em uma revisão sistemática da literatura, com orientação aplicada. Embora não envolva intervenção empírica direta, busca gerar implicações práticas ao fornecer subsídios para a melhoria dos sistemas de logística reversa de resíduos eletroeletrônicos no Brasil, contribuindo para a tomada de decisão por gestores públicos e privados.

Quanto aos procedimentos técnicos, trata-se de uma pesquisa bibliográfica e documental, pois utiliza como fonte artigos científicos, relatórios da indústria, sites institucionais e a legislação pertinente, de forma a construir uma compreensão abrangente e sistematizada do tema (Gil, 2017).

Em relação aos procedimentos metodológicos, a pesquisa adotou uma abordagem metodológica quantitativa e qualitativa, combinando procedimentos de revisão sistemática da literatura (RSL) e análise bibliométrica e textual. Como pode ser observado na Figura 1 a investigação foi estruturada de acordo com as diretrizes do protocolo PRISMA 2020 (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*), que orienta a seleção, triagem, elegibilidade e inclusão final dos estudos analisados. A metodologia integra diferentes ferramentas computacionais, *Rayyan*, *VOSviewer*, *Bibliometrix* e *IRaMuTeQ*, utilizadas em etapas complementares, com o intuito de garantir rigor, reprodutibilidade e profundidade analítica na condução da pesquisa.

FIGURA 1- FLUXOGRAMA METODOLÓGICO DA PESQUISA



Fonte: elaborada pela autora.

Essa combinação metodológica aumenta o rigor e a confiabilidade na coleta e análise de dados. De acordo com Pahlevan-Sharif, Mura & Wijesinghe (2019), a análise bibliométrica garante a precisão dos dados mapeando tendências de publicação, redes de citação e impacto da pesquisa, enquanto a revisão sistemática permite uma investigação aprofundada dos desenvolvimentos teóricos e práticos no campo. Juntas, essas abordagens fornecem uma revisão estruturada e abrangente dos modelos de otimização para logística reversa de resíduos eletroeletrônicos.

A coleta dos dados bibliográficos foi realizada em duas bases de dados internacionais de reconhecida relevância científica: *Scopus* e *Web of Science* (WoS). A estratégia de busca utilizou descritores combinados por operadores booleanos, relacionados às temáticas de otimização, logística reversa, sustentabilidade e resíduos de equipamentos eletroeletrônicos (REEE), considerando artigos publicados até o ano de 2024.

Os resultados provenientes de ambas as bases foram exportados em formato .bib, que permite compatibilidade entre os softwares utilizados. Posteriormente, os arquivos foram unificados e padronizados para evitar duplicidades, normalizando nomes de autores, títulos e identificadores (DOI).

A triagem e seleção dos artigos foram realizadas utilizando o software Rayyan, uma plataforma amplamente empregada em revisões sistemáticas (OUZZANI et al.,2016). O *Rayyan* possibilitou a exclusão em duplo cego, assegurando imparcialidade na avaliação inicial dos títulos e resumos. Os critérios de inclusão e exclusão foram previamente definidos, considerando o alinhamento com o escopo temático da pesquisa. Após a triagem automática de duplicatas e a análise manual dos resumos, a amostra final de estudos elegíveis foi consolidada e exportada para as etapas subsequentes de análise bibliométrica e de conteúdo.

A análise bibliométrica foi conduzida com o pacote Bibliometrix e sua interface *Biblioshiny* no ambiente *R Studio* (Aria e Cuccurullo,2017). Essa ferramenta permite explorar e visualizar indicadores de produtividade científica, autoria, fontes e impacto de citações, além de métricas de coocorrência de palavras-chave e evolução temporal das publicações.

Os principais procedimentos incluíram: análise de produtividade anual de publicações; identificação dos autores, instituições e periódicos mais influentes; mapeamento das redes de coautoria e colaboração internacional; análise das palavras-chave mais frequentes e sua coocorrência temática. Essas análises contribuíram para compreender a estrutura intelectual e social da área, bem como a evolução temática dos estudos sobre otimização e logística reversa sustentável.

Para complementar a análise bibliométrica, foi utilizado o software *VOSviewer* (Van Eck e Waltman, 2010), especializado na construção e visualização de mapas de redes científicas. O programa foi empregado para: identificar relações de coautoria entre países, instituições e pesquisadores; gerar mapas de colaboração científica; construir nuvens de palavras-chave a partir da frequência e coocorrência de termos. O *VOSviewer* utiliza algoritmos de mapeamento de similaridade e agrupamento por densidade, permitindo visualizar de forma intuitiva os principais clusters temáticos e centros de influência dentro do campo investigado.

A etapa final da metodologia consistiu na análise de conteúdo dos resumos e textos integrais dos artigos selecionados, com o auxílio do software *IRaMuTeQ (Interface de R pour les Analyses Multidimensionnelles de Textes et de Questionnaires)*, desenvolvido por Ratinaud (2009).

O corpus textual formado pelos resumos, e identificados por cada autor e ano, foi tratado segundo as técnicas da Classificação Hierárquica Descendente (CHD), que identifica e agrupa segmentos de texto que compartilham vocabulário semelhante, revelando assim estruturas temáticas e campos semânticos recorrentes no corpus analisado. O processo parte da leitura e lematização do corpus textual, isto é, a redução das palavras às suas formas básicas (radicais ou lemas), originando o dendrograma de classes que evidencia os principais eixos semânticos da literatura.

Adicionalmente, foram aplicadas:

- a Análise Fatorial de Correspondência (AFC), uma técnica estatística multivariada utilizada para explorar a estrutura de associação entre modalidades de variáveis categóricas, para identificar correlações entre termos e grupos de textos;
- a Análise de Similitude, também conhecida como análise de coocorrência, baseia-se na teoria dos grafos (concebida por Flament, 1962) e tem como propósito identificar as conexões lexicais entre as palavras mais frequentes do corpus. O método representa graficamente as relações de força entre os termos por meio de um grafo de similitude, no qual os nós correspondem às palavras e as arestas indicam a frequência de sua coocorrência em um mesmo segmento textual.

O uso integrado das três técnicas, CHD, AFC e Análise de Similitude, proporciona uma visão abrangente e robusta da estrutura discursiva do corpus. Enquanto a CHD identifica e classifica as principais classes temáticas, a AFC evidencia as relações fatoriais entre elas, e a Análise de Similitude mostra as conexões lexicais que estruturam o discurso. Essa triangulação metodológica assegura maior consistência interpretativa e fortalece a análise qualitativa dos resultados, conforme as diretrizes de Bardin (2011) para análise de conteúdo.

Por fim, após a leitura integral e criteriosa dos artigos selecionados, foi elaborada uma matriz de síntese destinada à análise aprofundada dos modelos de otimização identificados na literatura. Essa etapa possibilitou a organização sistemática e comparável das informações extraídas, contemplando: (i) características gerais dos estudos (ano, autores, país e setor de aplicação); (ii) tipo de sistema analisado (logística reversa ou cadeia de suprimentos de circuito

fechado – CLSC); (iii) configuração da rede e camadas consideradas (coleta, consolidação/classificação, pré-processamento, remanufatura, reciclagem e disposição final); (iv) objetivos de desempenho (econômicos, ambientais, sociais e de serviço), bem como sua estrutura mono ou multiobjetivo; (v) abordagem de modelagem (determinística, estocástica, robusta ou fuzzy); (vi) técnicas de solução empregadas (exatas, heurísticas ou meta-heurísticas); (vii) decisões incorporadas (localização de instalações, fluxos de transporte, dimensionamento de capacidade, gestão de estoques e definição de rotas); (viii) restrições do modelo (capacidade, fluxo, estoque, demanda e operacionais); e (ix) tratamento de incertezas e principais contribuições dos estudos. Essa sistematização permitiu não apenas a identificação de padrões e lacunas na literatura, mas também subsidiou as análises comparativas e a avaliação da aderência dos modelos ao contexto brasileiro.

A abordagem metodológica adotada neste estudo articula, de forma integrada, diferentes procedimentos complementares, abrangendo tanto a caracterização do contexto brasileiro da logística reversa de REEE quanto a análise sistemática da literatura sobre modelos de otimização. A pesquisa documental possibilitou a compreensão das dimensões institucionais, regulatórias e operacionais da rede no país, enquanto a revisão sistemática, conduzida com apoio de ferramentas especializadas, assegurou rigor na seleção, organização e análise dos estudos. A partir disso, foi possível examinar de maneira estruturada os problemas abordados nos modelos, incluindo tipo de rede, tratamento de incertezas e contexto de aplicação, bem como suas estruturas de modelagem, considerando variáveis de decisão, tipos de restrições e objetivos de desempenho. Essa integração metodológica permitiu não apenas consolidar evidências de forma transparente e reproduzível, mas também estabelecer uma base analítica consistente para as etapas subsequentes de comparação, interpretação crítica e avaliação da aderência dos modelos ao contexto brasileiro.

3. LOGÍSTICA REVERSA DE REEE: CONTEXTO, ESTRUTURA E DESAFIOS

A gestão de resíduos de equipamentos eletroeletrônicos (REEE) tem se consolidado como um dos principais desafios ambientais contemporâneos, impulsionada pelo rápido avanço tecnológico e pela obsolescência acelerada dos produtos que resulta no aumento expressivo de geração desses resíduos. Nesse contexto, diversos países passaram a desenvolver marcos regulatórios específicos para disciplinar a gestão de REEE, com destaque para a incorporação do princípio da responsabilidade estendida do produtor e para a estruturação de sistemas de logística reversa.

A evolução desses instrumentos normativos em nível internacional tem influenciado diretamente a formulação de políticas públicas em diferentes países, incluindo o Brasil, cujo arcabouço regulatório foi estruturado com base em diretrizes e experiências consolidadas globalmente. Dessa forma, a compreensão da trajetória da legislação sobre REEE em âmbito mundial constitui um ponto de partida fundamental para a análise do desenvolvimento e das particularidades do sistema brasileiro.

Diante desse cenário, este capítulo tem como objetivo analisar a organização da logística reversa de REEE, partindo da evolução histórica da legislação internacional, avançando para o contexto regulatório brasileiro e, posteriormente, examinando a estrutura da rede logística e as práticas adotadas por empresas do setor.

3.1. EVOLUÇÃO DO CENÁRIO NORMATIVO INTERNACIONAL

As políticas de gerenciamento de REEE evoluíram de forma significativa, com destaque para os países europeus, que lideraram os primeiros esforços regulatórios. A Diretiva REEE da União Europeia, introduzida em 2002 e revisada posteriormente, estabeleceu uma estrutura para a coleta, reciclagem e recuperação de REEE, promovendo o princípio da Responsabilidade Estendida do Produtor (EPR – *Extended Producer Responsibility*) (OECD, 2016).

Outras regiões, como a América do Norte e a Ásia, também desenvolveram regulamentações próprias, embora com níveis variados de abrangência e eficácia. A União Europeia (UE) foi reconhecida como líder global no gerenciamento de REEE por meio de sua Diretiva REEE, que obriga os fabricantes a assumirem a responsabilidade pelo ciclo completo de vida dos produtos, desde a coleta até o descarte ambientalmente adequado (Messmann et al., 2019).

O princípio da Responsabilidade Estendida do Produtor (EPR) tem estimulado práticas de ecodesign, ou seja, o desenvolvimento de produtos projetados para reduzir impactos ambientais ao longo de todo o ciclo de vida, além de favorecer a maior reciclabilidade dos produtos. Nesse sentido, como destacam Lindhqvist (2000), pioneiro na formulação conceitual da EPR, e OECD (2016), a aplicação desse princípio transfere parte da responsabilidade pelo pós-consumo aos fabricantes, incentivando a escolha de materiais e processos que ampliem as possibilidades de reaproveitamento e reciclagem.

Nos Estados Unidos, não há legislação federal sobre REEE. Em vez disso, os estados adotam suas próprias políticas. De acordo com o Centro de Coordenação de Reciclagem de Eletrônicos (*Electronics Recycling Coordination Clearinghouse* - ERCC), 25 estados e o Distrito de Columbia promulgaram leis específicas sobre REEE.

Diversas normas internacionais têm orientado a formulação de políticas nacionais de gestão de resíduos de equipamentos eletroeletrônicos (REEE). Entre elas, destaca-se a Diretiva Europeia 2012/19/EU (EU,2019), revisada a partir da versão inicial de 2003, que constitui um marco regulatório central para os países-membros da União Europeia. Essa diretiva estabelece princípios de responsabilidade estendida do produtor (EPR), metas de coleta, recuperação e reciclagem, além de definir categorias específicas de Equipamentos Eletroeletrônicos.

A Diretiva também fixa metas mínimas de recuperação e reciclagem, que variam de acordo com as categorias de equipamento. Essas metas refletem a complexidade técnica do tratamento de cada grupo e a viabilidade de reaproveitamento de materiais, garantindo que uma fração significativa dos REEE coletados seja efetivamente reinserida no ciclo produtivo.

A definição de metas mínimas definidas pela Diretiva evidencia a heterogeneidade do fluxo de REEE e os diferentes níveis de viabilidade técnica para sua recuperação e reciclagem. Por exemplo, enquanto categorias como grandes eletrodomésticos ou equipamentos de tecnologia da informação e telecomunicações apresentam percentuais elevados de reaproveitamento, refletindo sua maior padronização e valor agregado de materiais, outras categorias, como dispositivos médicos, não possuem metas definidas.

Do ponto de vista crítico, essas diferenças reforçam que o REEE não pode ser tratado como um fluxo homogêneo de resíduos: sua diversidade estrutural, funcional e de riscos demanda estratégias regulatórias e tecnológicas específicas por categoria. Assim, a definição de metas diferenciadas não apenas reconhece as limitações técnicas, mas também evidencia os desafios de implementar um sistema de logística reversa eficiente para todo o espectro de produtos eletroeletrônicos.

Além da Europa, outros países estabeleceram marcos importantes. A Convenção de Basileia (1989) regula o movimento transfronteiriço de resíduos perigosos, incluindo o REEE, com o objetivo de evitar o despejo ilegal em países com pouca infraestrutura de tratamento. Em países em desenvolvimento, como Brasil, Índia e diversas nações africanas, a gestão de REEE enfrenta desafios estruturais e socioeconômicos relevantes. Entre os principais obstáculos, segundo Sultana (2022), estão:

- A falta de infraestrutura adequada para coleta, triagem e reciclagem;
- A predominância do setor informal, que manipula resíduos de forma insegura, com sérios riscos à saúde e ao meio ambiente;
- A dificuldade na implementação de mecanismos de compliance ambiental;
- A limitada conscientização da população sobre o descarte correto de eletrônicos.

Na China, por exemplo, a política de EPR exige uma taxa mínima de coleta de apenas 40%, inferior aos padrões europeus. Ainda assim, ela tem incentivado o reaproveitamento de materiais na cadeia industrial, principalmente por meio de subsídios para empresas recicladoras (Zhang, Y et al., 2024). Já na Índia, embora haja regulamentação formal, a presença de um setor informal predominante limita a eficácia das ações regulatórias (Índia, 2022).

A evolução normativa internacional sobre REEE demonstra um movimento gradual, mas consistente, em direção ao fortalecimento da logística reversa e da responsabilidade compartilhada no ciclo de vida dos produtos. Enquanto a União Europeia consolidou-se como referência ao estruturar políticas abrangentes e metas vinculantes, outras regiões avançam em ritmos desiguais, ora estimuladas por pressões ambientais globais, ora limitadas por barreiras socioeconômicas e institucionais. Essa heterogeneidade evidencia que, embora o arcabouço regulatório internacional tenha alcançado maior maturidade, ainda persiste a necessidade de harmonização de políticas, cooperação transfronteiriça e adoção de mecanismos que integrem sustentabilidade ambiental, viabilidade econômica e justiça social no tratamento dos resíduos eletroeletrônicos. Nesse contexto, torna-se essencial compreender como o Brasil tem incorporado tais referências globais e adaptado suas próprias diretrizes, aspecto que será aprofundado na seção seguinte.

3.2. O ARCABOUÇO REGULATÓRIO NO BRASIL

A construção do arcabouço regulatório brasileiro voltado à gestão de resíduos sólidos, incluindo os resíduos de equipamentos eletroeletrônicos (REEE), ocorreu de forma gradual e progressiva, acompanhando o amadurecimento das políticas ambientais no país. Esse processo reflete tanto a consolidação de princípios de responsabilidade ambiental quanto a incorporação de tendências internacionais, como a Responsabilidade Estendida do Produtor (EPR), em um contexto nacional marcado por desigualdades regionais, limitações estruturais e pela presença expressiva do setor informal na gestão de resíduos.

O primeiro marco relevante foi a Lei nº 9.605/1998 (Brasil, 1998), conhecida como Lei de Crimes Ambientais, que estabeleceu as bases legais para a responsabilização civil, administrativa e penal por danos ao meio ambiente. Embora não trate especificamente dos REEE, essa legislação criou o alicerce jurídico para responsabilizar práticas inadequadas de gestão de resíduos e consolidou os fundamentos da tutela penal ambiental. Entre suas disposições, a lei prevê sanções para pessoas físicas e jurídicas, com penalidades que variam de multas entre R\$ 50,00 e R\$ 50.000.000,00 até reclusão de 1 a 4 anos em casos graves de poluição, além de restrições de direitos, suspensão de atividades e proibição de contratar com o Poder Público. Esses mecanismos tornaram-se a base coercitiva para a efetivação das políticas ambientais posteriores, incluindo as voltadas à logística reversa.

O avanço mais significativo ocorreu com a Lei nº 12.305/2010, que instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) (Brasil, 2010). Essa política introduziu princípios fundamentais como a prevenção e redução na geração de resíduos, a responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos, a logística reversa e a valorização dos resíduos como bens econômicos e sociais. A PNRS estabeleceu deveres claros para fabricantes, importadores, distribuidores, comerciantes, consumidores e para o poder público, promovendo a integração de ações entre os diferentes setores da sociedade.

De acordo com a PNRS, a logística reversa pode ser definida como um instrumento de desenvolvimento econômico e social. Em termos práticos, configura-se como o conjunto de ações, procedimentos e meios destinados a viabilizar a coleta e a restituição dos resíduos sólidos ao setor empresarial, com o objetivo de possibilitar o reaproveitamento desses materiais em seu próprio ciclo produtivo, em outros ciclos produtivos ou, alternativamente, sua destinação final ambientalmente adequada.

A PNRS também criou instrumentos de implementação e monitoramento, como os Planos de Resíduos Sólidos, os incentivos fiscais e financeiros, a educação ambiental e o

Sistema Nacional de Informações sobre a Gestão dos Resíduos Sólidos (SINIR), coordenado pelo Ministério do Meio Ambiente. O SINIR consolidou-se como ferramenta essencial para o registro e acompanhamento das informações sobre geração, transporte e destinação final de resíduos, garantindo transparência e suporte à formulação de políticas públicas mais eficientes.

A operacionalização das diretrizes da PNRS no setor eletroeletrônico ganhou corpo com o Acordo Setorial para a Logística Reversa de Produtos Eletroeletrônicos e seus Componentes, firmado em 31 de outubro de 2019 e regulamentado pelo Decreto nº 10.240, de 13 de fevereiro de 2020 (Brasil, 2020). O acordo visou instituir um sistema nacional de logística reversa de eletroeletrônicos de uso doméstico, promovendo a coleta, o transporte e a destinação final ambientalmente adequada dos equipamentos descartados.

O Decreto nº 10.240/2020 definiu conceitos e responsabilidades fundamentais, como Produtos Eletroeletrônicos, Entidades Gestoras e o Grupo de Acompanhamento de Performance (GAP). As Entidades Gestoras, formadas por representantes de fabricantes, importadores, distribuidores e comerciantes, são responsáveis pela operação do sistema de logística reversa, enquanto o GAP supervisiona o cumprimento das metas e propõe ajustes quando necessário. O decreto ainda previu duas fases de implementação: a Fase 1, até dezembro de 2020, voltada à estruturação do sistema e adesão das empresas, e a Fase 2, a partir de janeiro de 2021, destinada à expansão gradual dos pontos de recebimento e consolidação das metas nacionais de coleta e reciclagem.

A partir desse marco, outras normas complementares reforçaram o arcabouço institucional da PNRS e da logística reversa. O Decreto nº 10.936/2022 (Brasil, 2022) regulamentou a PNRS e integrou suas diretrizes às políticas de saneamento básico e desenvolvimento sustentável. O decreto criou o Programa Nacional de Logística Reversa (PNLR), destinado a ampliar a devolução de resíduos ao setor produtivo, permitindo sua reinserção em ciclos de produção ou sua destinação final adequada. Também reforçou o princípio da responsabilidade compartilhada, integrando o PNLR ao Plano Nacional de Resíduos Sólidos (Planares) e ao SINIR.

Outro avanço importante foi o fortalecimento da inclusão social dos catadores de materiais recicláveis, com a instituição do Programa Coleta Seletiva Cidadã para órgãos da administração pública federal. O decreto 10.936/2022 reconhece os catadores como atores centrais na política de resíduos, garantindo sua prioridade na coleta seletiva e incentivando sua participação em cooperativas e associações. Dessa forma, além do impacto ambiental positivo, promove-se também a justiça social e a geração de renda nas comunidades envolvidas.

No ano seguinte, o Decreto nº 11.413/2023 (Brasil, 2023) introduziu novos instrumentos econômicos e de governança por meio da criação dos Certificados de Crédito de Reciclagem de Logística Reversa (CCRLR), do Certificado de Estruturação e Reciclagem de Embalagens em Geral (CERE) e do Certificado de Crédito de Massa Futura. Esses certificados, de caráter voluntário, têm como objetivo estimular a infraestrutura de reciclagem, aumentar os índices de reaproveitamento de resíduos e promover o desenvolvimento de produtos reciclados ou recicláveis. O decreto 11.413/2023 também determinou que as entidades gestoras sejam cadastradas no SINIR e emitissem notas fiscais eletrônicas para a rastreabilidade dos materiais reciclados, além de estabelecer prazos de 12 meses para adequação das empresas e 24 meses para associações e cooperativas de catadores implementarem o sistema eletrônico de controle de resíduos.

Por fim, o Decreto nº 11.414/2024 (Brasil, 2024) consolidou o enfoque social e inclusivo da política nacional ao instituir o Programa Diogo de Sant'Ana Pró-Catadoras e Pró-Catadores para a Reciclagem Popular e o Comitê Interministerial para Inclusão Socioeconômica de Catadoras e Catadores de Materiais Reutilizáveis e Recicláveis. O programa busca fortalecer cooperativas, ampliar o acesso a financiamento público, melhorar as condições de trabalho e expandir práticas sustentáveis de coleta seletiva, reutilização e educação ambiental. Essa medida reafirma o compromisso do Estado com a sustentabilidade e com a valorização do trabalho dos catadores, reconhecendo-os como agentes fundamentais da economia circular no Brasil.

Assim, a evolução da legislação brasileira sobre resíduos eletroeletrônicos demonstra um amadurecimento institucional contínuo, que parte de um marco jurídico punitivo (Lei nº 9.605/1998), avança para uma estrutura de governança e gestão integrada (Lei nº 12.305/2010 e Decreto nº 10.240/2020) e culmina em políticas mais abrangentes, inclusivas e participativas (Decretos nº 10.936/2022, nº 11.413/2023 e nº 11.414/2024). Esse percurso reflete a consolidação de um modelo nacional de logística reversa e economia circular, alinhado às agendas internacionais de sustentabilidade e desenvolvimento socioambiental.

3.3. CARACTERIZAÇÃO DA LOGÍSTICA REVERSA NO BRASIL

3.3.1. Estrutura do sistema

A partir da análise do histórico regulatório relacionado à logística reversa de resíduos de equipamentos eletroeletrônicos (REEE), foi preciso compreender como essas diretrizes se

materializam na prática, considerando as características estruturais, operacionais e institucionais do sistema no contexto brasileiro.

Como mencionado anteriormente, no contexto da Política Nacional de Resíduos Sólidos (Brasil,2010), a logística reversa pode ser definida como o conjunto de ações, procedimentos e meios destinados a viabilizar a coleta e a destinação ambiental adequada. Nesse contexto, os equipamentos eletroeletrônicos demandam sistemas de LR específicos, dada sua composição heterogênea, volume crescente de geração e elevado potencial de impacto ambiental de resíduos quando não destinados adequadamente.

Conforme estabelecido no acordo setorial, os equipamentos eletroeletrônicos abrangem uma ampla variedade de produtos, classificados no Brasil em categorias como linha branca: refrigeradores e congeladores, fogões, lavadoras de roupa e louça, secadoras e condicionadores de ar; linha marrom: monitores e televisores de tubo, plasma, LCD e LED; aparelhos de DVD e VHS, equipamentos de áudio e filmadoras; linha azul: batedeiras, liquidificadores, ferros elétricos, furadeiras, secadores de cabelo, espremedores de frutas, aspiradores de pó e cafeteiras; e linha verde: computadores desktop e laptops, acessórios de informática, tablets e telefones celulares (BRASIL, 2019). Essa diversidade reforça a necessidade de abordagens diferenciadas para gestão e planejamento de redes de LR.

Ao contrário de outros produtos em fim de vida, o REEE apresenta uma dupla natureza: por um lado, contém substâncias perigosas, como mercúrio, cádmio, chumbo, cromo, retardantes de chama bromados e produtos químicos que agredem a camada de ozônio, como os CFCs , que podem comprometer a saúde humana e o meio ambiente; por outro, incorpora valiosas matérias-primas críticas, entre elas cobre, ouro e terras raras, essenciais para diversos setores industriais e tecnológicos (Islam e Huda, 2018). Isso mostra que a gestão de REEE não se limita ao controle ambiental, mas envolve também a recuperação de valor econômico que pode ocorrer de três formas: reutilização, remanufatura e reciclagem. Ou seja, apesar da obrigatoriedade da logística reversa imposta pela legislação elevar os custos operacionais da cadeia produtiva, em particular para os fabricantes, essas atividades têm potencial de se tornarem economicamente sustentáveis.

De acordo com o Planares-B a logística reversa de equipamentos eletroeletrônicos compreende as seguintes etapas (Brasil, 2022):

1. Descarte nos pontos de entrega (<https://abree.org.br/pontos-de-recebimento>): Após o uso, os consumidores encaminham os equipamentos eletroeletrônicos para pontos de entrega específicos, que podem incluir postos de coleta em estabelecimentos comerciais, centros de recolhimento ou locais designados para esse fim.

2. Triagem e consolidação: Os produtos descartados são recebidos, separados e armazenados de forma adequada, considerando o tipo de material e as condições de conservação, o que permite um encaminhamento mais eficiente para as etapas seguintes.
3. Indústria de reciclagem: Nessa fase, os equipamentos são desmontados e passam por processos de separação de materiais, limpeza, reaproveitamento de componentes e reciclagem, de acordo com as normas ambientais.
4. Matérias-primas secundárias / Outras indústrias: Os materiais recuperados são reintroduzidos no ciclo produtivo como matérias-primas secundárias, retornando às indústrias — inclusive aos fabricantes — e contribuindo para reduzir a dependência de recursos naturais primários.
5. Rejeitos / Disposição final adequada: Resíduos que não podem ser reutilizados, reciclados ou reaproveitados são destinados à disposição final ambientalmente adequada, como aterros sanitários licenciados, de forma a minimizar impactos ambientais e riscos à saúde pública.

Essas etapas da LR de REEE podem ser visualizadas na Figura 2, que apresenta um esquema de rede logística para recuperação de valor que engloba desde o descarte inicial até a reinserção de matérias-primas secundárias na produção. Observe que os fluxos de reuso e remanufatura não estão na Figura 2. Embora a PNRS defina essas etapas como prioritárias na hierarquia de gestão, o fluxo operacional adotado e regulamentado pelo Decreto nº 10.240/2020 prioriza a reciclagem e a recuperação de matérias-primas secundárias, tratando os itens entregues nos pontos de coleta como resíduos para descaracterização.

FIGURA 2 - CICLO DA LOGÍSTICA DIRETA E REVERSA DE REEE



Fonte: adaptado de Planares-B (Brasil, 2022)

No modelo de responsabilidade compartilhada estabelecido pela PNRS todos os agentes, incluindo consumidores, comerciantes, distribuidores, fabricantes, importadores e governo, tem atribuições específicas para operacionalizar a LR de REEE. Cabe aos consumidores a devolução dos produtos e embalagens após o uso em pontos de entrega. Os comerciantes e distribuidores são responsáveis pelo recebimento e armazenagem temporária, enquanto a coleta e envio para reciclagem, reuso ou descarte configura-se de responsabilidade dos fabricantes e importadores. Nesse contexto, tem surgido empresas especializadas em serviços de LR, como transporte, armazenagem e reciclagem, que atuam como parceiras dos produtores no cumprimento das metas legais e na gestão eficiente do retorno dos produtos ao ciclo produtivo.

A partir dessa estrutura conceitual, torna-se necessário compreender como esses elementos se materializam na configuração e operação da rede de logística reversa no contexto brasileiro.

3.3.2. Operação e Configuração da Rede

A operacionalização da rede de logística reversa no Brasil depende, inicialmente, de mecanismos de coordenação e monitoramento que permitam integrar os diferentes agentes envolvidos. Nesse contexto, a articulação entre esses agentes e suas respectivas responsabilidades constitui um dos principais obstáculos para a eficácia do sistema. Para enfrentar esse desafio, foi criado o Sistema Nacional de Informações sobre a Gestão dos Resíduos Sólidos (SINIR), que tem como objetivo padronizar e integrar dados sobre a gestão de resíduos sólidos no Brasil, por meio do monitoramento das ações de governos municipais, estaduais, Distrito Federal e operadores privados.

O SINIR viabiliza a coleta de dados sobre a gestão de resíduos sólidos pelos entes federativos, incluindo o rastreamento do transporte de resíduos por meio do Manifesto de Transporte de Resíduos (MTR) e a consolidação do inventário nacional de resíduos sólidos industriais. A versão mais recente da plataforma, o SINIR+, foi desenvolvida em parceria com o Banco Interamericano de Desenvolvimento (BID). O sistema amplia sua abrangência ao integrar dados de múltiplas fontes, como o próprio SINIR, o Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento Básico (SNIS), o Cadastro Técnico Federal das Atividades Potencialmente Poluidoras e Utilizadoras de Recursos Ambientais (CTF-APP e RAPP) do IBAMA e os dados do IBGE (SINIR+, 2024).

Essa integração permite a geração de visualizações interativas, como mapas, painéis e relatórios, que oferecem uma visão abrangente da gestão de resíduos sólidos em diferentes contextos territoriais e temporais. Além disso, facilita a análise de indicadores e estatísticas, contribuindo para a formulação de políticas públicas mais eficazes e para a identificação de oportunidades de negócio no setor.

Do ponto de vista operacional, o funcionamento da rede envolve um conjunto de etapas interdependentes que estruturam o fluxo dos resíduos ao longo do sistema. Conforme apresentado anteriormente, essas etapas operacionais da logística reversa, descarte pelos consumidores, armazenamento temporário, transporte e destinação final ambientalmente adequada, seguem as diretrizes estabelecidas pelo Decreto nº 10.240/2020 e pela Lei nº 12.305/2010, complementadas por relatórios setoriais da ABNT (2004), ABDI (2013) e ABREE (2024). Essas ações visam garantir o descarte correto dos eletroeletrônicos, reduzir os impactos ambientais negativos e promover a economia circular e a sustentabilidade.

A coordenação dessas atividades operacionais viabiliza-se por arranjos institucionais específicos, que organizam as responsabilidades e a execução do sistema.

A estrutura de governança da logística reversa no Brasil, conforme estabelecida pelo Acordo Setorial (Brasil, 2020) e representada na Figura 3, reflete uma abordagem integrada e compartilhada entre diferentes atores ao longo da cadeia. No topo, o Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima, com apoio de sistemas como o SINIR, exerce o papel de coordenação, monitoramento e regulação. As entidades gestoras, como a ABREE e a Green Eletron, atuam como responsáveis pela operacionalização dos sistemas coletivos, organizando e viabilizando as atividades de coleta, transporte, triagem e destinação ambientalmente adequada dos REEE. Essas entidades são formadas por empresas associadas, que incluem fabricantes e importadores (principais responsáveis legais pelo cumprimento das metas), além de distribuidores e comerciantes, que colaboram na estruturação dos pontos de coleta e na logística de retorno. Alternativamente, esses agentes podem implementar sistemas individuais, desde que atendam às exigências legais. Essa configuração evidencia um modelo baseado na responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos, no qual cada ator desempenha funções complementares para garantir a efetividade da logística reversa no país.

FIGURA 3 – ORGANIZAÇÃO NACIONAL RESPONSÁVEL PELA LOGÍSTICA REVERSA



Fonte: Adaptado de (SINIR+,2024).

Esse modelo integrado e flexível contribui para consolidar uma política nacional de REEE mais eficiente, alinhada aos princípios da responsabilidade compartilhada, da transparência e da sustentabilidade ambiental.

Nesse arranjo institucional, destacam-se as entidades gestoras responsáveis pela implementação e articulação das operações logísticas em escala nacional.

A operacionalização da logística reversa de produtos eletroeletrônicos no Brasil envolve uma cadeia complexa e articulada de responsabilidades entre consumidores, comerciantes, fabricantes, importadores, distribuidores e entidades gestoras. A Associação Brasileira de Reciclagem de Eletroeletrônicos e Eletrodomésticos (ABREE), criada em 2011, foi uma das principais entidades gestoras credenciadas conforme o Acordo Setorial e o Decreto nº 10.240/2020. Sua atuação abrange todo o processo logístico, desde a coleta até a destinação final ambientalmente adequada dos resíduos, em conformidade com a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) (BRASIL, 2010).

A Green Eletron, outra entidade gestora credenciada, foi criada em 2016 pela Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica (Abinee). A Green Eletron surgiu como resposta à crescente demanda por soluções organizadas de coleta e tratamento de eletroeletrônicos no fim de sua vida útil, com o objetivo de auxiliar empresas no cumprimento da Lei nº 12.305/2010 (PNRS), por meio de um sistema coletivo de logística reversa eficiente

e seguro. A atuação da Green Eletron abrange 21 estados brasileiros, onde são disponibilizados pontos de coleta para eletroeletrônicos e pilhas, promovendo maior capilaridade do sistema e facilitando o descarte pela população.

A participação no sistema não foi limitada a empresas associadas à ABINEE, sendo aberta também a empresas brasileiras do setor de produção, importação e comercialização de equipamentos elétricos e eletrônicos. Essa abrangência nacional foi um fator decisivo para a eficiência operacional do sistema e para o cumprimento da responsabilidade compartilhada entre consumidores, comerciantes, distribuidores, fabricantes e importadores, conforme estipulado pela PNRS.

A logística reversa desses produtos compreende várias etapas: o descarte correto pelo consumidor em pontos designados; o armazenamento temporário; o transporte para triagem e manufatura reversa; a separação de componentes recicláveis e não recicláveis; e a destinação final adequada. Durante esse processo, os fabricantes e importadores são responsáveis por garantir a reciclagem ou reaproveitamento dos materiais, enquanto os comerciantes e varejistas devem disponibilizar pontos de entrega e repassar os resíduos para a destinação final. Essa dinâmica está ancorada no princípio da responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos, estabelecido pela PNRS (BRASIL, 2010).

As associações representativas do setor eletroeletrônico, como a Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica (ABINEE), a Associação Brasileira da Distribuição de Produtos e Serviços de Tecnologia da Informação (ABRADISTI) e a Federação das Associações das Empresas Brasileiras de Tecnologia da Informação (ASSESPRO), firmaram, juntamente com a entidade gestora Green Eletron e outras organizações do setor, o Acordo Setorial de Logística Reversa de Eletroeletrônicos de Uso Doméstico (Brasil, 2019). Esse acordo foi instituído para operacionalizar o sistema coletivo de logística reversa, estabelecendo responsabilidades compartilhadas entre os diferentes elos da cadeia, fabricantes, importadores, distribuidores e comerciantes, para garantir a destinação ambientalmente correta dos produtos descartados pelos consumidores.

Isso significa que essas empresas se comprometeram a criar um sistema que permita que os produtos sejam devolvidos após o uso pelos consumidores, garantindo que sejam destinados de forma adequada, em conformidade com a Lei no 12.305/2010 sobre gestão de resíduos sólidos.

Dentro desse acordo, cada parte tem responsabilidades específicas. As empresas fabricantes, distribuidoras e importadoras devem aderir ao sistema e contribuir financeiramente para sua sustentabilidade. Isso envolve criar grupos de acompanhamento, estabelecer pontos de

coleta e implementar estratégias de comunicação ambiental para conscientizar os consumidores sobre a importância do descarte correto desses produtos, conforme estabelecido pelo Decreto nº 10.240/2020 e pela Lei nº 12.305/2010 (Brasil, 2010; Brasil, 2020).

Os consumidores, por sua vez, devem separar os produtos e armazená-los de forma adequada antes do descarte, garantindo que dados pessoais sejam removidos dos dispositivos. O descarte deve ocorrer nos pontos de coleta designados pelo sistema de logística reversa.

Esse acordo também estabelece metas progressivas ao longo de cinco anos para a coleta e destinação ambientalmente adequada dos produtos, buscando atingir uma porcentagem específica dos produtos comercializados no mercado interno. Os recursos financeiros para operar esse sistema serão repassados pelas empresas às entidades gestoras, com base na participação de cada empresa no mercado de produtos eletroeletrônicos de uso doméstico, de acordo com o Decreto nº 10.240/2020 (Brasil, 2020).

No nível físico da rede, a infraestrutura de coleta constitui o principal ponto de interface entre o sistema e os consumidores. Essa infraestrutura compõe-se por diferentes tipos de pontos de recebimento de resíduos eletroeletrônicos, que se adaptam às características territoriais e às estratégias operacionais das entidades gestoras. De acordo com os relatórios da Abree (2024) e Green Eletron (2023) os principais modelos incluem:

- Pontos fixos: localizados em lojas de varejo, supermercados, centros de coleta municipais ou privados. Representam o principal canal de acesso urbano ao sistema de logística reversa.
- Pontos de entrega voluntária (PEVs): estruturas em locais acessíveis, onde o consumidor pode depositar voluntariamente seus resíduos. Normalmente são identificados por sinalização específica e operados por entidades gestoras ou parceiros comerciais.
- Pontos itinerantes ou campanhas móveis: ações temporárias realizadas em cidades menores, feiras, escolas ou eventos, com o objetivo de atingir regiões sem cobertura regular. Têm papel fundamental na interiorização da coleta.
- Centros de consolidação e recebimento: unidades operacionais que centralizam resíduos coletados antes do encaminhamento à destinação final.

A definição e localização desses pontos de coleta leva em consideração critérios como densidade populacional, distribuição geográfica de uso dos produtos, capacidade de

financiamento e infraestrutura logística disponível, buscando garantir eficiência operacional e abrangência territorial.

O Decreto nº 10.240/2020 estabelece metas anuais progressivas de coleta e cobertura territorial. Para 2025, a meta nacional foi de 17% de coleta e destinação adequada dos resíduos eletroeletrônicos comercializados. Além disso, a norma define a obrigatoriedade de pontos de coleta em cidades com determinado número de habitantes, alinhando metas quantitativas à presença territorial mínima (BRASIL, 2020). A Instrução Normativa nº 8/2021 (BRASIL, 2021) também reforça a necessidade de cumprimento dessas metas, com destaque para a divulgação dos pontos de coleta ativos, a rastreabilidade dos resíduos e a prestação de contas aos órgãos reguladores.

Após a coleta nos pontos de recebimento, os fluxos de resíduos passam a demandar operações logísticas mais estruturadas, envolvendo transporte e consolidação em diferentes escalas territoriais. A logística de transporte e consolidação constitui uma etapa estratégica e indispensável dentro da cadeia da logística reversa de resíduos de equipamentos eletroeletrônicos (REEE), sendo responsável por conectar as fases de coleta, triagem e destinação final ambientalmente adequada.

No Brasil, existe a predominância de transporte realizado por modal rodoviário, com diferentes estratégias operacionais adotadas conforme a escala e a localização das operações. As entidades gestoras, como a Green Eletron e a Associação Brasileira de Reciclagem de Eletroeletrônicos e Eletrodomésticos (ABREE), adotam diferentes modalidades de frete de acordo com as características regionais e o volume coletado. Em áreas metropolitanas, prevalecem rotas dedicadas regulares, enquanto em regiões de menor densidade populacional são utilizadas operações agregadas ou fracionadas, que otimizam o transporte de volumes reduzidos e dispersos (GREEN ELETRON, 2023; ABREE, 2024).

A eficiência logística tende a ser maior em centros urbanos com grande concentração populacional, pois a proximidade entre os pontos de coleta e o volume elevado de resíduos permitem planejar rotas otimizadas e reduzir custos operacionais. Já nas regiões Norte e Nordeste, onde a geração de resíduos configura-se menor e a distância até os centros de consolidação maior, a operação requer planejamento logístico detalhado, consolidação de cargas menores e, muitas vezes, o uso de fretes compartilhados, o que eleva o custo por tonelada transportada (SINIR+, 2024; ABDI, 2013).

Após a coleta, os resíduos são encaminhados aos centros de triagem e consolidação, onde são realizadas as seguintes etapas operacionais:

- Pesagem e registro dos materiais recebidos no sistema de rastreabilidade;

- Armazenamento temporário em áreas segregadas conforme o tipo de produto;
- Triagem manual e mecânica, separando componentes recicláveis e não recicláveis;
- Descaracterização dos equipamentos, assegurando a inutilização de partes e a conformidade ambiental;
- Agrupamento e preparação dos materiais para envio às unidades de manufatura reversa ou de reciclagem final (BRASIL, 2020; ABREE, 2024).

A localização desses centros segue critérios logísticos, econômicos e ambientais, priorizando estados com maior volume de coleta e melhor infraestrutura rodoviária. (SINIR+, 2024). Os custos relacionados ao transporte e à consolidação dos REEE representam uma das parcelas mais significativas do orçamento operacional da logística reversa. Fatores como volume por rota, distância média, infraestrutura local, comportamento do consumidor e qualidade do material coletado influenciam diretamente a viabilidade econômica e ambiental das operações (GREEN ELETRON, 2023; ABREE, 2024).

A participação em sistemas coletivos de logística reversa, como o operado pela Green Eletron, permite que fabricantes, importadores e distribuidores diluam custos, compartilhem infraestrutura e garantam o cumprimento das metas legais estabelecidas pelo Decreto nº 10.240/2020. Além disso, o modelo coletivo facilita o monitoramento dos fluxos logísticos por meio de ferramentas digitais integradas ao Sistema Nacional de Informações sobre a Gestão dos Resíduos Sólidos (SINIR+), assegurando maior transparência e rastreabilidade das operações (BRASIL, 2020; SINIR+, 2024).

Na etapa final da rede de logística reversa, os resíduos eletroeletrônicos são encaminhados para empresas recicladoras, responsáveis pela recuperação de materiais e reinserção no ciclo produtivo, desempenhando papel fundamental na viabilização da economia circular.

No Brasil, essa etapa operacionaliza-se por um conjunto de empresas especializadas, cuja distribuição geográfica, capacidade tecnológica e modelos operacionais influenciam diretamente a eficiência da rede. O sistema coordenado pelas entidades gestoras conta atualmente com treze empresas de reciclagem de resíduos eletroeletrônicos, das quais a maioria (76,92%) está concentrada nas regiões Sul e Sudeste, sendo sete delas no estado de São Paulo, como pode ser observado na Figura 4. Essa concentração geográfica não decorre de uma decisão estratégica planejada, mas sim de fatores como a maior densidade populacional dessas regiões e a presença de condições mais favoráveis ao desenvolvimento de mercado. Entende-

se a maior demanda potencial por serviços de reciclagem, impulsionada por níveis mais altos de consumo de eletrônicos, renda per capita mais elevada e maior poder aquisitivo da população local, o que tende a gerar maior volume de descarte desses produtos.

FIGURA 4 - EMPRESAS RECICLADORAS



Fonte: elaborado pela autora.

Nota: os dados foram coletados em 2024.

A seguir, são panoramas descritivos das quatro empresas destacadas na Figura 4 e que atuam no estado de São Paulo, principal polo nacional de reciclagem e gestão de resíduos eletroeletrônicos. O objetivo foi ilustrar diferentes modelos operacionais, práticas de gestão adotadas e os principais desafios no contexto da logística reversa de REEE no Brasil. As informações foram obtidas a partir de fontes institucionais e documentos públicos.

O Grupo Ambipar (2025), empresa especializada em soluções ambientais e economia circular, incorporou em 2022 a GM&C Logística Reversa, sediada em São José dos Campos (SP) (GM&C, 2025). A GM&C atua no setor de logística reversa e reciclagem de resíduos eletroeletrônicos desde 2002, antecedendo inclusive a formalização do acordo setorial no

Brasil. Atualmente, a empresa integra a rede da entidade gestora Green Eletron e opera com tecnologias que possibilitam a separação automatizada de materiais, como plásticos, ferro, alumínio, cobre, vidro e outros metais não ferrosos. Alinhada aos princípios da sustentabilidade, a GM&C declara como missão promover um modelo de economia circular por meio da reciclagem controlada e monitorada desses resíduos.

A GM&C (2025) desenvolveu em 2002 o sistema “GM&C Log” via web, que rastreia os produtos da origem até o refino final, permitindo que clientes visualizem online todo o fluxo e sejam emitidos certificados que comprovam a destinação correta. Os equipamentos eletroeletrônicos coletados no modelo B2B (empresas, assistências técnicas, parceiros comerciais) são transportados por frota própria ou terceirizada até os 27 hubs distribuídos em todo o território nacional. Esses centros operam como nós logísticos de consolidação, agrupando e otimizando cargas em direção à unidade de reciclagem central em São José dos Campos (SP). Esse fluxo logístico estruturado visa eficiência operacional, rastreabilidade dos resíduos e redução dos custos de transporte em um país de dimensões continentais.

Desde 2015, a empresa opera com um sistema automatizado de classificação e separação de materiais por meio de esteiras e tecnologia importada da Alemanha — marco importante na modernização de seus processos e uma contribuição relevante ao cenário nacional da reciclagem de eletroeletrônicos. Atualmente, 100 % das matérias-primas recuperadas são encaminhadas a empresas especializadas em refino e reaproveitamento industrial. Os metais nobres, como ouro, prata, paládio e cobre, são enviados à Umicore (Guarulhos/SP), o ferro à Gerdau, enquanto alumínio e cobre são destinados a empresas como FBM Metais; baterias de chumbo-ácido são enviadas à Tamarana (Londrina/PR).

Em outubro de 2024, a empresa implantou uma nova máquina de reciclagem automatizada, capaz de processar integralmente produtos da linha branca, ampliando sua atuação para todas as categorias do setor eletroeletrônico. A empresa informa não praticar remanufatura e destaca o atendimento à Lei Geral de Proteção de Dados (LGPD), descaracterizando todos os equipamentos recebidos, promovendo circularidade e reduzindo a destinação para aterros. Sua planta tem capacidade de processamento de 30 mil toneladas/ano, embora em 2024 a meta para processamento seja de 9 mil toneladas.

A Re-Teck (2025) Brasil, integrante do grupo multinacional Li Tong Group (LTG,2025), estabeleceu-se no município de Indaiatuba (SP) em 2016, com a missão de promover a economia circular por meio da prevenção, remanufatura e reciclagem de equipamentos eletrônicos. A empresa desenvolve soluções de logística reversa para fabricantes,

empresas, governos e consumidores, contemplando reutilização, remanufatura e recuperação de produtos e componentes tecnológicos.

A Re-Teck Brasil (2025) possui certificações reconhecidas internacionalmente, entre as quais se destacam a ISO 9001, ISO 14001, ISO 45001 e o padrão R2v3, além de participar da Associação Brasileira de Manufatura Reversa (ABRAMAR), o que confirma seu alinhamento com as melhores práticas de governança ambiental e circularidade. No plano operacional, suas atividades incluem processamento e reciclagem de equipamentos, segurança e destruição de dados, reparo e separação de peças, bem como gestão e recuperação de ativos.

Na planta de reciclagem, os equipamentos são testados e classificados; estima-se que entre 30% e 40% dos produtos recebidos sejam remanufaturados e reinseridos no mercado secundário, enquanto o restante destina-se para recuperação de matéria-prima útil ou final.

A BrasilReverso (2025) iniciou suas atividades em 2013 e atua no segmento de logística reversa de dispositivos eletrônicos descartáveis, desde a coleta até o tratamento, descaracterização e reciclagem. Seu modelo inclui a extensão da vida útil de equipamentos por meio de testes de funcionamento e avaliação para possível retorno ao cliente antes da reciclagem.

A empresa possui certificação de impacto “B” e emite certificados de “Fabrico Reverso”, que demonstram a quantidade de materiais recuperados. Atua também na desmobilização de equipamentos de telecomunicações e na produção de resina plástica sustentável a partir de resíduos reciclados.

A Sinctronics, centro de inovação em sustentabilidade criado pela Flex Brasil, tem por missão impulsionar a economia circular no setor eletroeletrônico, atuando na gestão de resíduos desde o pós-consumo até a reinserção dos materiais como recursos produtivos. Suas atividades incluem reciclagem de plásticos, desenvolvimento de novos produtos a partir de materiais reciclados e uso de tecnologias para otimização da coleta.

A rede de coleta da Sinctronics abrange mais de 400 pontos fixos distribuídos no país, com apoio de frota terceirizada. Após a coleta, os equipamentos passam por triagem, descaracterização e avaliação, sendo parte remanufaturada e reinserida no mercado, enquanto a maior parcela reciclada, com índices elevados de reaproveitamento de materiais.

A análise das empresas recicladoras permite evidenciar, na prática, como os elementos estruturais e operacionais da logística reversa, definidos no arcabouço regulatório e nas etapas do ciclo reverso, se configuram como uma rede logística composta por múltiplos nós e fluxos. As atividades de coleta, transporte, consolidação e processamento observadas nessas organizações refletem decisões típicas de planejamento de redes, como a localização de

instalações, a definição de capacidades e a alocação de fluxos de resíduos entre os diferentes elos do sistema. Nesse contexto, a organização espacial da infraestrutura, a concentração regional das unidades de reciclagem e a necessidade de consolidação de cargas evidenciam restrições logísticas e econômicas que são centrais na formulação de modelos de otimização aplicados à logística reversa de REEE.

3.3.3. Desempenho e desafios

No setor de eletroeletrônicos, a implementação do sistema de logística reversa no Brasil encontra-se em expansão. Até 2025, estava prevista a instalação de mais de 5.000 pontos de entrega voluntária (PEVs) nos 400 maiores municípios do país, que concentram cerca de 60% da população brasileira, enquanto municípios menores são atendidos por campanhas móveis de coleta (GREEN ELETRON, 2023).

Em termos de resultados, no ano de 2021 foram recolhidas aproximadamente 1.960 toneladas de resíduos eletroeletrônicos, juntamente com a instalação de 4.229 pontos de coleta em todo o país (ABREE, 2024; GREEN ELETRON, 2023), evidenciando avanços na estruturação do sistema e na ampliação da rede de coleta.

Especificamente no âmbito da ABREE, os dados indicam a coleta de cerca de 1.244,94 toneladas no mesmo período. Observa-se forte concentração regional, com predominância expressiva na região Sudeste, responsável por aproximadamente 90,0% do volume coletado, com destaque para o estado de São Paulo, que concentra cerca de 87,1% do total. As regiões Sul e Centro-Oeste apresentam participação intermediária, com cerca de 2,9% e 5,2%, respectivamente, enquanto as regiões Norte e Nordeste registram volumes bastante reduzidos, somando juntas aproximadamente 1,0% do total. Esses resultados evidenciam a distribuição espacial da rede operada pela entidade, marcada por assimetrias regionais associadas à infraestrutura, à densidade populacional e ao grau de consolidação do sistema (ABREE, 2024).

Apesar dos avanços observados, a operacionalização da logística reversa de REEE ainda enfrenta desafios estruturais e comportamentais significativos, dentre os quais se destacam (GHULAM; ABUSHAMMALA, 2023):

- Falta de conscientização do consumidor: o desconhecimento sobre os métodos adequados de descarte resulta em baixa adesão aos programas de coleta e no aumento do volume de resíduos destinados incorretamente a aterros sanitários;

- Complexidade técnica dos resíduos: a gestão abrange uma vasta gama de produtos com diferentes tecnologias e materiais, incluindo substâncias perigosas que exigem manuseio rigoroso;
- Demanda por processos especializados: necessário infraestrutura técnica adequada para desmontagem dos produtos, classificação de componentes e reciclagem eficiente de materiais;
- Gargalos logísticos e custos operacionais: custos de coleta em locais de descarte espacialmente dispersos (próximos dos consumidores) e transporte até centros de triagem e indústrias de reciclagem são bastante elevados.

Dessa forma, a consolidação da logística reversa de REEE no Brasil depende da integração entre regulação, infraestrutura, engajamento social e capacidade tecnológica. Embora haja avanços institucionais e operacionais decorrentes da PNRS e da atuação de entidades gestoras como a ABREE e a Green Eletron, persistem desafios que limitam a expansão e a equidade do sistema. Nesse contexto, o Quadro 1 apresenta uma síntese dos principais desafios e oportunidades associados à implementação e ao aprimoramento da logística reversa de REEE no país (BRASIL, 2010; BRASIL, 2020; ABREE, 2024; GREEN ELETRON, 2023; SINIR+, 2024).

Quadro 1 - Síntese Desafios e Oportunidades na LR no Brasil

Dimensão	Caracterização e desafios	Implicações para o planejamento da rede
Estrutura do sistema	Rede baseada na responsabilidade compartilhada, envolvendo múltiplos agentes e elevada complexidade de coordenação.	Necessidade de integração entre agentes e definição clara de responsabilidades na rede.
Infraestrutura de coleta	PEVs, pontos fixos e campanhas móveis distribuídos de forma desigual no território.	Definição da localização das instalações e expansão da cobertura geográfica.
Logística e transporte	Coleta dispersa e predominância do modal rodoviário, com necessidade de consolidação de cargas.	Otimização de rotas e definição de centros de consolidação para redução de custos.
Distribuição regional	Forte concentração das operações nas regiões mais desenvolvidas (especialmente Sudeste).	Avaliação de cenários regionais e expansão da rede em áreas menos atendidas.
Processamento e capacidade	Recicladoras concentradas geograficamente, com limitações de capacidade e escala.	Dimensionamento das instalações e alocação eficiente dos fluxos de resíduos.
Custos e operação	Elevados custos logísticos e baixa adesão dos consumidores ao sistema.	Minimização de custos e consideração de incertezas na geração/coleta de resíduos.

Fonte: elaborado pela autora

A caracterização da rede de logística reversa de REEE no Brasil evidencia a presença de múltiplos agentes, infraestrutura distribuída e fluxos logísticos interdependentes, além de assimetrias regionais e restrições operacionais que impactam sua eficiência. Nesse contexto, o planejamento dessa rede envolve decisões estratégicas relacionadas à localização de instalações, definição de capacidades e alocação de fluxos de resíduos, sob diferentes limitações logísticas e econômicas. Essas características tornam a logística reversa de REEE um problema típico de otimização de redes, cuja formulação e análise são discutidas na seção seguinte.

3.4. O PROBLEMA DE PLANEJAMENTO DA LR DE REEE NO BRASIL

A caracterização da logística reversa de REEE no Brasil, apresentada na seção anterior, evidencia um sistema composto por múltiplos agentes, infraestrutura distribuída e fluxos logísticos interdependentes, além de assimetrias regionais e restrições operacionais que influenciam seu desempenho. No contexto brasileiro, esse sistema não se configura como uma rede única e centralizada, mas sim como um conjunto de arranjos logísticos descentralizados,

estruturados por entidades gestoras e operadores privados, com diferentes níveis de maturidade, cobertura e capacidade ao longo do território.

Nesse cenário, o planejamento da logística reversa de REEE envolve decisões estratégicas relacionadas à configuração dessas redes, frequentemente regionais ou supra regionais, incluindo a localização de instalações, a definição de capacidades e a alocação de fluxos de resíduos entre os diferentes elos do sistema. Essas decisões devem considerar a heterogeneidade espacial da geração de resíduos, as diferenças de infraestrutura e as práticas operacionais adotadas pelos agentes responsáveis pela implementação da logística reversa.

Do ponto de vista da Pesquisa Operacional, esse problema pode ser formulado como um problema de planejamento de redes logísticas descentralizadas, no qual se busca determinar configurações eficientes para uma ou mais redes inter-relacionadas, capazes de atender à demanda de coleta e processamento de resíduos, respeitando restrições operacionais, tecnológicas e econômicas. No caso da logística reversa de REEE, destacam-se particularidades como a dispersão geográfica da geração dos resíduos, a incerteza associada à quantidade e à qualidade dos materiais coletados, e a necessidade de coordenação entre múltiplos agentes com diferentes responsabilidades.

Essas redes podem ser representadas por conjuntos de nós e arcos, nos quais os nós correspondem aos pontos de coleta, centros de consolidação e unidades de processamento, enquanto os arcos representam os fluxos de transporte entre esses elementos. A formulação do problema envolve, portanto, a definição de quais instalações devem ser utilizadas ou implantadas em cada região, a capacidade associada a essas unidades e a quantidade de fluxo a ser alocada entre os diferentes níveis da rede, considerando possíveis interações entre sistemas operados por diferentes entidades.

Em termos de modelagem, essas decisões são tipicamente estruturadas em problemas de otimização combinatória, frequentemente formulados como modelos de programação linear inteira mista (MILP). Nesses modelos, as variáveis de decisão incluem a abertura de instalações, a alocação de fluxos e o dimensionamento de capacidades, enquanto as restrições asseguram o atendimento da demanda, a conservação de fluxo, as limitações de capacidade e as exigências operacionais do sistema.

A função objetivo pode envolver a minimização dos custos totais — incluindo custos de instalação, transporte e operação — ou a maximização de indicadores de desempenho, como a taxa de coleta e o nível de cobertura geográfica. Em contextos mais abrangentes, modelos multiobjetivo podem ser utilizados para equilibrar critérios econômicos, ambientais e sociais, refletindo a natureza da logística reversa.

Adicionalmente, a formulação do problema pode incorporar diferentes níveis de complexidade, incluindo múltiplos períodos de planejamento, incertezas na geração de resíduos, restrições tecnológicas específicas do processamento de REEE e condicionantes regulatórios associados à PNRS e ao Acordo Setorial. Essas características tornam o problema particularmente desafiador e justificam o uso de abordagens avançadas de otimização.

Dessa forma, a literatura tem explorado diferentes abordagens para o planejamento de redes de logística reversa, incluindo modelos de localização de instalações, alocação de fluxos, dimensionamento de capacidades e formulações integradas. A análise dessas abordagens, com foco nas especificidades da logística reversa de REEE, apresenta-se no capítulo seguinte.

4. REVISÃO SISTEMÁTICA DE MODELOS DE OTIMIZAÇÃO PARA LOGÍSTICA REVERSA

4.1. CONTEXTUALIZAÇÃO E ESCOPO DA REVISÃO

Dada a complexidade do problema de planejamento da logística reversa de resíduos eletroeletrônicos, caracterizado no Capítulo 3, torna-se necessário compreender como a literatura científica tem abordado esse tipo de sistema. Nesse contexto, este capítulo apresenta uma revisão sistemática da literatura com o objetivo de identificar, selecionar e caracterizar estudos que tratam do planejamento e da otimização de redes de logística reversa, com ênfase em resíduos eletroeletrônicos.

A revisão foi conduzida com base no protocolo PRISMA 2020, de forma a garantir transparência, rastreabilidade e rigor metodológico no processo de seleção dos trabalhos. A partir dessa abordagem, busca-se construir um panorama estruturado da produção científica na área, identificando tendências, abordagens metodológicas e características gerais dos estudos analisados.

Diversos trabalhos apresentam revisões da literatura sobre logística reversa sob diferentes perspectivas e contextos. Dentre esses, destaca-se o trabalho pioneiro de Fleischmann et al. (1997), que apresenta uma visão abrangente sobre modelos de gestão da logística reversa, organizados em três focos principais: planejamento de distribuição, controle de estoques e planejamento da produção. Os autores discutem as implicações da reutilização e destacam a necessidade de novas abordagens devido à complexidade da interação entre fluxos diretos e reversos.

Entre os trabalhos posteriores, Aravendan e Panneerselvam (2014) ampliam essa análise ao considerar cadeias de suprimento de circuito fechado, integrando logística direta e reversa. Já Govindan et al. (2017) apresentam uma revisão sistemática abrangente sobre problemas de configuração de redes em cadeias de suprimento, com ênfase na consideração de incertezas. Os autores analisam 170 artigos publicados entre 2000 e 2015, abordando aspectos como estrutura da rede, decisões envolvidas e métodos de tratamento da incerteza, além de destacarem a importância da incorporação de critérios ambientais e sociais nos modelos.

O trabalho de Van Engeland et al. (2020) revisa 207 estudos publicados entre 1995 e 2017, com foco em problemas de configuração de redes de logística reversa em cadeias de suprimento. Os autores analisam modelos mono e multiobjetivo, evidenciando a relevância de integrar critérios econômicos, ambientais e sociais, bem como a necessidade de desenvolvimento de heurísticas para lidar com a complexidade dos modelos. Mais

recentemente, Detwal et al. (2023) apresentam uma revisão sistemática focada na aplicação de metaheurísticas em cadeias de suprimento circulares, analisando 77 estudos e discutindo aspectos como tipos de cadeia, problemas abordados e técnicas de solução.

De forma geral, esses estudos analisaram um número significativo de trabalhos e identificaram diferentes abordagens e técnicas utilizadas na otimização de redes de logística reversa. Observa-se, contudo, que a maioria dos modelos prioriza o desempenho econômico, indicando a necessidade de maior integração de aspectos ambientais e sociais nas formulações propostas, o que reforça a relevância de investigações que considerem múltiplos critérios no planejamento dessas redes.

4.2. PROCEDIMENTOS DA REVISÃO SISTEMÁTICA

Os procedimentos adotados para a condução da revisão sistemática da literatura foram definidos com base no protocolo PRISMA 2020, com o objetivo de garantir transparência, rastreabilidade e rigor metodológico nas etapas de identificação, seleção e análise dos estudos. A revisão foi estruturada em etapas sequenciais, incluindo a definição da estratégia de busca, a aplicação de critérios de inclusão e exclusão e a triagem dos artigos selecionados.

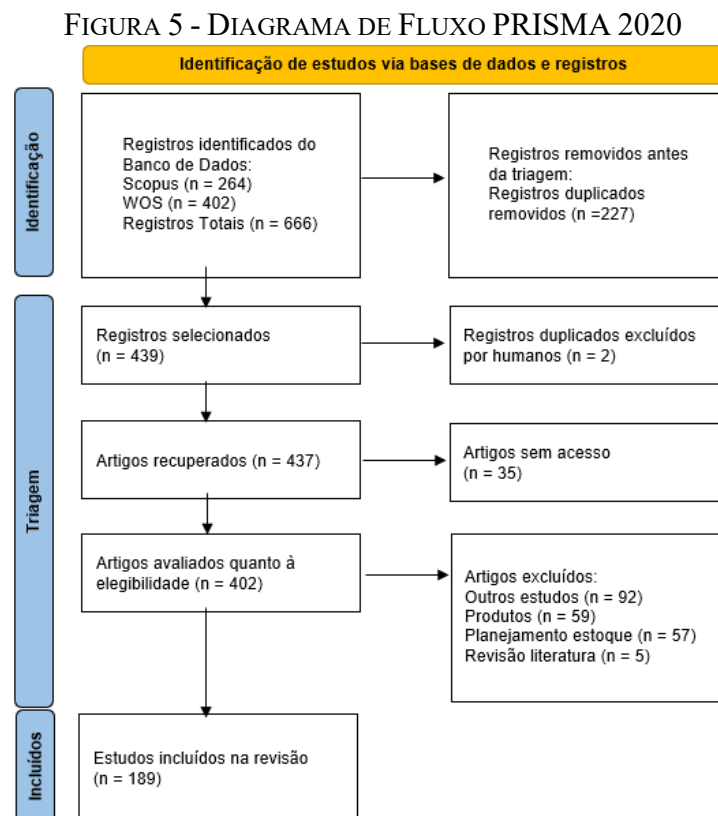
A pesquisa foi conduzida entre fevereiro e julho de 2024 nas bases de dados Scopus e Web of Science (WOS). A estratégia de busca foi elaborada a partir de combinações de palavras-chave relacionadas à logística reversa, resíduos eletroeletrônicos e modelos de otimização, utilizando operadores booleanos. As buscas foram realizadas nos campos título, resumo e palavras-chave, com aplicação de filtro para tipo de documento, restringindo-se a artigos científicos.

Foram realizadas três buscas complementares. Na primeira busca, utilizaram-se os termos “*reverse logistics*” ou “*closed-loop supply chain*” combinados com “*multiobjective linear programming*”, “*multicriteria optimization*”, “*optimization model*” ou “*mixed integer linear programming*”, resultando em 453 registros, sendo 158 provenientes da base *Scopus* e 295 da base *Web of Science*, ainda contendo duplicidades.

Na segunda busca, buscou-se refinar o escopo para aplicações específicas de logística reversa, utilizando os termos “*multiple objective linear programming*” ou “*multi-objective optimization*”, combinados com “*mixed integer programming*”, “*reverse logistic**” ou “*closed-loop supply chain**”, e “*location* problem*” ou “*reverse network design*”. Essa busca resultou em 139 registros, sendo 71 da *Scopus* e 68 da *Web of Science*, também com duplicidades.

Na terceira busca, foram incluídos termos relacionados à economia circular e resíduos eletroeletrônicos, como “*circular economy*” e “*WEEE*”, “*waste electrical and electronic equipment*” ou “*e-waste*”, resultando em 74 registros, sendo 35 da *Scopus* e 39 da *Web of Science*.

No total, as três buscas resultaram em 666 registros, sendo 264 provenientes da base *Scopus* e 402 da *Web of Science*, ainda sem a exclusão de duplicidades. O fluxo do processo de revisão sistemática, incluindo as etapas de identificação, triagem e inclusão, apresenta-se na Figura 5.



Fonte: elaborada pela autora.

Após a etapa de identificação, os registros foram importados para o *software Rayyan*, utilizado para apoio à triagem dos estudos. Inicialmente, foram removidos 227 artigos duplicados automaticamente. Em seguida, foi realizada uma verificação manual, resultando na exclusão de mais dois registros duplicados. Ainda na etapa de triagem, 35 artigos foram excluídos por indisponibilidade de acesso ao texto completo, resultando em 402 publicações elegíveis para análise.

A avaliação dos estudos foi realizada por meio da leitura de títulos e resumos, seguida da leitura completa dos artigos selecionados, com o objetivo de verificar sua aderência ao escopo da pesquisa. Para essa etapa, foi utilizada a funcionalidade de revisão em modo duplo cego do *Rayyan*, permitindo a avaliação sistemática e independente dos trabalhos. Foram

excluídos artigos que não tratavam de modelos de otimização aplicados à logística reversa ou que abordavam outros aspectos da gestão de resíduos pós-consumo fora do escopo definido.

A partir da seleção final das publicações, foi gerado um conjunto de dados contendo informações bibliográficas e textuais dos artigos, possibilitando análises complementares. Para a análise bibliométrica, foi utilizado o *software VOSviewer*, que permitiu a construção de redes de coautoria e coocorrência de palavras-chave.

Para a análise textual dos conteúdos, foi utilizado o *software IRaMuTeQ*. Os resumos dos artigos selecionados foram organizados em um corpus textual, que foi processado pelo software para a realização de análises lexicográficas e multivariadas, incluindo análise de similitude e classificação hierárquica descendente, conforme descrito por Soares et al. (2022). Esses procedimentos possibilitaram a identificação de padrões temáticos e relações entre os estudos analisados.

4.3. ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA DA LITERATURA SELECIONADA

Com base no conjunto de artigos selecionados na etapa de revisão sistemática apresentada na seção anterior, foi realizada uma análise bibliométrica com o objetivo de caracterizar a produção científica sobre modelos de otimização aplicados à logística reversa. Essa análise permite identificar padrões de publicação, principais temas de pesquisa, relações entre autores e a evolução das abordagens utilizadas na literatura.

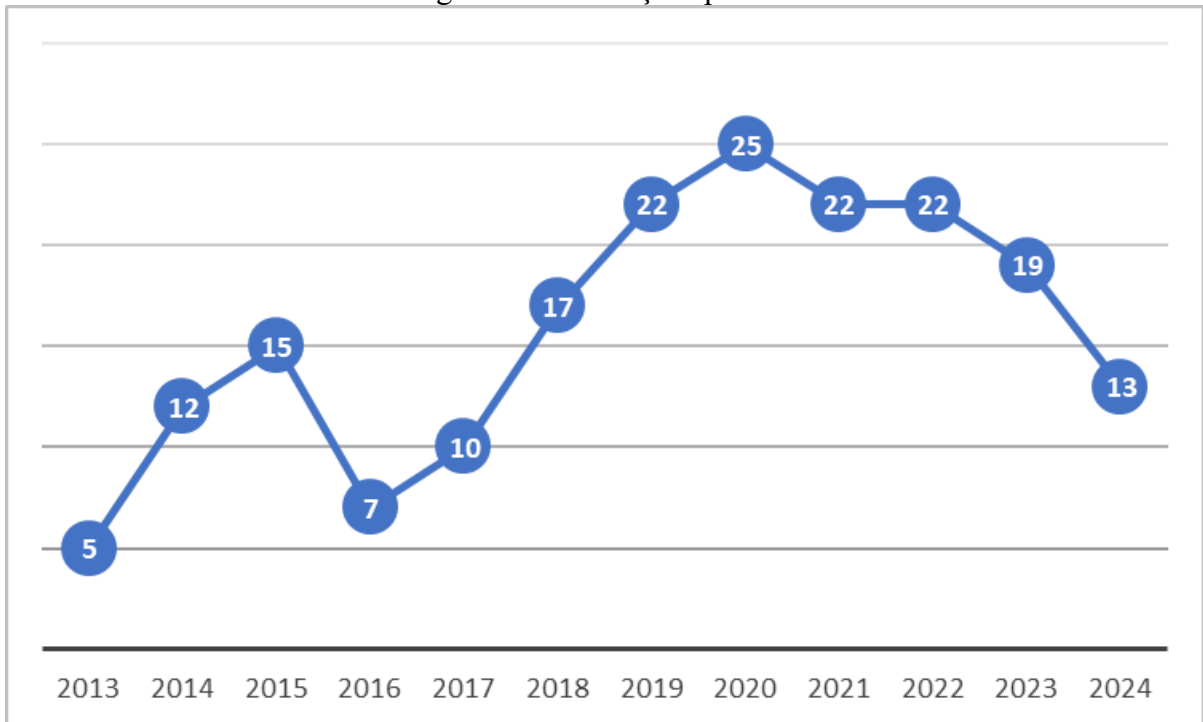
Para isso, foram consideradas métricas relacionadas à produção científica, coautoria e coocorrência de palavras-chave, possibilitando uma visão estruturada do estado da arte na área. Na análise foram consideradas as seguintes métricas: total de publicações por ano; países das instituições dos autores principais; citações por país; periódicos em que foram publicados; fator de impacto; tópicos mais frequentes; e, análise de rede de colaboração. As análises foram conduzidas com o auxílio do *software VOSviewer*, que permite a construção e visualização de redes bibliométricas.

Inicialmente, foi analisada a evolução temporal das publicações, com o objetivo de identificar tendências no desenvolvimento da área. Observa-se um crescimento no número de estudos ao longo dos anos, indicando o aumento do interesse da comunidade científica em modelos de otimização aplicados à logística reversa.

A Figura 6 apresenta o número de artigos publicados por ano desde 2013 até 2024 (sendo este apenas até julho). Observa-se um aumento no número de estudos ao longo dos anos, principalmente a partir de 2018, indicando o aumento do interesse da comunidade científica em

modelos de otimização aplicados à logística reversa. O ápice no número de artigos foi em 2020, com 25 publicações.

Figura 6 - Publicações por ano

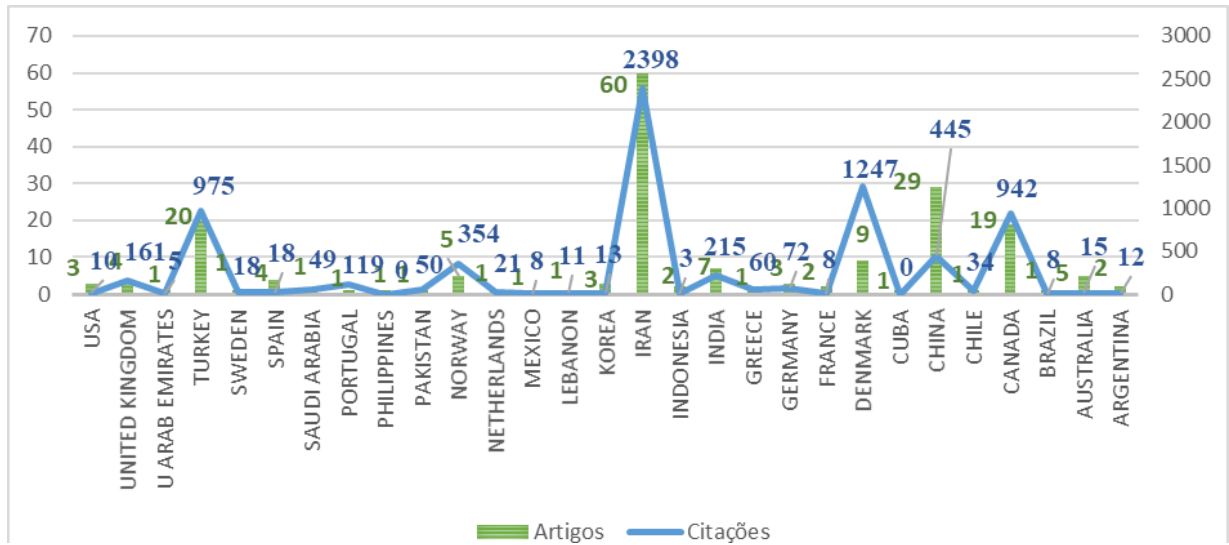


Fonte: elaborada pela autora.

Em relação às fontes de publicação, verifica-se a concentração dos estudos em periódicos das áreas de Engenharia, Pesquisa Operacional e Gestão da Cadeia de Suprimentos, evidenciando o caráter interdisciplinar do tema.

A Figura 7 mostra o número de artigos e de citações considerando os países da instituição de origem dos autores principais. Na análise por países, o Irã se sobressai em número de publicações e citações, sendo 60 e 2398 respectivamente. Por outro lado, as instituições da Dinamarca e da Noruega se destacam pelo número de citações, o que pode indicar o reconhecimento e a relevância dos trabalhos para a comunidade científica. Observe que, dos 15 países com maior número de publicações, 10 estão listados entre as 20 maiores economias do mundo, conforme os rankings de PIB nominal da *International Monetary Fund* (WEO, 2025).

Figura 7 - Artigos e citações por países



Fonte: elaborada pela autora.

A Tabela 1 apresenta os 10 artigos mais citados, de acordo com o fator de impacto corrigido (FCI - *Corrected Impact Factor*), obtido usando o número de citações e o indicador JCI (*Journal Citation Indicator*), o país da instituição do autor principal e o periódico em que cada artigo foi publicado. Observa-se que, o artigo com maior fator de impacto foi publicado por (Govindan et al., 2014) no periódico *International Journal of Production Economics*. Entre os periódicos, dos 10 trabalhos mais citados, 4 foram publicados no *Journal of Cleaner Production*, com predominância do Irã (5 artigos).

TABELA 1 – CLASSIFICAÇÃO DOS ARTIGOS POR CITAÇÕES

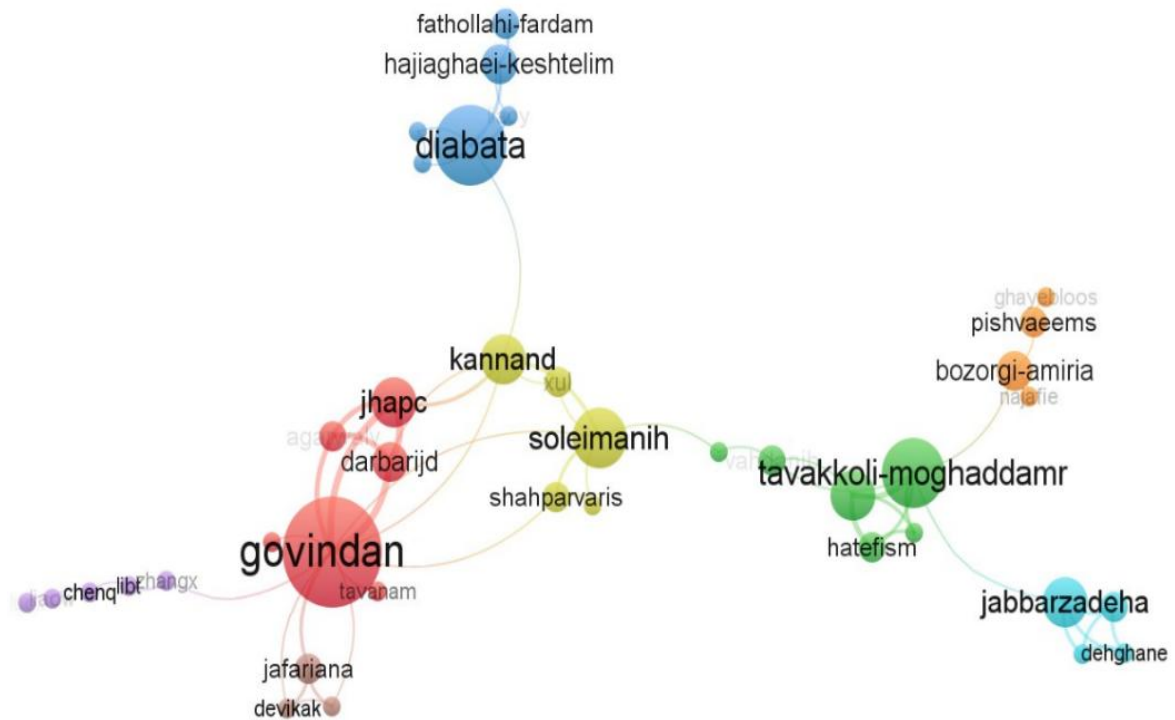
Autores	País	Periódico	Citações	SCI	FCI
Govindan et al. (2014)	Dinamarca	<i>Int. Journal of Production Economics</i>	395	2,05	109,81
Devika et al. (2014)	Dinamarca	<i>European journal of operational research</i>	309	2,32	101,44
Abbasi; Daneshmand-Mehr; Kanafi (2023a)	Irã	<i>Environmental modeling and assessment</i>	130	0,54	100,16
Sadeghi Rad e Nahavandi (2018);	Irã	<i>Journal of Cleaner Production</i>	196	2,05	85,62
Seydanlou et al. (2022);	Irã	<i>Expert systems with applications</i>	83	1,87	79,54
Talaei et al. (2016)	Irã	<i>Journal of Cleaner Production</i>	197	2,05	72,03
Govindan, Paam e Abtahi (2016);	Dinamarca	<i>Journal of Cleaner Production</i>	163	2,05	62,3
Mota et al. (2018);	Portugal	<i>Omega-international journal of management science</i>	119	2,65	62,00
Tavana et al. (2022);	China	<i>Journal of Cleaner Production</i>	59	2,05	60,14
Nili et al. (2021);	Irã	<i>Renewable and sustainable energy reviews</i>	52	3,60	59,74

Fonte: elaborada pela autora.

Na análise de coautoria foi possível identificar padrões de colaboração entre pesquisadores, evidenciando a formação de grupos de pesquisa e redes acadêmicas atuantes na área.

A Figura 8 apresenta a estrutura de colaboração entre os principais autores que publicam sobre modelos de otimização aplicados à logística reversa, conforme mapeamento realizado no software VOSviewer. Cada nó representa um autor, e o tamanho do círculo apresenta-se proporcional ao número de publicações ou à força de cocorrência (coautorias). As cores indicam agrupamentos (clusters) de pesquisadores que compartilham vínculos de colaboração mais próximos.

Figura 8 - Rede de colaboração



Fonte: elaborada pela autora.

Nota: a partir do software VOSViewer.

Observe na Figura 8 que, o cluster vermelho, liderado por Govindan et al (2017), destaca-se como o núcleo mais influente da rede. Esse autor, amplamente reconhecido por suas contribuições em modelos de otimização multiobjetivo, sustentabilidade na cadeia de suprimentos e integração entre logística direta e reversa.

O cluster azul, liderado por Diabat et al (2013), representa outro polo relevante, frequentemente associado a estudos sobre logística reversa verde, supply chain resiliente e modelos baseados em programação matemática e heurísticas híbridas. Este grupo mantém conexões indiretas com Govindan et al (2017), sugerindo complementariedade entre suas linhas de pesquisa.

O cluster verde, centrado em Hatefi, Torabi e Tavakkoli-Moghaddam (2015), reflete uma presença majoritária iraniana, com alta produtividade e foco em otimização de múltiplos critérios, planejamento de redes sustentáveis e sistemas de reciclagem. Esse grupo mantém conexões com autores como Jabbarzadeh et al (2020) (cluster azul-claro), reforçando a presença de uma comunidade regional consolidada em torno desses temas.

O cluster amarelo, no entorno de Soleimani e Kannand (2019), funciona como elo intermediário entre os grupos de Govindan et al (2017) e Hatefi, Torabi e Tavakkoli-

Moghaddam (2015), evidenciando colaborações internacionais e a interseção temática entre sustentabilidade, incertezas na cadeia reversa e modelagem matemática.

Por fim, pequenos agrupamentos periféricos, como o cluster lilás, autores chineses como Chen et al (2015) e Li et al (2019), indicam núcleos emergentes de pesquisa que ainda mantêm baixa densidade relacional, mas contribuem para a diversificação geográfica da produção.

A rede de coautoria evidencia uma estrutura colaborativa densa e hierarquizada, em que Govindan et al (2017), Diabat et al (2013), e Hatefi, Torabi e Tavakkoli-Moghaddam (2015) se configuram como hubs científicos centrais, responsáveis por articular linhas de pesquisa internacionais sobre otimização, sustentabilidade e logística reversa. Essa configuração reforça a natureza interdisciplinar e global do campo, com destaque para o predomínio de colaborações entre autores da Ásia e da Europa, e uma integração crescente de temas ambientais nos modelos de otimização

A análise de coocorrência de palavras-chave possibilitou identificar os principais temas abordados na literatura, evidenciando agrupamentos relacionados a problemas de localização de instalações, otimização de redes, sustentabilidade e economia circular, que configuram as principais linhas de pesquisa no campo da logística reversa.

No total, foram identificadas 1.776 palavras-chave nos artigos selecionados. A partir desse conjunto, foi realizada uma análise de nuvem de palavras-chave (*hot topics*), com o objetivo de destacar os termos mais recorrentes na literatura. Para a construção da rede de coocorrência no software VOSviewer, foi definido um limite mínimo de 12 ocorrências por palavra-chave, resultando em 40 nós, conforme apresentado na Figura 9. Esses nós são representados proporcionalmente à frequência de ocorrência dos termos analisados.

De forma geral, os resultados da análise bibliométrica evidenciam a crescente relevância do tema e a diversidade de abordagens utilizadas na literatura. Esses resultados fornecem subsídios para a análise técnica dos modelos e problemas abordados, apresentada no Capítulo 5.

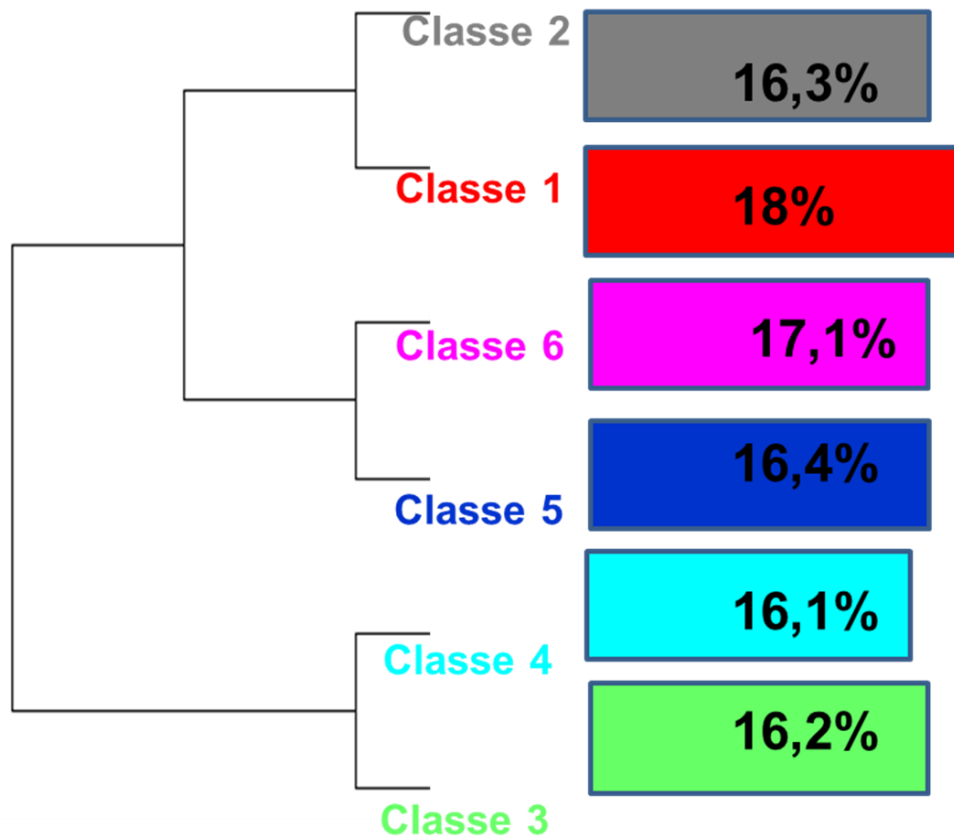
4.4. ANÁLISE DE CONTEÚDO

Com o objetivo de aprofundar a compreensão dos temas abordados nos estudos selecionados, foi realizada uma análise de conteúdo com o apoio do software IRaMuTeQ. O corpus analisado foi composto pelos resumos dos artigos, permitindo identificar padrões lexicais e relações entre os termos mais recorrentes na literatura.

Um arquivo contendo os resumos dos artigos foi processado pelo software, resultando em 511 segmentos de texto utilizados na análise. Esses segmentos são classificados com base na frequência e associação dos termos, permitindo a identificação de estruturas temáticas no corpus. A análise resultou na definição de seis classes, organizadas por meio da Classificação Hierárquica Descendente, conforme descrito por Camargo e Justo (2021).

A Figura 10 apresenta o dendrograma obtido, que evidencia a estrutura hierárquica das classes e o percentual de segmentos de texto associados a cada uma. Observa-se que a primeira divisão separa o corpus em dois grandes agrupamentos: um composto pelas classes 3 e 4, e outro formado pelas classes 1, 2, 5 e 6, indicando a existência de dois eixos temáticos principais na literatura analisada.

Figura 10 - Dendrograma da classificação



Fonte: elaborada pela autora.

Nota: com dados do software Iramuteq.

A partir dessa estrutura, e considerando os termos característicos de cada classe (Figura 13), identificou-se os principais focos temáticos:

- **classe 1** – estrutura da rede e decisões logísticas, com termos como *collection center, location, flow, distribution, network, recycle* e *remanufacturing*;
- **classe 2** – gestão e disposição de resíduos, com destaque para termos como *waste, end-of-life, electronic* e *primary unit*;
- **classe 3** – métodos e abordagens de solução, incluindo termos como *algorithm, solution, method, approach, computational* e *pareto*;
- **classe 4** – análise gerencial e estudos de caso, com termos como *numerical, sensitivity, case* e *insight*;
- **classe 5** – características dos modelos e formulações, com termos como *integer, linear, multi-echelon, multi-objective, design* e *objective*;
- **classe 6** – conceitos de logística reversa e cadeias de suprimento, com termos como *supply chain, closed-loop* e *forward*.

Com o objetivo de aprofundar a interpretação das classes identificadas, foram realizadas análises complementares: conjunto de palavras associadas a cada classe e análise de similitude.

e integração de cadeias de suprimento. A segunda categoria, associada à modelagem e formulação dos problemas, engloba as classes 3 e 5, contemplando elementos como variáveis de decisão, funções objetivo, restrições e métodos de solução. Por fim, a terceira categoria refere-se ao contexto de aplicação e aspectos operacionais, reunindo as classes 2 e 4, que tratam da gestão de resíduos, estudos de caso e análises de sensibilidade. Esse procedimento de agrupamento considera-se consistente com abordagens de análise de conteúdo que buscam consolidar categorias interpretativas a partir de classes lexicais, permitindo uma síntese estruturada dos temas recorrentes na literatura (BARDIN, 2011; CAMARGO; JUSTO, 2021).

A literatura sobre modelos de otimização aplicados ao planejamento e à gestão de redes de logística reversa configura-se extensa, abrangendo estudos voltados à localização de instalações, roteirização de coleta, dimensionamento de fluxos e gestão de estoques em sistemas de recuperação, reciclagem e remanufatura. No entanto, observa-se que há menor número de trabalhos que integram, de forma estruturada, múltiplos critérios de sustentabilidade, econômicos, ambientais e sociais, em modelos de programação matemática. Nesse contexto, esta revisão sistemática busca identificar diferentes abordagens de modelagem, com atenção especial aos modelos multiobjetivo, sem se restringir exclusivamente a eles.

A revisão sistemática realizada permitiu identificar e organizar um conjunto relevante de estudos relacionados ao planejamento de redes de logística reversa, evidenciando a diversidade de contextos, abordagens e aplicações presentes na literatura. Observa-se que os trabalhos analisados se concentram na modelagem de redes logísticas com diferentes níveis de complexidade, utilizando técnicas de otimização para apoiar decisões estratégicas e operacionais.

A literatura sobre modelos de otimização aplicados ao planejamento e à gestão de redes de logística reversa configura-se extensa, abrangendo estudos voltados à localização de instalações, roteirização de coleta, dimensionamento de fluxos e gestão de estoques em sistemas de recuperação, reciclagem e remanufatura. No entanto, observa-se que há menor número de trabalhos que integram, de forma estruturada, múltiplos critérios de sustentabilidade, econômicos, ambientais e sociais, em modelos de programação matemática. Nesse contexto, esta revisão sistemática busca identificar diferentes abordagens de modelagem, com atenção especial aos modelos multiobjetivo, sem se restringir exclusivamente a eles.

Apesar de sua contribuição para a identificação de padrões temáticos na literatura, a análise de conteúdo baseada no uso do *IRaMuTeQ* apresenta limitações, uma vez que se fundamenta nos resumos dos artigos, os quais nem sempre contêm informações completas sobre a estrutura dos modelos de otimização. Além disso, a natureza multidisciplinar da área implica

a ausência de padronização terminológica, o que pode influenciar a formação das classes lexicais e a interpretação dos resultados. Dessa forma, as análises apresentadas nesta seção devem ser compreendidas como complementares, contribuindo para a identificação de tendências e eixos temáticos, mas não substituindo a análise técnica detalhada dos modelos.

Nesse contexto, a compreensão aprofundada das abordagens de otimização requer a análise dos estudos em sua íntegra, considerando elementos como a estrutura dos problemas, variáveis de decisão, funções objetivo, restrições e métodos de solução. Assim, o Capítulo 5 apresenta uma análise sistemática dos modelos identificados na literatura, com foco na sua adequação ao problema de planejamento de redes de logística reversa de resíduos eletroeletrônicos no contexto brasileiro.

5. ESTRUTURAS DE MODELAGEM – CARACTERÍSTICAS DO PROBLEMA

Com base na revisão sistemática da literatura apresentada no Capítulo 4, este capítulo tem como objetivo analisar, de forma estruturada, os modelos e abordagens utilizados no planejamento de redes de logística reversa. A análise fundamenta-se na leitura integral dos 189 estudos selecionados, buscando sistematizar os principais elementos de modelagem empregados na literatura.

Diferentemente das análises bibliométricas e de conteúdo previamente realizadas, o foco desta etapa recai sobre os aspectos técnicos dos modelos. Para isso, os resultados são organizados com base em tabelas de sistematização, permitindo uma análise comparativa entre diferentes abordagens.

A estrutura do capítulo segue os principais componentes de modelos de otimização, compreendendo: (i) caracterização dos sistemas analisados; (ii) variáveis de decisão; (iii) restrições; (iv) funções objetivo; (v) modelagem da incerteza; e (vi) métodos de solução. Essa organização possibilita uma análise integrada da forma como os modelos são construídos e aplicados no contexto da logística reversa.

5.1. CARACTERIZAÇÃO DAS REDES

Esta seção apresenta a caracterização dos problemas e sistemas considerados nos estudos selecionados, com base nas informações sistematizadas a partir da revisão da literatura. O objetivo foi identificar os principais contextos de aplicação, estruturas de rede e tipos de problemas abordados nos modelos de otimização.

A Tabela 2 reúne os estudos analisados, classificados segundo a estrutura da rede, distinguindo entre modelos de LR e de CLSC. Essa distinção foi fundamental, pois reflete diferenças estruturais relevantes: enquanto os modelos de LR concentram-se no fluxo reverso de produtos e resíduos, os modelos de CLSC integram simultaneamente os fluxos direto e reverso em um único sistema.

TABELA 2 - MODELOS LR E CLSC

LR 95 artigos	CLSC 94 artigos
Alshamsi e Diabat (2017); Asghari, Abrishami e Mahdavi (2014); Ashayeri, Ma e Sotirov (2015); Aviso et al. (2023); Cao et al. (2022); Che, Lei e Jiang (2022); Choudhary et al. (2015); Goli et al. (2023); Govindan et al. (2014); Jin et al. (2018); Krug, Guillaume, e Battaia (2021); Li, Liu e Li (2019); Li, Shi e Li (2023); Lv et al. (2020); Mahéo, Rossit e Kilby (2023); Mu et al. (2023); Palacio, Adenso-díaz e Lozano (2018); Park et al. (2021); Rajabzadeh, Mousavi e Azimi (2024); Roghanian e Pazhoheshfar (2014); Rosenberg et al. (2023); Sadjadi, Soltani e Eskandarpour (2014); Thoney et al. (2020); Suyabatmaz, Altekin e Sahin (2014); Tadaros et al. (2022); Temucin e Tuzkaya (2020); Torshizi, Bozorgi-amiri e Sabouhi (2024); Tosarkani e Amin (2020); Trochu, Chaabane e Ouhimmou (2019); Trochu, Chaabane e Ouhimmou (2020); Vali-siar e Roghanian (2022); Wenzhu liao e Luo (2022); Wu e Wan (2018); Xu, Jiang e Shi (2022); Yaspal et al. (2023); Yu et al. (2020); Zarbakhshnia et al. (2020); Zhang, Berenguer e Zhang (2024); Chang et al. (2021); Ghezavati e Nia (2015); Hashemi (2021); Leng et al. (2019); Mirmajlesi e Shafaei (2016); Paydar e Olfati (2018); Pouriani, Asadi-gangraj, Paydar (2019); Trochu, Chaabane e Ouhimmou (2018); Wang, Huang e He (2021); Xiao et al. (2019); Yu e Solvang (2016b); Yu e Solvang (2017); John, Sridharan e Ram kumar (2018); Reddy, Kumar e Ballantyne (2019); Yu e Solvang (2016a); Tari e Alumur (2014); Bal e Satoglu (2018); Islam et al. (2021); Kannan et al. (2023); Kilic, Cebeci e Ayhan (2015); Moslehi, Sahebi e Teymouri (2021); Shokohyar e Mansour (2013); Ali et al. (2020); Ameli, Mansour e Ahmadi-javid (2019); Amin e Zhang (2014); Azadeh, Ahmadzadeh e Eslami (2019); Cavallin et al. (2020); Defalque, Da Silva e Marins (2021); Eskandarpour, Nikbakhsh e Zegordi (2014); Govindan, Paam e Abtahi (2016); He et al. (2024); He et al. (2024b); John, Sridharan e Kumar (2017); Karagoz, Aydin e Simic (2022); Kilic et al. (2023); Kim e Lee (2019); Lu et al. (2020); Rabbani et al. (2020); Santos-Penate, Suarez-Vega e De la Nuez (2023); Sathiyaa et al. (2021); Sharma et al. (2024); Wang et al. (2022b); Wang et al. (2021); Yakavenka et al. (2020); Ayvaz, Bolat e Aydin (2015); Budak (2020); Capraz, Polat e Gungor (2015); Chen, Liu e Han (2024); Govindan et al. (2024); Li et al. (2023); Messmann et al. (2019); Safdar et al. (2020); Puspita Sari, Aini Masruroh e Sri Asih (2024); Shi et al. (2020); Tadić et al. (2016); Temur e Yanik (2017); Yu e Tong (2021)	Abbasi, Daneshmand-Mehr e Kanafi (2023b); Abbasi; Daneshmand-Mehr; Ghane Kanafi (2023a); Ade rawan et al. (2022); Aljuneidi e Bulgak (2020); Biçe e Batun (2021); Borajee, Tavakkoli-Moghaddam e Madani-Saatchi (2023); Cilaci Tomuş, Aras e Verter (2017); Dehghan et al. (2019); Demirel et al. (2014); Entezaminia, Heidari e Rahmani (2017); Esmailbeigi et al. (2021); Gao (2019); Ghafarimoghadam, Ghayebloo e Pishvae (2019); Hassanzadeh Amin, Wu e Karaphillis (2018); Hatefi et al. (2015); Hoyer, Kieckhäfer e Spengler (2015); Jabbarzadeh, Haughton e Khosrojerd (2018); Medrano-Gómez et al. (2020); Mohammadi, Davoudpour e Motamedi (2014); Mohtashami, Aghsami e Jolai (2020); Özceylan e Paksoy (2013); Poursoltan, Seyed-Hosseini e Jabbarzadeh (2021); Purnomo et al. (2022); (Shankar, Bhattacharyya e Choudhary (2018); Subulan, Taşan e Baykasoglu (2015); Tokhmehchi, Makui e Sadi-Nezhad (2015); Vahdani et al. (2013); Vahdani e Mohammadi (2015); Wang et al. (2022a); Yu e Solvang (2020); Allehashemi, Amin e Zolfaghari (2022); Devika, Jafarian e Nourbakhsh (2014); Kchaou-Boujelben, Bensalem e Jemai (2023); Mohajeri e Fallah (2016); Ozgur Polat e Gungor (2021); Sadeghi Rad e Nahavandi (2018); Shi et al. (2017); Talei et al. (2016); Tavana et al. (2022); Yildizbasi e Ario (2021); Yousefi-Babadi et al. (2017); Banguera et al. (2018); Abdolazimi et al. (2022); Ade Irawan et al. (2022); Ahranjani et al. (2018); Alinezhad et al. (2022); Amin e Zhang (2013); Atabaki, Mohammadi e Naderi (2020); Bas e Ozkok (2020); Darbari et al. (2019); Fakhrzad e Goodarzian (2019); Garg et al. (2015); Ghoushchi e Hushyar (2020); Golpira e Javanmardan (2021); Govindan et al. (2017); Guo, Shi e Guo (2022); Hajiaghaei-Keshteli e Fathollahi Fard (2019); Hu, Parwani e Hu (2021); Jabbarzadeh et al. (2020); Jiang et al. (2020); Jindal e Sangwan (2017); Kalantari et al. (2022); Kazancoglu et al. (2022); Kiani Mavi et al. (2023); Liu, Tang e Zhang (2024); Lotfi et al. (2021); Mirakhorli (2014); Mohammadi et al. (2020); Mota et al. (2018); Nili et al. (2021); Özkir e Başligil (2013); Papen e Amin (2019); Pourjavad e Mayorga (2018); Pourjavad e Mayorga (2019); Rafiqh et al. (2021); Rajak, Parthiban e Dhanalakshmi (2018); Rouhani, Amin e Wardley (2024); Saffar, Hamed Shakouri e Razmi (2015); Salçuk e Şahin (2022); Seydanlou et al. (2022); Shoaieaeni, Govindan e Rahmani (2022); Taherifar et al. (2024); Tosarkani, Amin e Ghiasvand (2024); Tsao, Tesfaye Balo e Lee (2024); Valizadeh et al. (2020); Yavari e Geraeli (2019); Zarbakhshnia et al. (2019); Ziari e Sajadieh (2022); Kalantari Khalil Aba, Barzinpour e Pishvae (2023); Ahmadi e Amin (2019); Chen et al. (2015); Chen, Chan e Chung (2015); Harijani, Mansour e Fatemi (2023)

Fonte: elaborada pela autora.

No conjunto de LR, observa-se estudos como Alshamsi e Diabat (2017), Govindan et al. (2014), Trochu, Chaabane e Ouhimmou (2019; 2020) e Zarbakhshnia et al. (2020) com foco nos processos de coleta, triagem, reciclagem ou remanufatura como sistemas independentes. Do mesmo modo, trabalhos como Li, Liu e Li (2019), Tosarkani e Amin (2020), Wenzhu Liao e Luo (2022) e outros presentes na amostra enfatizam decisões operacionais sobre alocação de resíduos, localização de instalações reversas e definição de fluxos de retorno.

Por outro lado, os modelos classificados como CLSC de Abbasi, Daneshmand-Mehr e Kanafi (2023a; 2023b), Aljuneidi e Bulgak (2020), Demirel et al. (2014) e Esmailbeigi et al. (2021) representam esse grupo ao considerarem conjuntamente produção, distribuição, coleta, reciclagem e remanufatura em um único arcabouço decisório. Modelos como os de Ghafarimoghadam, Ghayebloo e Pishvae (2019), Hatefi et al. (2015) e Mohammadi,

Davoudpour e Motamedi (2014) ampliam essa integração ao incluir decisões de demanda, estoques e reaproveitamento de componentes. De forma semelhante, contribuições mais recentes, como Tavana et al. (2022), Yu e Solvang (2020) e Zarbakhshnia et al. (2019), reforçam a tendência de incorporar múltiplos critérios de sustentabilidade e incertezas em redes de ciclo fechado altamente complexas.

A distribuição equilibrada entre os modelos classificados como LR e CLSC revela um cenário maduro na literatura de modelagem e otimização aplicada ao gerenciamento de resíduos, especialmente os eletroeletrônicos. Apesar dessa proximidade numérica, os dois grupos representam perspectivas analíticas distintas, o que permite compreender diferentes enfoques e prioridades metodológicas dos pesquisadores.

A estruturação das camadas da rede constitui uma das etapas fundamentais no desenvolvimento de modelos de otimização para logística reversa e cadeias de suprimentos de ciclo fechado. Esses elementos determinam a configuração espacial e funcional do sistema, influenciando diretamente os custos, o desempenho operacional e o grau de recuperação de valor dos resíduos eletroeletrônicos. Na literatura analisada, observa-se que a definição de camadas, como coleta, triagem, reciclagem, remanufatura, mercado secundário e disposição final, aparece como um dos componentes mais recorrentes, refletindo a necessidade de representar adequadamente a complexidade das atividades envolvidas no fluxo reverso.

De acordo com a definição apresentada por Govindan, Soleimani e Kannan (2015), o gerenciamento da cadeia de suprimentos de circuito fechado (CLSC) envolve projetar, controlar e operar um sistema para maximizar a criação de valor ao longo de todo o ciclo de vida de um produto, com recuperação de valor ao longo do tempo. A evolução da gestão da cadeia de suprimentos de circuito fechado demonstra uma mudança além da criação de valor puramente econômico para abranger contribuições sociais e ambientais mais amplas. Embora a lucratividade permaneça central, a ênfase crescente na sustentabilidade reflete um reconhecimento de toda a indústria da responsabilidade corporativa e da administração ambiental de longo prazo.

Assim, o equilíbrio quantitativo entre LR e CLSC revela que a área se encontra em ponto de convergência: enquanto um grupo significativo de estudos permanece dedicado ao detalhamento operacional dos fluxos reversos, outro conjunto igualmente robusto avança para modelagens integradas, alinhadas aos princípios da economia circular e ao fechamento completo do ciclo de vida dos produtos. Para resíduos eletroeletrônicos, caracterizados pela heterogeneidade material, alto valor agregado e rigor regulatório, essa coexistência considera-se especialmente relevante, pois demonstra que tanto abordagens especializadas quanto

holísticas continuam essenciais para responder aos desafios contemporâneos da gestão sustentável desses resíduos.

5.2. DECISÕES

Esta seção analisa as principais decisões consideradas nos modelos de otimização identificados na literatura, com base nas informações sistematizadas a partir dos estudos selecionados. As decisões de modelagem definem a configuração e o funcionamento das redes de logística reversa, influenciando diretamente os fluxos de materiais, os custos operacionais e o desempenho do sistema.

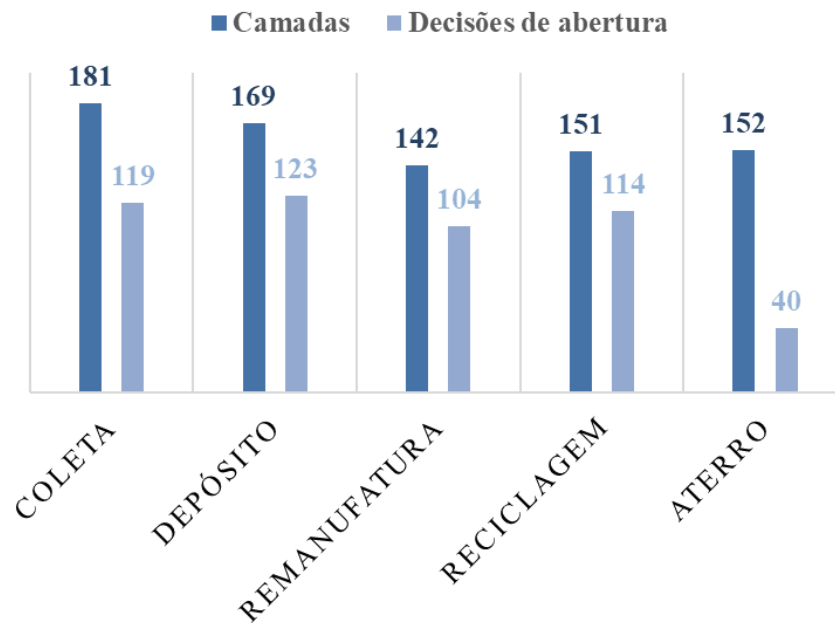
De modo geral, destacam-se três grupos principais de decisões: (i) decisões de localização de instalações, responsáveis pela configuração espacial da rede; (ii) decisões de transporte, que estabelecem a movimentação de materiais entre os elos; e (iii) decisões de estoque e capacidade, que regulam o armazenamento e o processamento ao longo da rede.

A seguir, essas decisões são analisadas de forma detalhada, com foco nas semelhanças e diferenças na forma como são abordadas nos artigos da literatura.

5.2.1. Decisões de Localização de Instalações

As decisões de abertura das instalações desempenham papel central na modelagem de problemas de planejamento de redes logísticas, em particular em redes reversas, uma vez que determinam a distribuição geográfica dos centros de processamento e, conseqüentemente, afetam a eficiência logística, os impactos ambientais e a viabilidade econômica das operações. Como mencionado anteriormente, as decisões de fluxo de materiais estão presentes em todos os trabalhos da literatura sobre modelos para planejamento de rede. Já as decisões de localização nem sempre estão contempladas em todas as camadas da rede. A Figura 13 apresenta, para cada camada, o número de trabalhos que a consideram e o número de trabalhos que incluem decisões de abertura e localização nas respectivas camadas.

FIGURA 13 – CAMADAS DA REDE E DECISÕES DE ABERTURA



Fonte: elaborada pela autora.

Verifica-se uma predominância consistente das camadas da rede em todos os grupos de estudos analisados, apresentando valores superiores às decisões de abertura em todas as categorias. Essa diferença sugere que a maior parte dos trabalhos prioriza a caracterização detalhada das atividades e dos pontos funcionais da cadeia reversa, mesmo quando não há decisões explícitas sobre localização ótima. Por exemplo, no primeiro conjunto, observa-se 181 menções à camada da rede Coleta contra 119 menções às decisões de abertura de pontos de coleta, indicando que muitos modelos buscam representar o fluxo reverso, a coleta, a reciclagem, a remanufatura e a disposição, sem necessariamente otimizar a escolha geográfica dessas instalações.

Essa tendência se repete ao longo dos demais grupos, com valores como 169 versus 123 para a camada da rede Depósito, 142 versus 104 para Remanufatura e 151 versus 114 para o Aterro, reforçando que, embora a localização seja uma decisão relevante, a literatura frequentemente se concentra primeiro na estrutura conceitual da rede, descrevendo suas funções e inter-relações. Tal abordagem foi coerente com a natureza dos resíduos eletroeletrônicos, que exigem múltiplas operações especializadas e fluxos complexos de materiais; assim, a modelagem costuma iniciar pela definição dessas camadas antes de avançar para decisões estratégicas.

A camada de rede Aterro, contudo, apresentou um comportamento discrepante: 152 menções consideram a camada contra apenas 40 menções às decisões de abertura de pontos de Aterro. Esse contraste marcante indica que uma parcela significativa dos estudos considera as instalações como pré-existentes, fixas ou dadas, concentrando-se exclusivamente no fluxo operacional. Em modelos aplicados ou estudos de caso, considera-se comum assumir que centros de coleta, plantas de reciclagem ou aterros já estejam definidos por regulamentações, limitações geográficas ou infraestrutura disponível, dispensando a necessidade de otimização de localização.

Diante desse panorama, torna-se evidente que a literatura contempla uma diversidade significativa de configurações de rede e níveis de decisão, variando desde modelos que representam apenas parte das operações reversas até aqueles que incluem todas as etapas do ciclo fechado. Para aprofundar essa compreensão e evidenciar como cada estudo estrutura suas escolhas de modelagem, apresentam-se a seguir as tabelas que detalham, de forma sistemática, as decisões de abertura e localização adotadas nas diferentes camadas da rede.

A Tabela 3 reúne exclusivamente os trabalhos que consideram decisões estratégicas em todas as camadas, Coleta, Depósito, Remanufatura, Reciclagem e Aterro, distinguindo entre modelos de Logística Reversa (LR) e Cadeias de Suprimentos de Ciclo Fechado (CLSC). Essa organização permite visualizar não apenas a abrangência das redes modeladas, mas também as diferenças de enfoque entre LR e CLSC no que diz respeito à integração dos elos e à complexidade das decisões espaciais no planejamento da rede.

TABELA 3 - DECISÕES DE ABERTURA EM TODAS AS CAMADAS DA REDE

Coleta – Depósito – Remanufatura – Reciclagem – Aterro	
LR (7)	CLSC (19)
Choudhary et al. (2015); Yu e Solvang (2016b); John, Sridharan e Kumar (2017); Wu e Wan (2018); Krug, Guillaume, e Battaia (2021); Goli et al. (2023); Yaspal et al. (2023)	Devika, Jafarian e Nourbakhsh (2014); Hatefi et al. (2015) Hoyer, Kieckhäfer e Spengler (2015); Talaei et al. (2016) Hassanzadeh Amin, Wu, Karaphillis (2018); Pourjavad e Mayorga (2018); Gao (2019); Pourjavad e Mayorga (2019); Zarbakhshnia et al. (2019); Aljuneidi e Bulgak (2020); Atabaki, Mohammadi e Naderi (2020); Jiang et al. (2020); Hu, Parwani e Hu (2021); Guo, Shi e Guo (2022); Shoaieinaeini, Govindan e Rahmani (2022); Taviana et al. (2022); Tsao, Tesfaye Baló e Lee (2024);

Fonte: elaborada pela autora.

Nota Legenda: CC-Centro coleta; CD-Centro distribuição; RM-Remanufatura; RC-Reciclagem; AT-Aterro; PL-Planta; TR- tipo de transporte; PD-Produção; IV-Inventário.

A predominância de estudos classificados como *Closed Loop Supply Chain* (CLSC) entre aqueles que consideram decisões de abertura em todas as camadas da rede era, em certa medida, esperada. Por definição, os modelos de CLSC contemplam a integração entre fluxos diretos e reversos, o que implica a incorporação de um número maior de camadas e de decisões

associadas à configuração da rede. Dessa forma, a própria estrutura conceitual dos modelos de ciclo fechado favorece a inclusão de decisões de localização em múltiplos níveis, abrangendo desde a coleta até as etapas de remanufatura, reciclagem e disposição final.

Entre os estudos classificados como LR, autores como Yu e Solvang (2016b) e Choudhary et al. (2015) apresentam modelos nos quais decisões de localização são consideradas em múltiplas camadas da rede, abrangendo desde a coleta até etapas de inspeção e direcionamento dos resíduos. No entanto, mesmo nesses casos, observa-se que o foco permanece predominantemente no fluxo reverso e na organização operacional das etapas do sistema, sem integração explícita com as operações produtivas diretas.

Por outro lado, os estudos classificados como CLSC evidenciam uma abordagem mais integrada, na qual decisões de abertura são combinadas com a coordenação entre produção, coleta, remanufatura e reciclagem. Trabalhos como os de John, Sridharan e Ramkumar (2018), Hassanzadeh Amin, Wu e Karaphillis (2018), Li et al. (2023) e Darbari et al. (2019) destacam-se por incorporar explicitamente essa integração, especialmente em aplicações voltadas a resíduos eletroeletrônicos.

Além disso, estudos desenvolvidos em diferentes contextos geográficos, como os de Hoyer, Kieckhäfer e Spengler (2015), na Alemanha, e Yildizbasi e Arioz (2021), na Turquia, bem como pesquisas conduzidas na China e na Índia, como as de Li et al. (2023) e Darbari et al. (2019), reforçam a centralidade das decisões de abertura na integração das operações de remanufatura e reciclagem. Esses trabalhos evidenciam que, independentemente do contexto regional, a estruturação completa da rede depende da articulação entre múltiplos elos da cadeia.

Nos estudos voltados especificamente a resíduos eletroeletrônicos — como os de John et al. (2018), Li et al. (2023), Darbari et al. (2019) e Hassanzadeh Amin et al. (2018) — essa integração se mostra ainda mais pronunciada, pois o planejamento eficaz dessas redes depende da articulação simultânea entre coleta, triagem, remanufatura e reciclagem. Nesse sentido, a predominância de estudos CLSC nesse conjunto reforça o papel dos modelos de ciclo fechado como arcabouço mais adequado para representar sistemas mais completos e integrados de logística reversa.

Após identificar-se os estudos que adotam decisões de abertura ou localização em todas as camadas da rede, foi igualmente relevante observar o movimento inverso presente na literatura: trabalhos que modelam integralmente a rede reversa e de ciclo fechado, incluindo coleta, depósito, remanufatura, reciclagem e disposição final, mas sem incorporar decisões de abertura ou localização. Esse conjunto, apresentado na Tabela 4 a seguir, revela abordagens que

privilegiam a dinâmica dos fluxos e dos processos operacionais, assumindo que a infraestrutura já existe ou que sua localização foi determinada por fatores externos ao modelo.

TABELA 4 - TODAS AS CAMADAS DA REDE SEM DECISÃO DE ABERTURA OU LOCALIZAÇÃO

Sem decisão de abertura	
Coleta – Depósito – Remanufatura – Reciclagem – Aterro	
LR (15)	CLSC (10)
Asghari, Abrishami e Mahdavi (2014); Capraz, Polat e Gungor (2015); Tadić et al. (2016); Bal e Satoglu (2018); Xiao et al. (2019); Budak (2020); Lu et al. (2020); Defalque, Da Silva e Marins (2021); Wenzhu liao e Luo (2022); Kannan et al. (2023) Kilic et al. (2023); Aviso et al. (2023); Li, Shi e Li (2023); He et al. (2024b); Rajabzadeh, Mousavi e Azimi (2024)	Govindan et al. (2017); Shankar, Bhattacharyya e Choudhary (2018); Mota et al. (2018); Ghouschi e Hushyar (2020); Mohtashami, Aghsami e Jolai (2020); Lotfi et al. (2021); Ozgur Polat e Gungor (2021); Nili et al. (2021); Kalantari et al. (2022) Purnomo et al. (2022)

Fonte: elaborada pela autora.

A presença de modelos que incluem todas as camadas da rede, mas não incorporam decisões de abertura ou localização, revela escolhas metodológicas específicas que aparecem de forma recorrente na literatura. Um primeiro motivo provável foi que muitos desses estudos têm natureza operacional ou tática, concentrando-se na otimização dos fluxos de materiais, custos de transporte, níveis de recuperação ou políticas de estoque, assumindo que a infraestrutura logística já está estabelecida. Trabalhos como Bal e Satoglu (2018) e Xiao et al. (2019), por exemplo, focam na eficiência dos fluxos reversos e na coordenação entre as etapas de reciclagem e remanufatura, partindo da premissa de que as instalações existentes não são objeto de decisão estratégica.

Entre os estudos mais próximos do foco de resíduos eletroeletrônicos, destaca-se Xiao et al. (2019), que analisa cadeias de recuperação na China, lidando com fluxos de retorno de produtos eletrônicos. Embora o problema envolva remanufatura e reciclagem, o modelo assume que todos os centros já estão estabelecidos, e por isso se insere no grupo sem decisões de abertura. Lu et al. (2020) também estuda o descarte e processamento de eletroeletrônicos na Ásia, analisando incertezas e rotas de retorno, mas com a infraestrutura fixa. Essa característica foi coerente com países que possuem sistemas industriais extensos e consolidados, onde a preocupação recai mais sobre eficiência operacional do que sobre expansão estrutural.

Além disso, alguns estudos adotam modelos voltados para análises ambientais, multicritério ou de comportamento do sistema, nos quais as localizações são consideradas irrelevantes para os objetivos principais da pesquisa. Trabalhos como Ghouschi e Hushyar (2020) e Lotfi et al. (2021) priorizam avaliações de impacto, decisões tecnológicas ou níveis de recuperação, privilegiando as interações entre as camadas da rede e não sua configuração espacial.

Outro ponto a considerar-se foi que, nos modelos de CLSC, como os de Govindan et al. (2017), Shankar, Bhattacharyya e Choudhary (2018) e Kalantari et al. (2022), a ausência de decisões de abertura pode refletir uma escolha de reduzir a complexidade computacional, especialmente em casos que já incluem múltiplas funções objetivo, incertezas ou componentes estocásticos. Ao fixar as localizações, os autores conseguem aprofundar outros elementos estruturais do modelo, mantendo viabilidade computacional.

Por fim, essa tendência também pode indicar que parte da literatura reconhece que, em muitos países, a localização de instalações de resíduos eletroeletrônicos foi fortemente regulada, restringindo significativamente a liberdade do planejador. Nesses casos, como em Kilic et al. (2023) ou Rajabzadeh, Mousavi e Azimi (2024), o modelo assume que fatores legais, ambientais ou territoriais já definem a distribuição das unidades da rede, tornando a decisão de abertura exógena ao problema. Assim, os resultados sugerem que a ausência de decisões de localização não decorre de omissão, mas de opções metodológicas coerentes com o objetivo do modelo, o contexto de aplicação e as restrições de cada estudo.

Após identificar os estudos que contemplam integralmente todas as camadas da rede com decisões de abertura, e aqueles que as modelam sem qualquer escolha locacional, foi relevante analisar grupos intermediários de trabalhos que adotam uma abordagem híbrida: modelos que incluem decisões de abertura em coleta, depósito, remanufatura e reciclagem, mas não tratam a localização do aterro como variável decisória.

A Tabela 5 apresenta esses estudos, destacando como os autores consideram a infraestrutura de disposição final como elemento externo ou pré-determinado ao problema. Essa configuração reflete uma tendência observada na literatura, na qual a localização de aterros foi frequentemente tratada como uma decisão já consolidada por regulamentações ambientais, restrições territoriais ou políticas regionais, enquanto os demais elos da rede permanecem sujeitos ao planejamento estratégico.

TABELA 5 - DECISÕES DE ABERTURA TODAS AS CAMADAS EXCETO ATERRO

Coleta – Depósito – Remanufatura – Reciclagem Exceto decisão de abertura em Aterro	
LR (14)	CLSC (21)
Ayvaz, Bolat e Aydin (2015); Ghezavati e Nia (2015); Yu e Solvang (2017); John, Sridharan e Ram kumar (2018); Reddy, Kumar e Ballantyne (2019); Rabbani et al. (2020); Zarbakhshnia et al. (2020); Moslehi, Sahebi e Teymouri (2021); Papen e Amin (2019); Mu et al. (2023); Govindan et al. (2024); Puspita Sari, Aimi Masruroh e Sri Asih (2024); Sharma et al. (2024); Zhang, Berenguer e Zhang (2024)	Ozkir e Başligil (2013); Chen, Chan e Chung (2015); Saffar, Hamed Shakouri e Razmi (2015); Entezaminia, Heidari e Rahmani (2017); Shi et al. (2017); Banguera et al. (2018); Sadeghi Rad e Nahavandi (2018); Dehghan et al. (2019); Bas e Ozkok (2020); Valizadeh et al. (2020); Yu e Solvang (2020); Medrano-Gómez et al. (2020); Rafigh et al. (2021); Yıldızbasi e Ariozi (2021); Ade Irawan et al. (2022); Allehashemi, Amin e Zolfaghari (2022); Wang et al. (2022a); Ziari e Sajadieh (2022); Harijani, Mansour e Fatemi (2023); Rouhani, Amin e Wardley (2024); Taherifar et al. (2024)

Fonte: elaborada pela autora.

A configuração apresentada na Tabela 5 revela um padrão metodológico consistente na literatura: embora muitos modelos incorporem decisões estratégicas para coleta, depósito, remanufatura e reciclagem, a decisão de abertura do aterro foi frequentemente excluída da modelagem. Isso ocorre tanto entre os estudos de LR quanto entre os de CLSC, indicando que essa prática não está associada à natureza da cadeia, mas sim à função do aterro dentro do sistema de gestão de resíduos.

No conjunto de estudos LR voltados a resíduos eletroeletrônicos, destaca-se John, Sridharan e Ramkumar (2018), que analisam a rede reversa de dispositivos eletrônicos na Índia. O modelo prevê decisões de abertura em coleta, triagem e reciclagem, refletindo a necessidade de lidar com o rápido aumento dos REEE no país. Da mesma forma, Zarbakhshnia et al. (2020) tratam da recuperação de materiais tecnológicos no contexto asiático, estruturando decisões nas etapas intermediárias de valor agregado e mantendo o aterro como infraestrutura rígida. Esses exemplos mostram que, mesmo no grupo LR, estudos relacionados a eletrônicos tendem a se estruturar de forma coerente com os princípios da economia circular, evitando a expansão de pontos de descarte final.

Nos modelos de CLSC, essa escolha apresenta-se ainda mais perceptível. Trabalhos como Özkir e Başlıgil (2013), Chen, Chan e Chung (2015) e Entezaminia, Heidari e Rahmani (2017) tratam o aterro como última etapa obrigatória, porém não estratégica, uma vez que o foco está na otimização dos fluxos que maximizam recuperação e reinserção ao ciclo produtivo. Estudos como Banguera et al. (2018) e Sadeghi Rad e Nahavandi (2018) reforçam essa lógica ao enfatizar decisões de abertura em instalações que agregam valor, remanufatura, reciclagem e mercados secundários. De forma semelhante, modelos contemporâneos como Yildizbasi e Arioiz (2021), Harijani, Mansour e Fatemi (2023) e Tahirifar et al. (2024) incorporam múltiplos critérios, nos quais o aterro permanece como elemento estático, tanto por seu menor potencial de geração de valor quanto por suas implicações ambientais.

De modo semelhante, Wang et al. (2022) estudam redes chinesas de reciclagem eletrônica, adotando modelos que fortalecem as camadas intermediárias e excluem o aterro das decisões estratégicas. Estudos mais recentes, como Rouhani, Amin e Wardley (2024), tratam da recuperação de produtos tecnológicos em redes de ciclo fechado, priorizando decisões de abertura em centros de remanufatura e triagem, em consonância com objetivos ambientais rigorosos.

Essa regularidade entre autores, períodos e contextos indica que, para grande parte da literatura, a otimização da cadeia ocorre predominantemente nas etapas anteriores ao descarte,

concentrando esforços em atividades com maior potencial de recuperação de valor. Nesse contexto, o aterro assume um papel residual, limitado por regulações e com menor margem de intervenção estratégica. Assim, a ausência de decisões de abertura para essas instalações não representa uma lacuna, mas uma escolha metodológica coerente com a função institucional, ambiental e legal atribuída ao destino final dos resíduos.

A Tabela 6 reúne estudos que concentram suas decisões de abertura nas camadas iniciais da rede, isto é, nos estágios de Coleta e Depósito. Esses modelos não consideram decisões de abertura nas etapas posteriores, remanufatura, reciclagem ou aterro, o que indica que os autores priorizam a estruturação dos primeiros elos da rede reversa, onde ocorre a consolidação dos fluxos retornados.

TABELA 6 - DECISÕES DE ABERTURA NAS CAMADAS INICIAIS

Coleta – Depósito	
LR (13)	CLSC (9)
Cao et al. (2022); Tari e Alumur (2014); Trochu, Chaabane e Ouhimmou (2018); Leng et al. (2019); Kim e Lee (2019); Safdar et al. (2020); Islam et al. (2021); Govindan, Paam e Abtahi (2016); Cavallin et al. (2020); Park et al. (2021); Ali et al. (2020); Shi et al. (2020); Li et al. (2023)	Jabbarzadeh, Haughton e Khosrojerdi (2018); Amin e Zhang (2013); Mirakhorli (2014); Ahmadi e Amin (2019); Ghafarimoghadam, Ghayebloo e Pishvae (2019); Poursoltan, Seyed-Hosseini e Jabbarzadeh (2021); Kazancoglu et al. (2022) Salçuk e Şahin (2022); Borajee, Tavakkoli-Moghaddam e Madani-Saatchi (2023)

Fonte: elaborada pela autora.

Os estudos de LR que se aproximam do universo dos resíduos eletroeletrônicos incluem Islam et al. (2021), cujo modelo aborda a coleta e triagem de produtos tecnológicos em redes reversas asiáticas. O foco do trabalho destaca a necessidade de pontos de coleta estrategicamente posicionados, dada a alta difusão geográfica dos resíduos eletrônicos e a variabilidade de volumes de retorno. Embora não incluam decisões de abertura em remanufatura ou reciclagem, esses estudos mostram que, sem uma estrutura inicial robusta, a cadeia reversa de REEE não consegue operar adequadamente.

Entre os estudos de CLSC com aplicação direta em resíduos eletroeletrônicos, destacam-se Salçuk e Şahin (2022), cuja pesquisa na Turquia trata explicitamente de fluxos reversos de eletrônicos. O modelo introduz decisões de abertura em centros de coleta, reconhecendo que os REEE exigem infraestrutura de triagem preliminar altamente especializada. De modo semelhante, Kazancoglu et al. (2022) analisam redes reversas para produtos tecnológicos, reforçando que a localização de pontos de depósito foi determinante para reduzir custos ambientais e operacionais.

A opção metodológica de restringir decisões de abertura às camadas iniciais revela tanto a busca por simplificação de modelos complexos quanto a percepção de que essas etapas exercem maior influência sobre o desempenho global da rede, mas ao mesmo tempo limita o

potencial de planejamento estratégico das demais camadas, o que pode reduzir a visão holística necessária para redes sustentáveis e de ciclo fechado.

A distribuição dos estudos apresentados na Tabela 7 revela um padrão sobre o comportamento da literatura no que diz respeito às decisões de abertura localizadas especificamente nas camadas intermediárias da rede, isto é, nas etapas de remanufatura e reciclagem.

TABELA 7 - DECISÕES DE ABERTURA NAS CAMADAS INTERMEDIÁRIAS

Remanufatura – Reciclagem	
LR (15)	CLSC (9)
Ameli, Mansour e Ahmadi-javid (2019); Azadeh, Ahmadzadeh e Eslami (2019); Karagoz, Aydin e Simic (2022); He et al. (2024); Suyabatmaz, Altekin e Sahin (2014); Amin e Zhang (2014); Eskandarpour, Nikbakhsh e Zegordi (2014); Ashayeri, Ma e Sotirov (2015); Li, Liu e Li (2019); Chen, Liu e Han (2024); Yu et al. (2020); Hashemi (2021); Lv et al. (2020); Xu, Jiang e Shi (2022); Mahéo, Rossit e Kilby (2023)	Sadeghi Rad e Nahavandi (2018); Darbari et al. (2019); Abbasi Daneshmand-Mehr Kanafi (2023a); Kiani Mavi et al. (2023); Liu, Tang e Zhang (2024)

Fonte: elaborada pela autora.

A diferença quantitativa entre os tipos de rede analisados foi significativa: enquanto LR reúne 15 estudos que concentram decisões nesses elos, a literatura de CLSC contabiliza 9 trabalhos. Essa discrepância foi coerente com a natureza estrutural de cada abordagem. Nos modelos de LR, considera-se comum que a tomada de decisão estratégica ocorra justamente nas etapas onde os produtos retornados passam por inspeção, desmontagem e reprocessamento, indicando que nesses elos de recuperação que se concentra o maior potencial de criação (ou perda) de valor. Já os modelos de CLSC, por integrarem explicitamente a reinserção produtiva, frequentemente assumem instalações intermediárias pré-existentes, o que reduz o número de estudos que tratam diretamente da decisão de abertura nesses estágios.

Entre os estudos classificados como LR, observa-se predominância de modelos desenvolvidos em países asiáticos e do Oriente Médio, contextos marcados por grande escala produtiva e significativa geração de resíduos industriais. Trabalhos como os de Suyabatmaz, Altekin e Sahin (2014) e Eskandarpour, Nikbakhsh e Zegordi (2014) reorganizam instalações de reciclagem e remanufatura, priorizando eficiência e custo operacional. Da mesma forma, estudos chineses, como Amin e Zhang (2014) e Ashayeri, Ma e Sotirov (2015), reforçam a importância das decisões intermediárias ao lidarem com fluxos volumosos e processos de desmontagem altamente complexos. Entre os trabalhos voltados diretamente a resíduos eletroeletrônicos, destacam-se Karagoz, Aydin e Simic (2022), Chen, Liu e Han (2024) e Li, Liu e Li (2019), cujas aplicações envolvem a recepção e processamento de dispositivos eletrônicos. Esses estudos evidenciam que, para o setor de REEE, as decisões localizadas nas etapas de remanufatura e reciclagem assumem papel central, por concentrarem o valor residual e o potencial de recuperação ambientalmente adequada.

No grupo de CLSC observa-se maior integração das camadas e maior proximidade temática com resíduos tecnológicos. Estudos como Sadeghi Rad e Nahavandi (2018), Darbari et al. (2019) e Abbasi Daneshmand-Mehr Kanafi (2023a) abordam explicitamente redes de ciclo fechado para o setor de eletrônicos, estruturando decisões nas camadas intermediárias para garantir o reaproveitamento de materiais e a reinserção produtiva. Outros autores, como Kiani Mavi et al. (2023) e Liu, Tang e Zhang (2024), reforçam essa mesma lógica ao integrarem múltiplos estágios de recuperação em modelos industriais mais amplos. Nesses estudos, a eficiência das instalações intermediárias aparece como elemento-chave para o fechamento do ciclo produtivo e a redução do descarte final.

No conjunto dos estudos analisados, especialmente aqueles aplicados a resíduos eletroeletrônicos, observa-se que as decisões de abertura nas camadas intermediárias estão fortemente associadas às etapas onde se concentram as atividades de recuperação de valor e de atendimento a requisitos ambientais. Essas etapas desempenham papel central na estruturação das redes reversas, ao conectarem os fluxos de retorno às possibilidades de reaproveitamento dos materiais.

De forma geral, a análise das diferentes configurações de decisões de abertura ao longo das camadas da rede evidencia a diversidade de estratégias adotadas na literatura, variando desde modelos que concentram decisões nas etapas iniciais até aqueles que priorizam os elos intermediários. Essa diversidade reflete diferentes enfoques de modelagem e níveis de complexidade, contribuindo para a compreensão das alternativas disponíveis para o planejamento de redes de logística reversa.

5.2.2. Decisões de Transporte

As decisões de transporte configuram-se como um dos elementos estruturais mais relevantes nos modelos de planejamento de redes de LR e CLSP, pois estabelecem a conexão operacional entre as diferentes camadas da rede e influenciam diretamente o desempenho global do sistema. Nos 44 estudos identificados nesta revisão (22 classificados como LR e 22 como CLSC), o transporte foi tratado não apenas como componente de custo logístico, mas como variável estratégica que afeta a configuração espacial da rede, o dimensionamento das capacidades, a eficiência operacional e, de forma crescente, o desempenho ambiental. Em diversos modelos, especialmente aqueles com abordagem multiobjetivo, essas decisões estão associadas à minimização de emissões de poluentes, consumo energético e pegada de carbono, ampliando sua relevância para além da ótica estritamente econômica.

De forma geral, a literatura aborda as decisões de transporte a partir de diferentes perspectivas, incluindo a definição do tipo de veículo e dimensionamento da frota, a escolha do modal de transporte, o tipo de frete adotado — como transporte dedicado ou consolidado — e a utilização de frota própria ou terceirizada. Além disso, observa-se que essas decisões estão frequentemente associadas à função objetivo dos modelos, seja ela predominantemente econômica ou estruturada sob abordagem multiobjetivo, com a incorporação de critérios ambientais, evidenciando o grau de integração entre eficiência logística e sustentabilidade.

A Tabela 8 apresenta a sistematização dos modelos analisados que incorporam decisões relacionadas ao transporte, organizando-os de acordo com essas categorias e distinguindo aqueles classificados como Logística Reversa (LR) e Cadeia de Suprimentos de Ciclo Fechado (CLSC).

TABELA 8 - CLASSIFICAÇÃO DAS DECISÕES DE TRANSPORTE NOS MODELOS ANALISADOS

Categoria de decisão de transporte	Caracterização da decisão	Modelos LR	Modelos CLSC	Relação com objetivo ambiental
Tipo de veículo / dimensionamento de frota	Definição de quantidade de veículos, capacidade, tecnologia (convencional, elétrico, híbrido)	Govindan et al. (2014); Reddy et al. (2019); Tosarkani & Amin (2020); Wang et al. (2022b); Goli et al. (2023); Kannan et al. (2023); Li et al. (2023)	Subulan et al. (2015); Shi et al. (2017); Rajak et al. (2018); Atabaki et al. (2020); Kalantari et al. (2022)	modelos minimizam emissões ou consumo energético
Escolha de modal (rodoviário, ferroviário, intermodal)	Seleção de modais alternativos com diferentes custos e fatores de emissão	—	Mohajeri & Fallah (2016); Mota et al. (2018); Yavari & Geraeli (2019); Gao (2019); Ali Erwan et al. (2022); Harijani et al. (2023)	minimização de CO ₂ e pegada de carbono
Tipo de frete (dedicado vs. consolidado)	Transporte exclusivo ou consolidação de cargas	Tosarkani & Amin (2020)	Subulan et al. (2015); Rajak et al. (2018); Rouhani et al. (2024)	redução de viagens e emissões indiretas
Frota própria vs. terceirizada	Decisão estratégica de investimento ou contratação	Govindan et al. (2014)	Garg et al. (2015); Rafigh et al. (2021); Kalantari Khalil Aba et al. (2023)	eficiência operacional e nível de controle ambiental

Fonte: elaborada pela autora.

A Tabela 8 permite visualizar, de forma comparativa, como cada estudo operacionaliza as decisões de transporte, seja por meio da definição do tipo de veículo, escolha modal, regime de frete ou estratégia de gestão da frota, bem como identificar sua vinculação com objetivos econômicos ou ambientais. Essa organização evidencia padrões recorrentes na literatura e diferenças estruturais entre os modelos, contribuindo para uma análise mais aprofundada do papel do transporte no desempenho das redes reversas.

A análise do cruzamento entre decisões de transporte e tipo de função objetivo evidencia diferenças relevantes na forma como o transporte foi modelado nos estudos revisados. Nos modelos com objetivo predominantemente econômico, o transporte foi geralmente representado como um custo unitário proporcional à distância percorrida e ao volume transportado, sendo incorporado à função objetivo como componente do custo logístico total. Nesses casos, observa-se pouca diferenciação tecnológica entre tipos de veículos ou modais, prevalecendo uma abordagem agregada do custo de transporte. Estudos como Govindan et al. (2014), Reddy, Kumar e Ballantyne (2019) e Tosarkani e Amin (2020), quando estruturados sob enfoque econômico, tratam o transporte principalmente como variável operacional associada à minimização de custos totais da rede, com ênfase na eficiência da coleta e na consolidação de cargas.

Por outro lado, nos modelos multiobjetivo, que combinam metas econômicas e ambientais, o transporte passa a assumir um papel mais estratégico. Nesses trabalhos, a modelagem incorpora fatores explícitos de emissão de CO₂, consumo de combustível ou indicadores de impacto ambiental associados às atividades logísticas. Mota et al. (2018), Atabaki, Mohammadi e Naderi (2020), Kalantari et al. (2022) e Harijani, Mansour e Fatemi (2023) incluem restrições de carbono ou funções objetivo específicas voltadas à minimização de emissões, influenciando diretamente decisões sobre escolha modal, tecnologia veicular e consolidação de fluxos. Em alguns casos, a seleção de modais menos intensivos em carbono ou a adoção de veículos com menor impacto ambiental passa a integrar a estrutura decisória do modelo. Assim, nos modelos multiobjetivo, o transporte deixa de ser tratado apenas como componente operacional de custo e passa a constituir uma variável estratégica associada ao desempenho ambiental da rede.

A comparação entre modelos de LR e de CLSC também revela distinções importantes. Nos modelos classificados como LR, há maior concentração em decisões de roteirização e dimensionamento de frota para coleta de resíduos dispersos geograficamente, como evidenciado em trabalhos como Wang et al. (2022b), Goli et al. (2023) e Kannan et al. (2023).

Nesses estudos, a preocupação central reside na eficiência da coleta e na redução dos custos associados ao transporte entre pontos de geração e centros de triagem ou reciclagem.

Já nos modelos CLSC, verifica-se maior complexidade estrutural, uma vez que o transporte precisa integrar fluxos diretos (produtos novos) e reversos (retornos pós-consumo). Trabalhos como Subulan, Taşan e Baykasoğlu (2015), Mohajeri e Fallah (2016) e Mota et al. (2018) ilustram essa integração, incorporando decisões que envolvem sincronização logística e, em alguns casos, análise intermodal. As decisões relacionadas à escolha de modais alternativos e à coordenação entre diferentes fluxos aparecem predominantemente nesse grupo, ampliando o escopo estratégico do transporte.

Adicionalmente, a integração de objetivos ambientais foi mais recorrente nos modelos CLSC multiobjetivo, nos quais o transporte desempenha papel central na mitigação de impactos ao longo de toda a cadeia fechada. Essa tendência sugere que, à medida que os modelos evoluem para incorporar metas de sustentabilidade, o transporte se consolida como um dos principais vetores de alinhamento entre eficiência econômica e responsabilidade ambiental, especialmente em redes que integram múltiplos ciclos de valor.

No contexto da logística reversa de resíduos de equipamentos eletroeletrônicos (REEE), as decisões de transporte assumem relevância ainda maior em função da dispersão geográfica dos pontos de geração, da heterogeneidade dos volumes coletados e da necessidade de consolidação eficiente para viabilizar economicamente a reciclagem e a remanufatura. Diferentemente de cadeias convencionais, o transporte de REEE frequentemente envolve cargas de baixo volume unitário e alta variabilidade espacial, o que intensifica a importância das decisões de dimensionamento de frota e consolidação de cargas. Além disso, considerando que esses resíduos podem conter substâncias perigosas, aspectos ambientais associados às emissões de poluentes e à eficiência energética tornam-se particularmente relevantes em modelos orientados à sustentabilidade. Assim, para redes de REEE, o transporte não representa apenas um custo logístico, mas um elemento crítico para a viabilidade econômica e o desempenho ambiental da cadeia reversa.

5.2.3. Decisões de Estoque e Capacidade

As decisões de armazenagem e posicionamento de estoques desempenham papel importante no planejamento de redes de logística reversa (LR) e de cadeias de suprimentos de ciclo fechado (CLSC), especialmente em sistemas que lidam com retornos incertos, variações de volume e tempos de recuperação. O gerenciamento dos níveis de estoque em pontos como

planta de produção, coleta, depósito e reciclagem define a capacidade da rede de absorver oscilações no fluxo de devoluções, armazenar produtos ou componentes aguardando remanufatura e manter o sincronismo entre suprimento e demanda em ciclos fechados.

Em cadeias que tratam de resíduos eletroeletrônicos (REEE/WEEE), essa relevância se intensifica. Os produtos retornados apresentam elevada variabilidade de estado, complexidade de desmontagem e composição heterogênea, o que exige a consideração de estoques intermediários para garantir a continuidade operacional e evitar gargalos no processo de recuperação.

As decisões de capacidade e estoque configuram-se como componentes estruturais interdependentes no planejamento dessas redes. Embora nem todos os modelos explicitem o estoque como variável de decisão independente, a análise das formulações matemáticas evidencia que, em grande parte dos estudos, a definição da capacidade das instalações atua como elemento limitador do volume máximo processado ou armazenado ao longo da rede. Assim, a decisão de abertura frequentemente está associada à escolha de um nível de capacidade, que, por sua vez, determina a quantidade potencial de materiais que pode ser acumulada ou processada em determinado período.

Entre os estudos analisados, 44 incorporam explicitamente decisões de estoque, sendo 21 classificados como LR e 23 como CLSC, conforme apresentado na Tabela 9.

TABELA 9 - DECISÕES DE ESTOQUE

LR (21)			
Planta de Produção	Coleta	Depósito	Reciclagem
Govindan et al. (2014) Mirmajlesi e Shafaei (2016) Vali-siar e Roghanian (2022) Torshizi, Bozorgi-amiri e Sabouhi (2024) Rajabzadeh, Mousavi e Azimi (2024)	Tari e Alumur (2014) Ghezavati e Nia (2015) Pouriani, Asadi-gangraj, Paydar (2019) Budak (2020) Lu et al. (2020) Defalque, Da Silva e Marins (2021) Wang, Huang e He (2021) Li et al. (2023) Mu et al. (2023)	John, Sridharan e Kumar (2017) Reddy, Kumar e Ballantyne (2019) Chen, Liu e Han (2024) Zhang, Berenguer e Zhang (2024)	Asghari, Abrishami e Mahdavi (2014) Ashayeri, Ma e Sotirov (2015) Alshamsi e Diabat (2017)
CLSC (23)			
Planta de Produção	Coleta	Depósito	Reciclagem
Subulan, Taşan e Baykasoglu (2015) Tokhmehchi, Makui e Sadi-Nezhad (2015) Entezaminia, Heidari e Rahmani (2017) Mota et al. (2018) Jabbarzadeh, Haughton e Khosrojerdi (2018) Ahmadi e Amin (2019) Bas e Ozkok (2020) Esmacilbeigi et al. (2021) Nili et al. (2021) Purnomo et al. (2022) Harjani, Mansour e Fatemi (2023)	Sadeghi Rad e Nahavandi (2018) Sadeghi Rad e Nahavandi (2018) Yavari e Geraeli (2019)	Fakhrzad e Goodarzian (2019) Jabarzadeh et al. (2020) Ozgun Polat e Gungor (2021) Abdolazimi et al. (2022) Seydanlou et al. (2022) Kalantari Khalil Aba, Barzinpour e Pishvae (2023)	Demirel et al. (2014) Cilaci Tombuş, Aras e Verter (2017)

Fonte: elaborada pela autora.

Os resultados indicam que, embora a gestão de estoques seja um elemento crítico para a dinâmica da cadeia reversa, sua incorporação nos modelos de otimização foi menos frequente do que decisões relativas à localização, transporte ou capacidade. Ainda assim, os estudos que contemplam essa dimensão o fazem de forma estratégica, utilizando-a para estabilizar o sistema e lidar com a imprevisibilidade dos retornos, característica central em cadeias de produtos usados, especialmente no caso de resíduos eletroeletrônicos.

Os 21 estudos classificados como LR evidenciam que grande parte dessas decisões ocorre na planta de produção, onde são armazenados produtos recuperados, componentes desmontados ou itens que aguardam remanufatura. Autores como Govindan et al. (2014) e Mirmajlesi e Shafaei (2016) tratam de redes reversas sujeitas a retornos incertos, utilizando estoques para amortecer oscilações de oferta e evitar interrupções na linha produtiva. Estudos mais recentes, como Vali-Siar e Roghanian (2022) e Torshizi, Bozorgi-amiri e Sabouhi (2024), reforçam essa lógica ao abordarem sistemas industriais com forte volatilidade de devoluções, empregando decisões de armazenagem para equilibrar o ritmo entre coleta, inspeção e processamento.

Nas redes reversas aplicadas a resíduos eletroeletrônicos, essa necessidade foi ainda mais evidente. Rajabzadeh, Mousavi e Azimi (2024) mostram que o armazenamento temporário se torna indispensável quando se trabalha com equipamentos eletrônicos, cujo estado físico, composição e aproveitamento de partes variam amplamente. Nesses modelos, os estoques funcionam como *buffers* entre triagem e desmontagem, garantindo regularidade no abastecimento das etapas de reciclagem e remanufatura.

No conjunto dos 23 estudos classificados como CLSC, observa-se diversidade de pontos de estoque distribuídos ao longo da cadeia, incluindo planta de produção, coleta, depósito e reciclagem. Em cadeias de ciclo fechado, o estoque desempenha ainda a função de sincronizar a reinserção do produto recuperado no mercado, equilibrando oferta e demanda em cenários com múltiplos ciclos. Subulan, Taşan e Baykasoğlu (2015) e Tokhmehchi, Makui e Sadi-Nezhad (2015) tratam o estoque na planta como variável essencial para absorver componentes remanufaturados antes da montagem final. Já Entezaminia, Heidari e Rahmani (2017) incorporam estoques nas unidades de coleta para lidar com padrões de retorno altamente variáveis, especialmente em setores de bens duráveis.

Nos modelos analisados, especialmente nas camadas de coleta e depósito, a variável binária de abertura foi acompanhada por restrições de capacidade que vinculam fluxos de entrada e saída. Trabalhos como Tari e Alumur (2014), Ghezavati e Nia (2015) e Defalque, Da Silva e Marins (2021), no contexto de LR, associam a abertura de pontos de coleta à definição

de limites operacionais de recebimento. De modo semelhante, nos modelos CLSC, como Subulan, Taşan e Baykasoğlu (2015) e Kalantari Khalil Aba, Barzinpour e Pishvae (2023), observa-se a adoção de múltiplos níveis de capacidade ou decisões de expansão, evidenciando maior sofisticação estrutural.

Em modelos multi-período, como os de Yu e Solvang (2016b) e Ghezavati e Nia (2015) a decisão de capacidade assume papel ainda mais relevante, pois passa a interagir com variáveis de estoque ao longo do tempo. Nessas situações, o estoque pode ser modelado explicitamente como variável de estado, incluindo equações de balanço que consideram volumes acumulados entre períodos. Em outros casos, o estoque não foi formalmente definido, mas encontra-se implícito nas restrições de fluxo e capacidade máxima, configurando uma abordagem agregada de armazenamento.

No contexto da LR de REEE, as decisões de capacidade e estoque tornam-se particularmente críticas em função da elevada incerteza associada à geração e ao retorno desses resíduos. Diferentemente de cadeias produtivas tradicionais, a quantidade, o momento e a localização da geração de REEE são altamente variáveis, influenciados por fatores como ciclos tecnológicos curtos, comportamento do consumidor, obsolescência programada e políticas de coleta.

Essa variabilidade impõe desafios significativos ao dimensionamento das instalações. Uma capacidade subdimensionada pode gerar gargalos operacionais e acúmulo excessivo de resíduos, enquanto uma capacidade superdimensionada pode comprometer a viabilidade econômica da rede. Nesse contexto, modelos que incorporam incerteza (programação estocástica, otimização robusta ou análise de cenários) tendem a atribuir maior importância às decisões de capacidade, buscando equilibrar flexibilidade operacional e eficiência econômica.

Adicionalmente, o estoque em redes de REEE não representa apenas uma variável logística, mas também um fator ambiental e regulatório. O armazenamento prolongado de resíduos eletroeletrônicos pode implicar riscos associados a substâncias perigosas presentes em determinados componentes, reforçando a necessidade de sincronização entre capacidade de processamento e volume coletado. Assim, a integração entre abertura, capacidade e controle de estoque assume papel estratégico na mitigação de riscos ambientais e na conformidade com regulamentações relacionadas à gestão de resíduos.

Aplicados ao setor de eletrônicos, Demirel et al. (2014) e Cilaci Tomuş, Aras e Verter (2017), ambos no contexto turco, tratam a reciclagem de equipamentos eletrônicos e preveem estoques na etapa de reciclagem, permitindo o acúmulo de materiais desmontados para posterior processamento. Esses estudos reforçam que, no setor de REEE, o estoque desempenha função

estabilizadora não apenas no início, mas também nas etapas finais da cadeia, contribuindo para o balanceamento entre a chegada de materiais e a capacidade de processamento das instalações.

Dessa forma, no planejamento de redes reversas de REEE, as decisões de capacidade e estoque não devem ser tratadas como aspectos secundários, mas como elementos centrais para garantir robustez operacional, viabilidade econômica e desempenho ambiental da rede, especialmente em cenários caracterizados por elevada incerteza e variabilidade dos fluxos.

Na análise realizada das principais decisões que estruturam e operam as redes de logística reversa: abertura e localização de instalações, tipo de transporte e estoque, observa-se que os modelos apresentam diferentes níveis de complexidade e integração, refletindo distintos enfoques de modelagem e objetivos de otimização.

A partir dessa compreensão das decisões, torna-se possível avançar para a análise das restrições que sustentam esses modelos. Enquanto as decisões definem os elementos configuráveis da rede, as restrições estabelecem os limites operacionais, tecnológicos, ambientais e regulatórios que condicionam sua implementação. A seção a seguir examina as principais categorias de restrições presentes na literatura, destacando suas funções e relevância no planejamento de redes de logística rev.

5.3. RESTRIÇÕES

Após a análise das decisões que estruturam os modelos de otimização para redes de logística reversa, torna-se necessário examinar as restrições que condicionam a implementação dessas decisões. Enquanto as decisões definem os elementos configuráveis da rede, as restrições estabelecem os limites dentro dos quais essas escolhas podem ser realizadas, refletindo condições operacionais, tecnológicas, ambientais e regulatórias.

Nos modelos analisados na literatura, as restrições desempenham papel fundamental na representação do funcionamento da rede, garantindo a consistência entre fluxos, capacidades e demandas. De forma geral, essas restrições estão associadas ao balanço de fluxos, limites de capacidade das instalações e atendimento da demanda, além da incorporação de aspectos ambientais e operacionais, especialmente em modelos voltados à sustentabilidade.

A forma como essas restrições são formuladas varia de acordo com o tipo de modelo, o nível de detalhamento adotado e os objetivos considerados, refletindo diferentes estratégias de modelagem para representar a complexidade das redes de logística reversa. A seguir, são analisadas as principais categorias de restrições identificadas na literatura, destacando seus

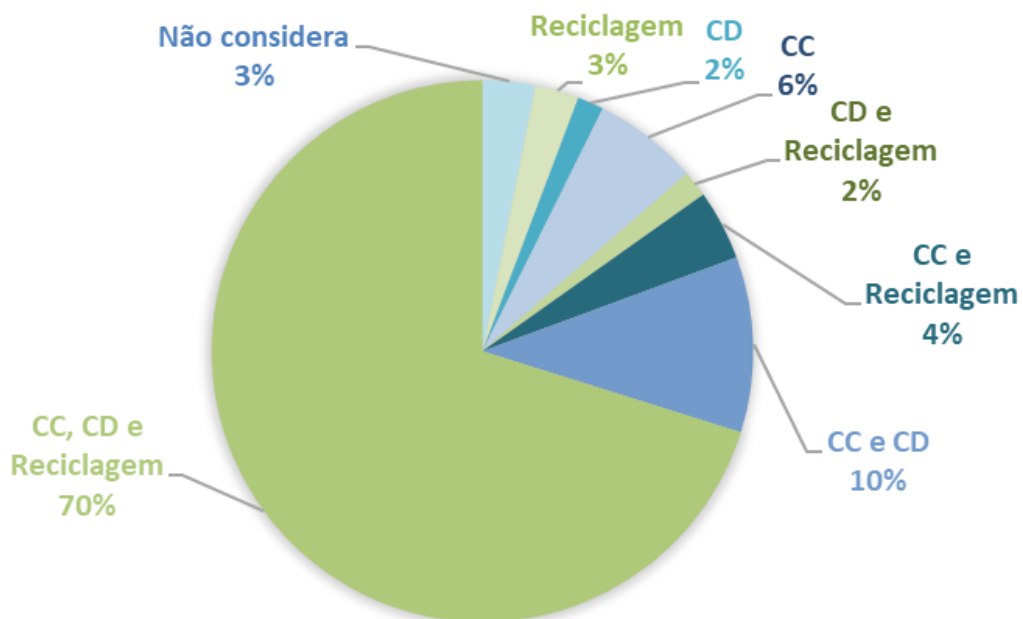
padrões de uso e sua relevância para o planejamento de redes de logística reversa, com ênfase em aplicações voltadas a resíduos eletroeletrônicos.

5.3.1. Restrições de Capacidade

As restrições de capacidade constituem um dos elementos estruturais mais relevantes nos modelos de otimização aplicados às redes de LR e de CLSC, pois estabelecem os limites operacionais dentro dos quais as decisões de configuração da rede podem ser implementadas. Em redes reversas, especialmente aquelas voltadas ao tratamento de resíduos eletroeletrônicos (REEE), esses limites são fundamentais, uma vez que regulam o volume máximo de produtos ou materiais que podem ser coletados, armazenados, triados, desmontados, reciclados ou reinseridos no sistema produtivo.

A Figura 14 apresenta a distribuição das restrições de capacidade nas diferentes camadas da rede, evidenciando como esses limites são incorporados nos modelos analisados.

FIGURA 14 - RESTRIÇÕES DE CAPACIDADE



Fonte: elaborada pela autora.

CC – centro de coleta; CD – centro de distribuição

A análise das restrições de capacidade evidencia que a grande maioria dos estudos incorpora limites operacionais em múltiplas camadas da rede. Dos modelos analisados, 133 incluem restrições simultâneas nas etapas de coleta, depósito e reciclagem, demonstrando que a literatura reconhece a capacidade instalada como fator determinante para o desempenho da rede reversa.

Na prática, essa predominância reflete o fato de que o fluxo de retorno foi caracterizado por elevada incerteza e variabilidade, exigindo a imposição de limites realistas para evitar sobrecarga em unidades de coleta, falta de espaço em depósitos intermediários e estrangulamento das instalações de reciclagem. Esse aspecto foi particularmente crítico no caso de REEE, dada sua composição complexa e a necessidade de processos específicos de desmontagem e separação de componentes.

Os demais grupos, como estudos que consideram restrições apenas na coleta (12), apenas na reciclagem (5) ou em pares de camadas (como coleta e depósito, com 20 estudos), revelam abordagens mais seletivas, mas ainda assim centradas na compreensão de que a capacidade define o ritmo e a viabilidade das operações logísticas. Apenas 6 estudos não incorporam restrições de capacidade, o que confirma a maturidade da literatura ao tratar esse aspecto como componente indispensável para representar a realidade física das redes reversas.

Dessa forma, a predominância de modelos que incorporam restrições integradas de capacidade reforça a importância desse tema no planejamento de redes de logística reversa e de ciclo fechado. Em sistemas que lidam com REEE, ignorar esses limites implicaria a construção de modelos incapazes de refletir a prática operacional, na qual gargalos de capacidade podem comprometer o desempenho de toda a cadeia.

Após a análise das restrições de capacidade, torna-se relevante examinar um segundo conjunto de restrições igualmente decisivo para o funcionamento dos modelos: as restrições de estoque.

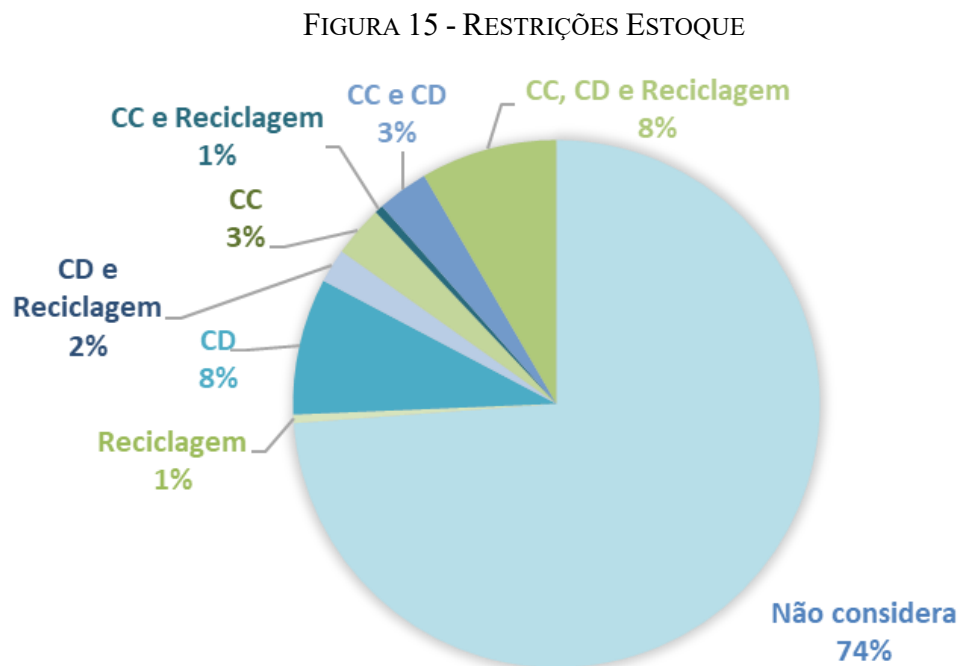
5.3.2. Restrições de Estoque

As restrições de estoque representam um componente importante para o funcionamento eficiente das redes de LR e CLSC. Diferentemente das restrições de capacidade, que limitam o volume máximo de processamento em cada instalação, as restrições de estoque definem como os produtos retornados, componentes desmontados e materiais recicláveis podem ser armazenados ao longo da cadeia. Esse tipo de restrição assume papel especialmente relevante em sistemas de resíduos eletroeletrônicos (REEE), nos quais a variabilidade dos retornos, o estado físico heterogêneo dos itens e a dependência de processos de desmontagem tornam o armazenamento um elemento crítico para evitar congestionamentos, equilibrar fluxos e garantir regularidade ao processo de recuperação.

Apesar de sua relevância, as restrições de estoque são menos frequentemente incorporadas nos modelos de logística reversa. Conforme ilustrado na Figura 19, 74% dos

modelos analisados desconsideraram o gerenciamento de estoque em qualquer estágio da rede. Essa omissão foi relevante, uma vez que a variabilidade e a imprevisibilidade dos retornos podem gerar desequilíbrios na capacidade de processamento e na alocação de recursos.

A incorporação de restrições de estoque, particularmente em plantas de recuperação, contribui para aumentar a eficiência do sistema ao suavizar flutuações nos volumes de retorno, prevenir gargalos de capacidade e otimizar o tempo de reciclagem e remanufatura. A Figura 15 ilustra a distribuição das restrições de estoque nos modelos analisados.



Fonte: elaborada pela autora.

Essa distribuição indica que uma parcela significativa dos modelos pode subestimar as complexidades operacionais associadas à logística reversa. Os *buffers* de estoque desempenham papel fundamental ao evitar gargalos, permitir o processamento em escala e oferecer flexibilidade frente a volumes de retorno flutuantes. Por exemplo, centros de coleta que acumulam produtos antes do transporte podem reduzir custos logísticos, enquanto centros de distribuição que mantêm produtos recondicionados possibilitam melhor atendimento à demanda. Nesse sentido, a não consideração explícita da dinâmica de estoque pode levar à construção de modelos pouco realistas, incapazes de capturar desafios operacionais relevantes, como limitações de espaço, obsolescência de produtos ou atrasos nos processos de reciclagem.

Observa-se, portanto, que a literatura ainda trata as restrições de estoque como um aspecto secundário, frequentemente assumindo condições ideais de armazenamento ou

simplificando sua representação para reduzir a complexidade computacional dos modelos. Entretanto, diante da crescente demanda por abordagens que representem de forma mais fiel as operações de redes reversas, especialmente no setor de eletrônicos, evidencia-se uma lacuna relevante a ser explorada em pesquisas futuras.

A Tabela 10 apresenta os estudos que incorporam restrições de estoque em diferentes camadas da rede de logística reversa e de ciclo fechado, abrangendo pontos como coleta, depósito e reciclagem. Esses modelos pertencem tanto à abordagem de CLSC quanto à de LR, evidenciando que, embora menos frequentes, as restrições de estoque são consideradas em configurações estratégicas específicas de cada tipo de rede.

TABELA 10 - RESTRIÇÕES DE ESTOQUE

a) CLSC

CLSC		
Coleta	Depósito	Reciclagem
Jabarzadeh et al. (2020) Pouriani, Asadi-gangraj, Paydar (2019)	Asghari, Abrishami e Mahdavi (2014) Rajabzadeh, Mousavi e Azimi (2024) Fakhrzad e Goodarzian (2019) Golpîra e Javanmardan (2021) Govindan et al. (2014) Zhang, Berenguer e Zhang (2024)	Tosarkani e Amin (2020)
Coleta, Depósito e Reciclagem		Coleta e Reciclagem
Nili et al. (2021); Sadeghi Rad e Nahavandi (2018); Budak (2020); Purnomo et al. (2022); Aljuneidi e Bulgak (2020); Tokhmehchi, Makui e Sadi-Nezhad (2015)		Aviso et al. (2023)
Coleta e Depósito		Depósito e Reciclagem
Borajee, Tavakkoli-Moghaddam e Madani-Saatchi (2023); Ghafarimohadam, Ghayebloo e Pishvae (2019); Esmailbeigi et al. (2021)		John, Sridharan e Kumar (2017) Dehghan et al. (2019)

b) LR

LR		
Coleta	Depósito	
Defalque, Da Silva e Marins (2021) Ziari e Sajadieh (2022) Jabbarzadeh, Haughton e Khosrojerdi (2018) Li et al. (2023)	Seydanlou et al. (2022) Mota et al. (2018) Reddy, Kumar e Ballantyne (2019) Ashayeri, Ma e Sotirov (2015) Harjjani, Mansour e Fatemi (2023) Abdolazimi et al. (2022) Ghezavati e Nia (2015) Ozgur Polat e Gungor (2021)	
Coleta, Depósito e Reciclagem		
Abbasi, Daneshmand-Mehr e Kanafi (2023b); Yavari e Geraeli (2019); Biçe e Batun (2021); Subulan, Taşan e Baykasoğlu (2015) Entezaminia, Heidari e Rahmani (2017); Chen, Liu e Han (2024); Wang, Huang e He (2021); Alshamsi e Diabat (2017); Zarbakhshnia et al. (2020)		
Coleta e Depósito		Depósito e Reciclagem
Cao et al. (2022) Lu et al. (2020) Tari e Alumur (2014)		Kalantari Khalil Aba, Barzinpour e Pishvae (2023) Tadaros et al. (2022)

Fonte: elaborada pela autora.

Nos estudos classificados como CLSC (Tabela 10a), observa-se que as restrições de estoque são frequentemente associadas à etapa de coleta ou à combinação entre coleta, depósito e reciclagem, indicando que os autores procuram representar a dinâmica dos retornos e o acúmulo de materiais ao longo da cadeia. Modelos como os de Jabbarzadeh et al. (2020), desenvolvidos no contexto canadense, e Pouriani, Asadi-Gangraj e Paydar (2019), no contexto iraniano, destacam a necessidade de controlar o volume armazenado nos pontos de coleta para equilibrar oscilações de retorno, especialmente em redes que lidam com produtos complexos e de alta variabilidade, como os bens duráveis.

Uma parcela relevante dos estudos de CLSC combina restrições de estoque em múltiplas camadas, como coleta, depósito e reciclagem, evidenciando maior maturidade estrutural. Trabalhos como os de Nili et al. (2021) e Sadeghi Rad e Nahavandi (2018), que operam em ambientes industriais asiáticos e inserem limites de armazenamento ao longo de todo o fluxo reverso. Essa abordagem foi particularmente relevante quando o objetivo tem a tendência de reduzir o risco de gargalos e sincronizar o fluxo de materiais entre as etapas de desmontagem e reciclagem. Entre esses estudos, destacam-se também aqueles aplicados a resíduos eletroeletrônicos, nos quais o armazenamento de placas, baterias e módulos exige cuidados específicos, tanto no manuseio quanto no tempo de permanência.

No grupo de LR (Tabela 10b), as restrições de estoque também estão presentes, ainda que com menor diversidade de combinações. Um exemplo significativo foi o estudo de Defalque, Da Silva e Marins (2021), aplicado no contexto brasileiro, que considera restrições de estoque na coleta, refletindo a necessidade de controlar o volume recebido para evitar sobrecargas nos centros de consolidação. Estudos dessa natureza reconhecem que, em redes reversas, a variabilidade dos retornos pode gerar acúmulo temporário de materiais que precisa ser controlado por limitações de armazenamento. Outros trabalhos de LR incluem restrições nos depósitos e na reciclagem, especialmente em ambientes industriais asiáticos, onde o fluxo de componentes desmontados, em particular de eletroeletrônicos, exige disponibilidade constante de espaço de armazenagem intermediária.

Entre os trabalhos relacionados diretamente a REEE, destacam-se as pesquisas de Kalantari Khalil Aba, Barzinpour e Pishvae (2022) e Tadaros et al. (2022), que tratam da reciclagem de equipamentos eletrônicos nos contextos iraniano e egípcio, respectivamente. Nesses modelos, as restrições de estoque aparecem nas etapas de depósito e reciclagem, refletindo o comportamento típico das cadeias de recuperação de eletrônicos, nas quais os materiais desmontados precisam aguardar etapas subsequentes de triagem, separação ou processamento químico. A inclusão dessas restrições evidencia uma compreensão mais

aprofundada das características dos REEE, cuja variabilidade de composição e tempo de processamento exige gestão rigorosa do espaço disponível.

De forma geral, a análise das restrições evidencia o papel estrutural que essas categorias desempenham na formulação de modelos de otimização aplicados às redes de LR de CLSC. As restrições de capacidade, amplamente presentes na literatura, mostram-se consolidadas como elemento essencial para representar os limites físicos e operacionais das instalações ao longo das diferentes camadas da rede. Em contraste, as restrições de estoque são significativamente menos frequentes, apesar de sua importância para lidar com a variabilidade dos retornos e a sincronização entre as etapas do processo reverso.

Essa assimetria revela que, embora os modelos tenham avançado na representação dos limites de processamento, ainda há simplificações relevantes no tratamento do armazenamento, frequentemente assumido como ilimitado ou secundário. No contexto dos resíduos eletroeletrônicos (REEE), essa lacuna foi particularmente crítica, uma vez que a ausência de restrições de estoque pode mascarar gargalos operacionais, riscos ambientais e limitações físicas das instalações, comprometendo a aderência dos modelos às condições reais de operação.

Além das restrições de capacidade e de estoque, observa-se que os modelos analisados incorporam de forma recorrente restrições de balanço de fluxo, responsáveis por garantir a conservação de materiais entre as diferentes camadas da rede. Essas restrições apresentam estrutura relativamente padronizada na literatura e, por essa razão, não configuram elemento diferenciador entre os modelos.

Adicionalmente, identificam-se restrições associadas ao atendimento da demanda, tanto em sua forma total quanto parcial, sendo esta última considerada em um número mais restrito de estudos. A possibilidade de atendimento parcial da demanda introduz maior flexibilidade aos modelos, permitindo representar situações em que nem todo o volume coletado ou processado torna-se necessariamente absorvido pelo sistema. Por fim, observam-se ainda restrições específicas, de natureza operacional, ambiental ou regulatória, que variam conforme o contexto de aplicação e o nível de detalhamento dos modelos.

Em conjunto, essas restrições complementam a estrutura básica dos modelos e contribuem para garantir sua consistência operacional, embora não apresentem o mesmo grau de variabilidade e impacto estrutural observado nas restrições de capacidade e de estoque.

A análise das restrições permite compreender não apenas os limites considerados na modelagem, mas também o grau de realismo e maturidade das abordagens propostas na

literatura. A partir dessa base, torna-se possível avançar para a análise dos métodos de solução empregados nos modelos, apresentada na seção seguinte.

5.4. FUNÇÃO OBJETIVO

As funções objetivo constituem o núcleo dos modelos de otimização aplicados à Logística Reversa (LR) e às redes de Closed Loop Supply Chain (CLSC), pois definem os critérios a serem otimizados e orientam as decisões estruturais e operacionais da rede. Esses modelos buscam equilibrar eficiência econômica e sustentabilidade ambiental, considerando componentes como coleta, desmontagem, triagem, remanufatura, reciclagem, armazenamento e destinação final, geralmente coordenados por operadores logísticos (Gaur et al., 2017).

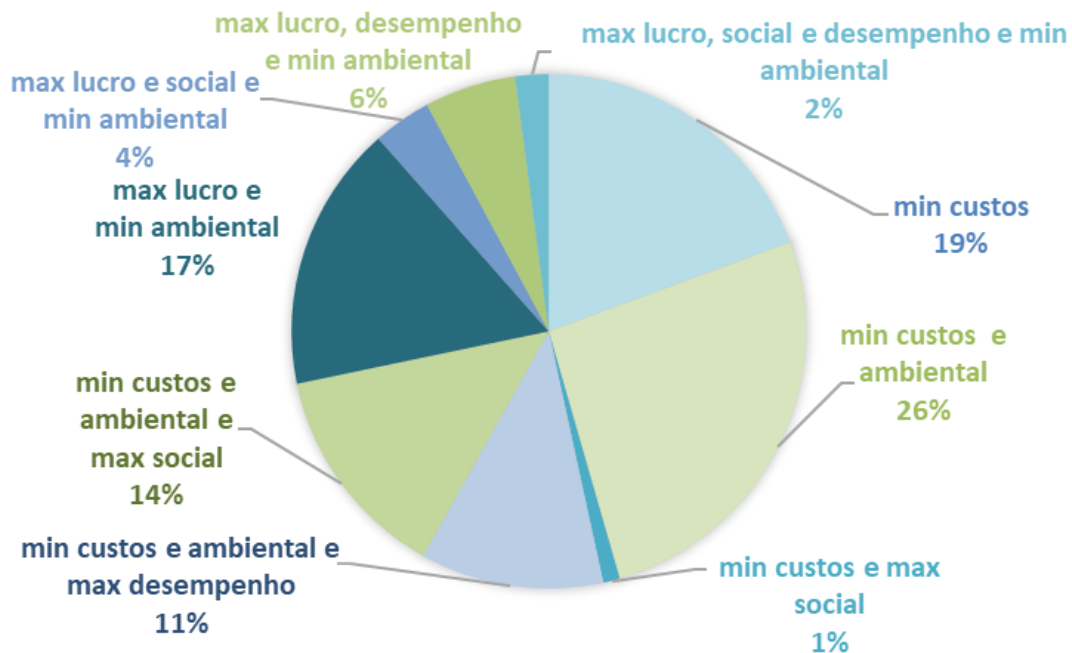
A otimização desses processos envolve a consideração de diversos fatores, incluindo custos de coleta e desmontagem, despesas de tratamento, capacidade de processamento e receitas associadas à recuperação de materiais (Tavana et al., 2022). Além disso, os fluxos de materiais entre instalações, bem como influências externas, como políticas governamentais e incentivos à reciclagem, desempenham papel relevante na definição das estratégias adotadas nos modelos.

No contexto dos resíduos de equipamentos eletroeletrônicos (REEE), essa complexidade se intensifica, uma vez que a variabilidade dos retornos, a heterogeneidade dos materiais e as exigências regulatórias demandam abordagens que integrem múltiplos critérios de desempenho. Nesse sentido, compreender as funções objetivo adotadas — sejam voltadas à minimização de custos, à maximização de lucros ou estruturadas sob abordagens multiobjetivo — torna-se fundamental para orientar o desenvolvimento de modelos mais aderentes às condições reais de operação (Ongondo et al., 2011).

A análise das funções objetivo permite identificar como diferentes abordagens priorizam aspectos como viabilidade econômica, eficiência no uso de recursos e conformidade ambiental, evidenciando as compensações inerentes aos sistemas de logística reversa.

A Figura 16 apresenta a classificação das funções objetivo identificadas nos modelos analisados, distinguindo abordagens de objetivo único e multiobjetivo. Observa-se que apenas 19% dos modelos adotam uma função objetivo única, predominantemente voltada à minimização de custos. Embora a eficiência econômica seja um fator central na logística reversa, esse enfoque isolado tende a desconsiderar dimensões relevantes de sustentabilidade e desempenho, especialmente em sistemas complexos como os de REEE.

FIGURA 16 - OBJETIVOS



Fonte: elaborada pela autora.

As considerações de custo constituem o principal foco dos modelos de otimização em logística reversa, influenciando a tomada de decisão em diferentes estágios do sistema. A Tabela 11 apresenta os estudos classificados como monoobjetivo, organizados de acordo com as funções objetivo adotadas.

TABELA 11 - ARTIGOS MONO OBJETIVO

Minimizar Custos
Asghari, Abrishami e Mahdavi (2014); Roghanian e Pazhoheshfar (2014); Thoney et al. (2020); Esmaeilbeigi et al. (2021); Ghafarimoghadam, Ghayebloo e Pishvae (2019); Özceylan e Paksoy (2013); Park et al. (2021); Rosenberg et al. (2023); Sadjadi, Soltani e Eskandarpour (2014); Suyabatmaz, Altekin e Sahin (2014); Tadaros et al. (2022); Ashayeri, Ma e Sotirov (2015); Borajee, Tavakkoli-Moghaddam e Madani-Saatchi (2023); Dehghan et al. (2019); Temucin e Tuzkaya (2020); Hatefi et al. (2015); Wang et al. (2022a); Jabbarzadeh, Haughton e Khosrojerdi (2018); Vahdani e Mohammadi (2015); Vahdani et al. (2013); Paydar e Olfati (2018); Pouriani, Asadi-gangraj, Paydar (2019); Ghezavati e Nia (2015); Banguera et al. (2018); Islam et al. (2021); Kilic, Cebeci e Ayhan (2015); Cavallin et al. (2020); He et al. (2024); Liu, Tang e Zhang (2024); Karagoz, Aydin e Simic (2022); Lu et al. (2020); Amin e Zhang (2013); Santos-Penate, Suarez-Vega e De la Nuez (2023); Pourjavad e Mayorga (2019); Yu e Tong (2021) Chen et al. (2015); Temur e Yanik (2017);

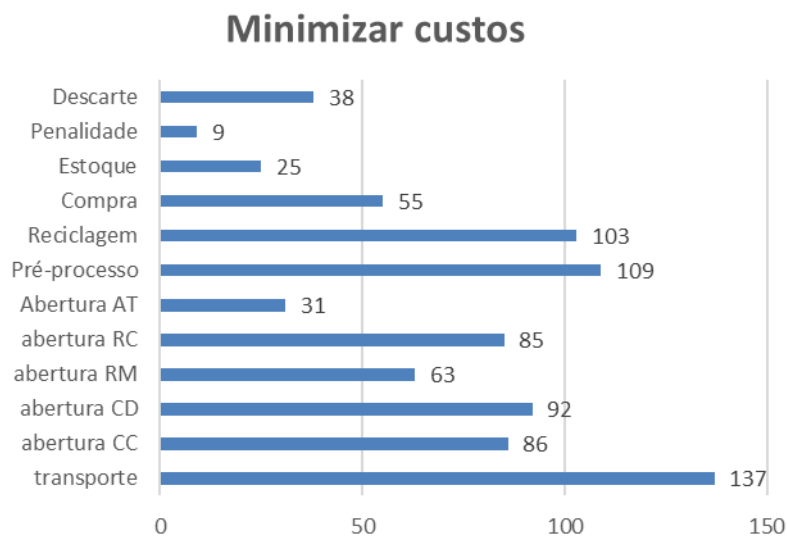
Fonte: elaborada pela autora.

A análise desses modelos evidencia a predominância de funções objetivo voltadas à minimização de custos, com destaque para os custos de transporte, presentes em 100% dos modelos. Esse resultado ressalta o papel crítico da logística no desempenho global das redes reversas, especialmente considerando a dispersão geográfica dos pontos de coleta e os volumes

reduzidos de retorno, que tornam o transporte um dos principais determinantes da eficiência operacional.

A Figura 17 apresenta a distribuição dos principais componentes de custo considerados nos modelos analisados. Observa-se que os custos de pré-processamento: incluindo inspeção, desmontagem e triagem, aparecem em 79% dos modelos, refletindo a complexidade do tratamento dos resíduos e a necessidade de preparar os materiais para reciclagem ou reinserção no mercado.

FIGURA 17 - MINIMIZAR CUSTOS



Fonte: elaborada pela autora.

Nota: Legenda: AT-Aterro; RC – Recicladora; RM – Remanufatura; CD-Centro de Distribuição; CC – Centro de Coleta.

Os custos de reciclagem são considerados em 75% dos modelos, evidenciando a importância de incorporar a viabilidade econômica dos processos de recuperação de materiais. Esses resultados indicam que a literatura prioriza a representação detalhada das etapas operacionais diretamente associadas ao processamento dos resíduos.

Já as penalidades associadas ao não atendimento da demanda aparecem em apenas 6% dos modelos, sugerindo que a maioria das abordagens privilegia custos operacionais em detrimento de aspectos relacionados ao nível de serviço. Esse comportamento pode ser explicado pela natureza da logística reversa, na qual os fluxos são frequentemente tratados como resíduos, e não como parte de um sistema contínuo de atendimento à demanda.

No entanto, a baixa incorporação dessas penalidades pode levar à subestimação de impactos relevantes, como perdas de receita ou riscos reputacionais, especialmente em modelos que envolvem produtos reconicionados ou mercados secundários. De forma geral, os

resultados evidenciam uma forte concentração nos custos operacionais diretos, com atenção limitada aos fatores associados à demanda e ao desempenho de serviço.

Em contraste, 60% dos modelos adotam funções objetivo bidimensionais, combinando critérios econômicos e ambientais, o que indica um crescente alinhamento entre sustentabilidade e desempenho econômico. Dentre esses modelos, 28% têm como objetivo a minimização simultânea de custos e impactos ambientais, enquanto 18% priorizam a maximização do lucro associada à redução de danos ambientais, refletindo uma maior compreensão dos benefícios econômicos de longo prazo decorrentes de práticas sustentáveis, como a recuperação de recursos e a redução de resíduos.

A Tabela 12 apresenta os estudos classificados como multiobjetivo, organizados de acordo com os critérios considerados nas funções objetivo.

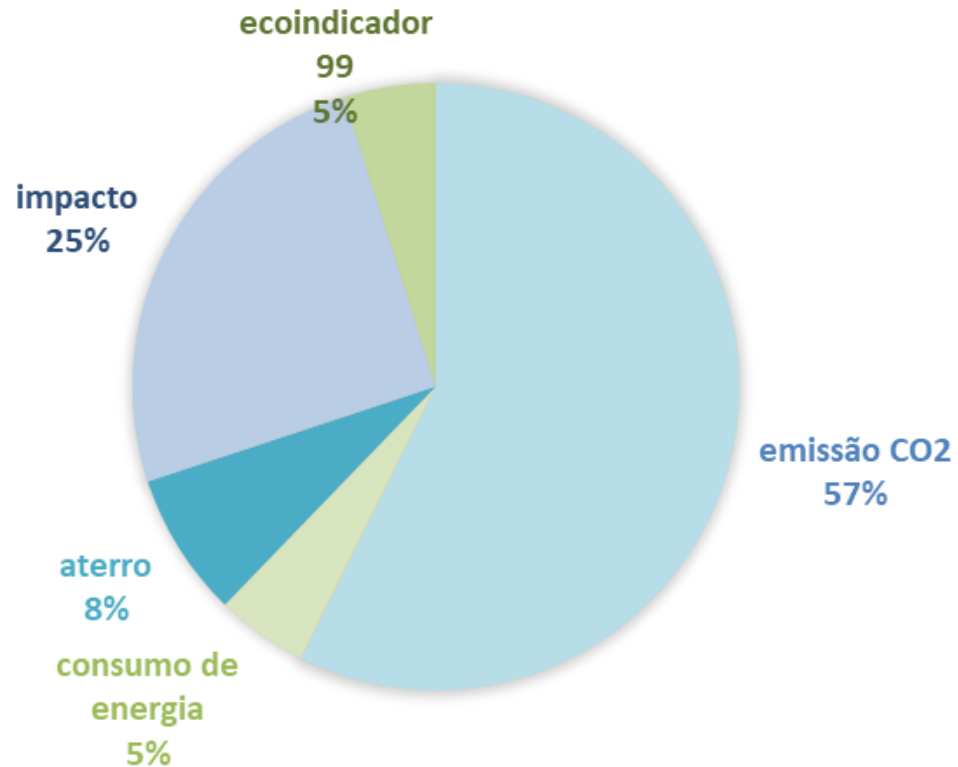
TABELA 12 - ARTIGOS MULTI OBJETIVOS

min custos e ambiental	min custos e max social	min custos e ambiental e max desempenho	min custos e ambiental e max social
Li, Shi e Li (2023); Aviso et al. (2023); Lv et al. (2020); Palacio, Adenso-díaz e Lozano (2018); Mahéo, Rossit e Kilby (2023); Ade rawan et al. (2022); Li, Liu e Li (2019); Entezaminia, Heidari e Rahmani (2017); Aljuneidi e Bulgak (2020); Choudhary et al. (2015); Purnomo et al. (2022); Poursoltan, Seyed-Hosseini e Jabbarzadeh (2021); Tosarkani e Amin (2020); Yaspal et al. (2023); Xiao et al. (2019); Hashemi (2021); Mohajeri e Fallah (2016); Talaei et al. (2016); Allehashemi, Amin e Zolfaghari (2022); Shi et al. (2017); Yu e Solvang (2016b); Wang, Huang e He (2021); Yu e Solvang (2016a); Reddy, Kumar e Ballantyne (2019); Kannan et al. (2023); Kim e Lee (2019); Rajak, Parthiban e Dhanalakshmi (2018); Amin e Zhang (2014); Ali et al. (2020)	Torshizi, Bozorgi-amiri e Sabouhi (2024); Golpira e Javanmardan (2021);	Yousefi-Babadi et al. (2017); Tari e Alumur (2014); Wang et al. (2022b); Shi et al. (2020); Eskandarpour, Nikbakhsh e Zegordi (2014); Abdolazimi et al. (2022); Mirakhorli (2014); Mohtashami, Aghsami e Jolai (2020); Cilaci Tombuş, Aras e Verter (2017); Govindan et al. (2014); Chang et al. (2021); Sadeghi Rad e Nahavandi (2018); Moslehi, Sahebi e Teymouri (2021); Defalque, Da Silva e Marins (2021); Yakavenka et al. (2020); Govindan et al. (2017); Wang et al. (2021); Jabarzadeh et al. (2020); Fakhrazad e Goodarzian (2019);	ABBASI; Vali-siar e Roghanian (2022); Goli et al. (2023); Xu, Jiang e Shi (2022); Tavana et al. (2022); Bal e Satoglu (2018); Tosarkani, Amin e Ghiasvand (2024); Tsao, Tesfaye Balo e Lee (2024); Seydanlou et al. (2022); Sharma et al. (2024); Taherifar et al. (2024); Rouhani, Amin e Wardley (2024); Budak (2020); Mu et al. (2023); Kilic et al. (2023); Nili et al. (2021); Pourjavad e Mayorga (2018); Devika, Jafarian e Nourbakhsh (2014); Hajiaghvaei-Keshteli e Fathollahi Fard (2019); Guo, Shi e Guo (2022); Zarbakhshnia et al. (2020); ABBASI; Ghane Kanafi (2023); Rafiqh et al. (2021); Zarbakhshnia et al. (2019); Yu et al. (2020); Sadeghi Rad e Nahavandi (2018);
Govindan, Paam e Abtahi (2016); He et al. (2024b); Sathiya et al. (2021); Jindal e Sangwan (2017); Kiani Mavi et al. (2023); Ade Irawan et al. (2022); Ahranjani et al. (2018); Valizadeh et al. (2020); Bas e Ozkok (2020); Saffar, Hamed Shakouri e Razmi (2015); Yavari e Geraeli (2019); Azadeh, Ahmadzadeh e Eslami (2019); Kazancoglu et al. (2022); Hu, Parwani e Hu (2021); Atabaki, Mohammadi e Naderi (2020); Shoaieinaeini, Govindan e Rahmani (2022); Messmann et al. (2019); Harijani, Mansour e Fatemi (2023); Safdar et al. (2020); Govindan et al. (2024); Kalantari Khalil Aba, Barzinpour e Pishvae (2023);			
max lucro e min ambiental	max lucro e social e min ambiental	max lucro, desempenho e min ambiental	max lucro, social e desempenho e min ambiental
Zhang, Berenguer e Zhang (2024); Alshamsi e Diabat (2017); Biçe e Batun (2021); Demirel et al. (2014); Hassanzadeh Amin, Wu, Karaphillis (2018); Hoyer, Kieckhäfer e Spengler (2015); Krug, Guillaume e Battaïa (2021); Rajabzadeh, Mousavi e Azimi (2024); Shankar, Bhattacharyya e Choudhary (2018); Trochu, Chaabane e Ouhimmou (2019); Subulan, Taşan e Baykasoglu (2015); Gao (2019); Tokhmehchi, Makui e Sadi-Nezhad (2015); Yu e Solvang (2020); Jin et al. (2018); Wenzhu liao e Luo (2022); Trochu, Chaabane e Ouhimmou (2020); Trochu, Chaabane e Ouhimmou (2018); Kchaou-Boujelben, Bensalem e Jemai (2023); Yu e Solvang (2017); John, Sridharan e Ram kumar (2018); John, Sridharan e Kumar (2017); Ziari e Sajadieh (2022); Garg et al. (2015); Papen e Amin (2019); Rabbani et al. (2020); Li et al. (2023); Ahmadi e Amin (2019); Ayvaz, Bolat e Aydin (2015); Chen, Chan e Chung (2015); Tadić et al. (2016); Puspita Sari, Aini Masuroh e Sri Asih (2024)	Cao et al. (2022); Salçuk e Şahin (2022); Ameli, Mansour e Ahmadi-javid (2019); Lotfi et al. (2021); Darbari et al. (2019); Shokohyar e Mansour (2013); Kalantari et al. (2022);	Mohammadi, Davoudpour e Motamedi (2014); Medrano-Gómez et al. (2020); Che, Lei e Jiang (2022); Mirmajlesi e Shafaei (2016); Yildizbasi e Arioiz (2021); Ozgur Polat e Gungor (2021); Capraz, Polat e Gungor (2015); Jiang et al. (2020); Özkir e Başligil (2013); Alinezhad et al. (2022); Ghouschi e Hushyar (2020);	Wu e Wan (2018); Chen, Liu e Han (2024); Mota et al. (2018); Mohammadi et al. (2020);

Fonte: elaborada pela autora.

A análise dos objetivos ambientais, apresentada na Figura 18, evidencia que as emissões de CO₂ são o fator mais frequentemente incorporado, estando presentes em 57% dos modelos. Essa predominância destaca o papel relevante das atividades de transporte e dos processos intensivos em energia na logística reversa, nos quais a redução de emissões está associada não apenas a exigências regulatórias e sociais, mas também à melhoria da eficiência operacional.

FIGURA 18 - IMPACTOS AMBIENTAIS



Fonte: elaborada pela autora.

Além das emissões, indicadores mais amplos de impacto ambiental aparecem em 25% dos modelos, sinalizando uma crescente preocupação com a natureza multifacetada da sustentabilidade. No entanto, métricas ambientais mais específicas ainda são pouco exploradas: a minimização do envio de resíduos para aterros sanitários está presente em apenas 8% dos modelos, apesar de sua relevância para a gestão de resíduos eletroeletrônicos e para a recuperação de materiais de valor.

O uso de ferramentas avançadas de avaliação do ciclo de vida, como o Eco-Indicator 99, foi observado em apenas 5% dos estudos, sugerindo espaço para abordagens ambientais mais abrangentes. O Eco-Indicator 99, conforme proposto por Mark Goedkoop e Reinout Spriensma (2001), consiste em uma metodologia baseada na modelagem de danos ao longo do ciclo de vida, avaliando impactos em três categorias principais: saúde humana, qualidade do ecossistema e esgotamento de recursos. Apesar de seu potencial para capturar de forma mais completa as externalidades ambientais associadas às decisões logísticas, sua adoção limitada indica que muitos modelos ainda simplificam a dimensão ambiental, podendo desconsiderar impactos relevantes ao longo do ciclo de vida dos produtos.

Além disso, apenas 5% dos estudos consideram a redução do consumo de energia, aspecto particularmente relevante em processos intensivos, como a reciclagem de REEE e a

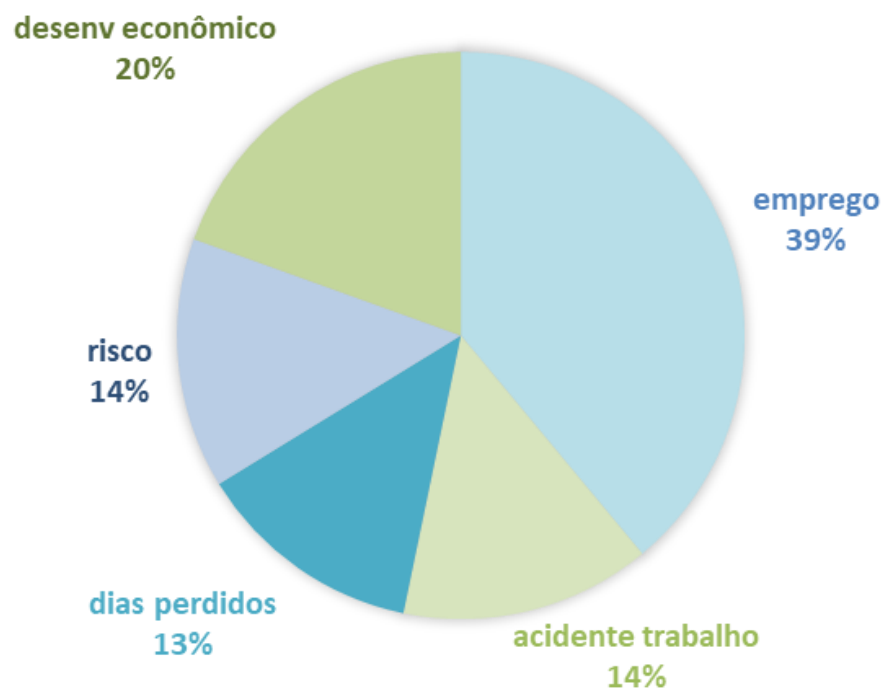
recuperação de materiais. Uma proporção ainda limitada (13%) incorpora métricas de desempenho operacional em conjunto com objetivos econômicos e ambientais, indicando uma preocupação adicional com a eficiência do sistema sem comprometer a sustentabilidade.

Esses resultados evidenciam uma lacuna na avaliação abrangente dos impactos ambientais nos modelos de logística reversa. A ampliação do uso de ferramentas de avaliação do ciclo de vida, como o Eco-Indicator 99, aliada à incorporação de metas relacionadas ao consumo de energia e à redução do envio de resíduos para aterros, poderia contribuir para processos decisórios mais equilibrados, nos quais aspectos ambientais, econômicos e operacionais sejam considerados de forma integrada. Tal abordagem favorece o desenvolvimento de sistemas de logística reversa mais resilientes e sustentáveis no longo prazo.

Observa-se ainda uma evolução na literatura, com 19% dos modelos adotando a abordagem de *triple bottom line* (TBL), integrando dimensões econômica, ambiental e social. Dentro desse grupo, 4% dos estudos priorizam a maximização do lucro e dos benefícios sociais, associada à minimização de impactos ambientais, enquanto 15% concentram-se na redução de custos e impactos ambientais combinada à maximização do valor social. Essa tendência evidencia um avanço na compreensão de que a logística reversa pode gerar benefícios não apenas econômicos e ambientais, mas também sociais.

A Figura 19 apresenta os principais fatores sociais considerados nos modelos analisados.

FIGURA 19 - DESEMPENHO SOCIAL



Fonte: elaborada pela autora.

Fatores de desempenho social, embora menos frequentemente abordados do que objetivos econômicos ou ambientais, contribuem para a construção de sistemas de logística reversa mais abrangentes e sustentáveis. De acordo com a ISO 26000 (ISO, 2010), a responsabilidade social abrange sete áreas principais: governança organizacional, direitos humanos, práticas trabalhistas, meio ambiente, práticas operacionais justas, questões do consumidor e desenvolvimento comunitário. Com base nesse referencial, os estudos analisados agrupam os fatores sociais em dimensões como satisfação da demanda, equidade na alocação de recursos, geração de emprego, desenvolvimento regional e segurança no ambiente de trabalho, as quais podem influenciar tanto decisões de localização quanto a definição de objetivos sociais nos modelos.

Nos modelos analisados, a manutenção dos níveis de emprego aparece em 39% dos estudos, refletindo esforços para estabilizar postos de trabalho diante da variabilidade dos fluxos de retorno de REEE. Essa preocupação está alinhada tanto aos interesses governamentais, relacionados à redução do desemprego, quanto às estratégias das empresas, que buscam evitar custos associados à rotatividade e conflitos trabalhistas.

O desenvolvimento econômico regional foi considerado em 20% dos modelos, evidenciando o potencial das redes de logística reversa para estimular economias locais, fomentar novas oportunidades de negócio e fortalecer cadeias produtivas circulares. No entanto, aspectos relacionados à segurança e ao bem-estar dos trabalhadores recebem menor atenção: apenas 14% dos modelos incorporam riscos ocupacionais, e somente 13% consideram indicadores como dias de trabalho perdidos. Considerando a natureza potencialmente perigosa do manuseio de resíduos eletroeletrônicos — que envolve substâncias tóxicas, equipamentos pesados e processos complexos de desmontagem —, a ausência desses fatores pode levar à subestimação de impactos relevantes sobre a saúde e a segurança dos trabalhadores.

Esses resultados indicam que, embora as dimensões sociais estejam progressivamente sendo incorporadas aos modelos, sua integração ainda se considera limitada. A ampliação do escopo dos objetivos sociais, incluindo métricas mais detalhadas de saúde e segurança ocupacional e indicadores de bem-estar comunitário, pode contribuir para o desenvolvimento de modelos mais completos, capazes de apoiar decisões que conciliem desempenho econômico, sustentabilidade ambiental e responsabilidade social.

De forma geral, a análise das funções objetivo evidencia uma evolução na literatura de modelos de otimização aplicados à logística reversa, partindo de abordagens predominantemente econômicas para formulações mais abrangentes, que integram dimensões

ambientais e, em menor escala, sociais. Embora a minimização de custos ainda seja o critério mais recorrente, observa-se o crescimento de modelos multiobjetivo e de abordagens baseadas no *triple bottom line*, refletindo uma ampliação das preocupações relacionadas à sustentabilidade.

Apesar desse avanço, persistem lacunas importantes, especialmente na incorporação de métricas ambientais mais abrangentes — como avaliação do ciclo de vida — e na integração sistemática de aspectos sociais, como saúde e segurança do trabalho e desenvolvimento comunitário. No contexto dos resíduos eletroeletrônicos (REEE), essas limitações são particularmente relevantes, dado o elevado impacto ambiental e os riscos associados ao manuseio desses materiais.

A Tabela 13 apresenta as técnicas de tratamento de múltiplos objetivos utilizados nos artigos de referência. Observa-se que, mesmo em problemas que envolvem objetivos econômicos, ambientais e sociais potencialmente conflitantes, os autores optam majoritariamente por abordagens que preservam a estrutura matemática do modelo e permitem a obtenção de soluções ótimas ou Pareto-ótimas. Entre as técnicas identificadas destacam-se a abordagem lexicográfica, a programação de metas (Goal Programming), a soma ponderada e, em contextos com incerteza tratada via amostragem, a Aproximação da Média Amostral (SAA). Esses procedimentos possibilitam a conversão do problema multiobjetivo em formulações equivalentes solucionáveis por algoritmos exatos, mantendo controle explícito sobre prioridades, pesos ou metas predefinidas.

TABELA 13 - TÉCNICAS DE TRATAMENTO DOS OBJETIVOS NOS ARTIGOS DE REFERÊNCIA

Tratamento	Autor
lexicográfica	Tari e Alumur (2014); Mu et al. (2023); Krug, Guillaume, e Battaia (2021); Mu et al. (2023)
programação de metas (GP)	Lv et al. (2020); Aljuneidi e Bulgak (2020); Ade Irawan et al. (2022); Kannan et al. (2023); Defalque, Da Silva e Marins (2021); Yu et al. (2020); Abdolazimi et al. (2022); Saçuk e Şahin (2022); Bal e Satoglu (2018);
Soma ponderada Aproximação da média amostral (SAA)	Chen et al. (2015); Trochu, Chaabane e Ouhimmou (2020); Yu e Solvang (2017); Azadeh, Ahmadzadeh e Eslami (2019); Suyabatmaz, Altekin e Sahin (2014); Abbasi; Daneshmand-Mehr; Kanafi (2023a); Abbasi, Daneshmand-Mehr e Kanafi (2023b); Gao (2019); Amin e Zhang (2014); Amin e Zhang (2013); Trochu, Chaabane e Ouhimmou (2018); Ayvaz, Bolat e Aydin (2015); Trochu, Chaabane e Ouhimmou (2019);

Fonte: elaborada pela autora.

5.5. TIPO DE DADOS E TRATAMENTO DA INCERTEZA

A representação da incerteza constitui um aspecto central na modelagem de redes de logística reversa, especialmente em sistemas caracterizados pela variabilidade dos fluxos de retorno, como no caso de REEE. A definição do tipo de dados adotado nos modelos —

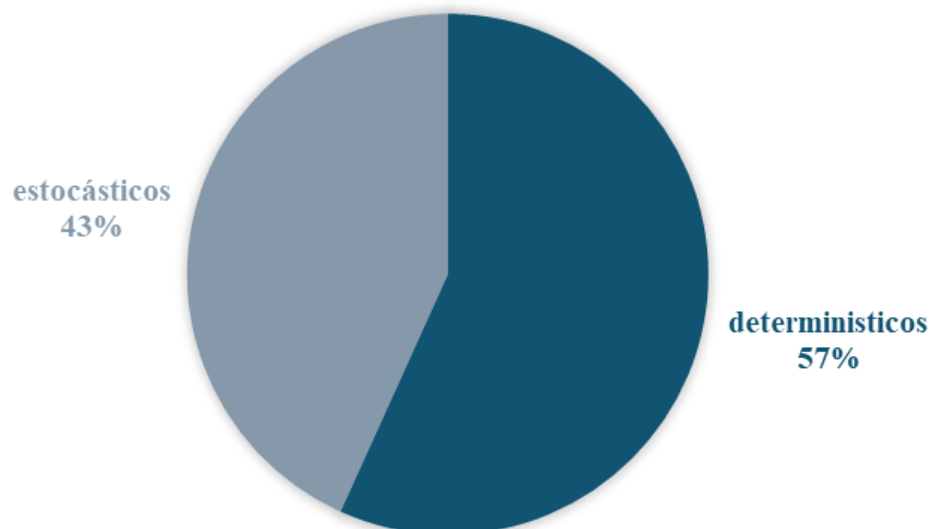
determinístico ou estocástico — influencia diretamente a forma como essas incertezas são incorporadas e tratadas no processo de otimização.

Nos modelos determinísticos, assume-se que todos os parâmetros são conhecidos e fixos, incluindo volumes de retorno, custos, demandas e capacidades. Essa abordagem simplifica a modelagem e reduz a complexidade computacional, sendo amplamente utilizada na literatura. No entanto, pode limitar a capacidade do modelo de representar a variabilidade inerente aos sistemas reais de logística reversa, nos quais os fluxos de retorno são incertos tanto em quantidade quanto em tempo e localização.

Por outro lado, os modelos estocásticos incorporam explicitamente a incerteza, geralmente por meio de cenários, distribuições de probabilidade ou parâmetros aleatórios. Essa abordagem permite representar de forma mais realista as flutuações nos volumes de retorno, nas demandas e nos custos, sendo particularmente relevante para sistemas de REEE, nos quais a geração de resíduos considera-se altamente variável e influenciada por fatores como comportamento do consumidor, ciclos tecnológicos e políticas de descarte.

A Figura 20 apresenta a classificação dos modelos quanto ao tipo de dados utilizados: determinísticos ou estocásticos.

FIGURA 20 - TIPO DE DADOS



Fonte: elaborada pela autora.

De modo geral, observa-se que a maior parte dos modelos adota abordagens determinísticas, indicando uma preferência por formulações mais simples e, em geral, computacionalmente tratáveis. No entanto, a crescente incorporação de modelos estocásticos evidencia uma evolução na literatura, na direção de representações mais realistas e robustas.

Ainda assim, a adoção de abordagens que tratam explicitamente a incerteza permanece limitada, sugerindo uma necessidade de maior investigação, especialmente para aplicações em redes de logística reversa de REEE, nas quais a variabilidade dos fluxos constitui um dos principais desafios operacionais.

A Tabela 14 apresenta os estudos que incorporam incerteza, organizados de acordo com as fontes consideradas nos modelos estocásticos.

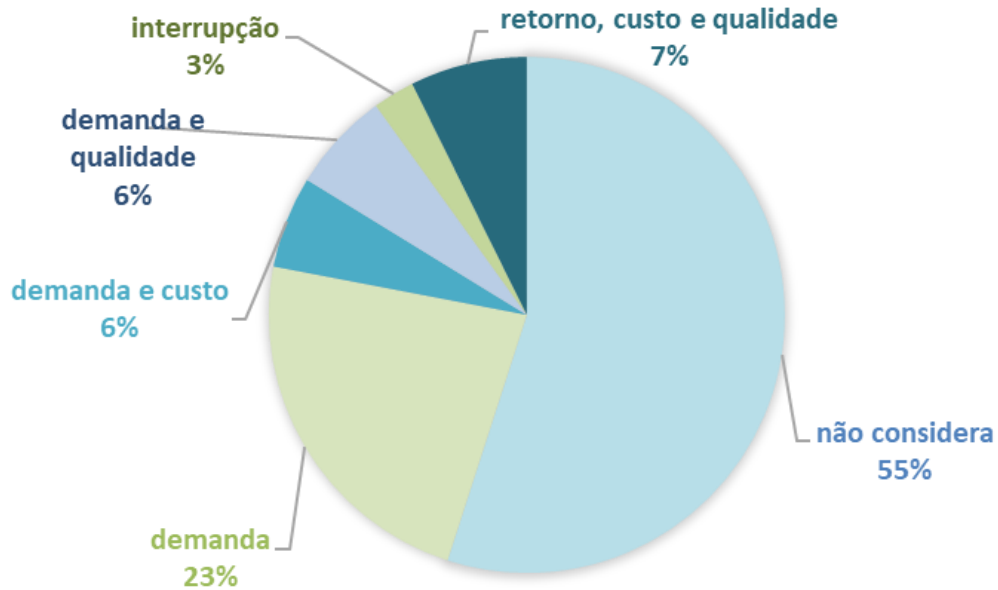
TABELA 14 - FONTES DE INCERTEZA

Demanda	
Abbasi; Daneshmand-Mehr; Kanafi (2023a); Abdolazimi et al. (2022); Ahranjani et al. (2018); Ameli, Mansour e Ahmadi-javid (2019); Atabaki, Mohammadi e Naderi (2020); Borajee, Tavakkoli-Moghaddam e Madani-Saatchi (2023); Dehghan et al. (2019); Entezaminia, Heidari e Rahmani (2017); Esmailbeigi et al. (2021); Gao (2019); Ghafarimoghadam, Ghayebloo e Pishvae (2019); Goli et al. (2023); Golpira e Javanmardan (2021); Govindan, Paam e Abtahi (2016); Guo, Shi e Guo (2022); Hashemi (2021); He et al. (2024); He et al. (2024b); Jindal e Sangwan (2017); Kalantari Khalil Aba, Barzinpour e Pishvae (2023); Lotfi et al. (2021); Mirmajlesi e Shafaei (2016); Mohajeri e Fallah (2016); Özkir e Başlıgil (2013); Pouriani, Asadi-gangraj, Paydar (2019); Seydanlou et al. (2022); Shankar, Bhattacharyya e Choudhary (2018); Subulan, Taşan e Baykasoğlu (2015); Suyabatmaz, Altekin e Sahin (2014); Talaei et al. (2016); Tavana et al. (2022); Tosarkani e Amin (2020); Tsao, Tesfaye Balo e Lee (2024); Wang et al. (2021); Yousefi-Babadi et al. (2017); Yu e Solvang (2016a); Yu e Solvang (2017) Yu e Solvang (2020); Zarbakhshnia et al. (2020); Vahdani e Mohammadi (2015); Vahdani et al. (2013); Zarbakhshnia et al. (2019);	
demanda e custo	demanda e qualidade
Fakhrzad e Goodarzian (2019); Hu, Parwani e Hu (2021); Kalantari et al. (2022); Karagoz, Aydin e Simic (2022); Kchaou-Boujelben, Bensalem e Jemai (2023); Mirakhorli (2014); Rafeigh et al. (2021); Rajabzadeh, Mousavi e Azimi (2024); Tokhmehchi, Makui e Sadi-Nezhad (2015); Trochu, Chaabane e Ouhimmou (2018); Trochu, Chaabane e Ouhimmou (2019);	Ali et al. (2020); Amin e Zhang (2013); Biçe e Batun (2021); Li et al. (2023); Moslehi, Sahebi e Teymouri (2021); Mu et al. (2023); Roghanian e Pazhoeshfar (2014); Rouhani, Amin e Wardley (2024); Tadaros et al. (2022); Trochu, Chaabane e Ouhimmou (2020); Wenzhu liao e Luo (2022); Yavari e Geralei (2019);
interrupção	retorno, custo e qualidade
Jabbarzadeh, Houghton e Khosrojerdi (2018); Poursoltan, Seyed-Hosseini e Jabbarzadeh (2021); Taherifar et al. (2024); Torshizi, Bozorgi-amiri e Sabouhi (2024); Vali-siar e Roghanian (2022);	Ahmadi e Amin (2019); Alinezhad et al. (2022); Aviso et al. (2023); Ayvaz, Bolat e Aydin (2015); Chen et al. (2015); Jiang et al. (2020) Liu, Tang e Zhang (2024); Lu et al. (2020); Mohammadi et al. (2020); Sadjadi, Soltani e Eskandarpour (2014); Saffar, Hamed Shakouri e Razmi (2015); Temur e Yanik (2017); Tosarkani, Amin e Ghiasvand (2024); Valizadeh et al. (2020);

Fonte: elaborada pela autora.

A Figura 21 apresenta a distribuição percentual do total de artigos de acordo com as fontes de incerteza consideradas nas formulações.

FIGURA 21 – DISTRIBUIÇÃO POR FONTES DE INCERTEZA



Fonte: elaborada pela autora.

Observa-se que a maioria dos modelos (55%) não incorpora explicitamente nenhuma forma de incerteza, indicando uma predominância de abordagens determinísticas na literatura. Entre os estudos que consideram variabilidade, a incerteza da demanda aparece como a mais frequente, presente em 23% dos modelos, refletindo a instabilidade dos volumes de retorno e a influência do comportamento do consumidor nos sistemas de logística reversa.

Outras fontes de incerteza são menos exploradas: 7% dos modelos consideram incertezas relacionadas a retornos, custos e qualidade dos produtos, enquanto 6% incorporam combinações de incertezas, como demanda e custo ou demanda e qualidade. Apenas 3% dos estudos incluem incertezas associadas a interrupções do sistema, apesar do impacto potencial dessas ocorrências sobre o desempenho das redes logísticas.

Esses resultados evidenciam que, embora a logística reversa seja caracterizada por elevada variabilidade e imprevisibilidade, a maioria dos modelos ainda adota representações simplificadas, o que pode limitar sua capacidade de refletir condições reais de operação.

Em relação aos procedimentos de integração da incerteza nos modelos de otimização, a lógica *fuzzy* foi a abordagem mais disseminada na literatura. Esta técnica, utilizada em 37 trabalhos por autores como Kilic et al. (2023), Govindan et al. (2017) e Vahdani et al. (2013), destaca-se pela sua capacidade de lidar com a ambiguidade subjetiva de parâmetros onde não há dados históricos precisos. Logo em seguida, com 35 publicações, a Análise de Cenários aparece como uma estratégia fundamental para testar a robustez das redes logísticas sob

diferentes condições futuras, sendo a escolha de pesquisadores como Cao et al. (2022), Kazancoglu et al. (2022) e Mota et al. (2018).

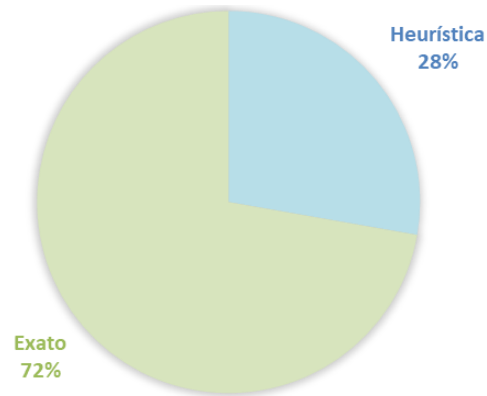
Além das técnicas predominantes, a Otimização Robusta foi empregada em 13 estudos, incluindo as contribuições de Kalantari Khalil Aba, Barzinpour e Pishvae (2023) e Lotfi et al. (2021), focando em soluções que permanecem viáveis mesmo diante das piores variações possíveis nos parâmetros. Em uma escala menor de utilização, mas com aplicações específicas e rigorosas, encontram-se métodos como a Programação Estocástica de Dois Estágios, adotada por Esmailbeigi et al. (2021) para permitir ações de recurso após a revelação dos dados, e a Otimização com Restrição de Chance (CCO), aplicada por Borajee, Tavakkoli-Moghaddam e Madani-Saatchi (2023) para garantir níveis de serviço probabilísticos.

Por fim, estratégias menos convencionais também enriquecem o campo de estudo, como a Abordagem Grey, utilizada por Rajabzadeh, Mousavi e Azimi (2024) e Wang, Huang e He (2021) para lidar com situações de extrema escassez de dados e informações incompletas. Adicionalmente, o Método Iterativo, citado por Garg et al. (2015), oferece uma forma dinâmica de refinar a incerteza por meio do ajuste contínuo de parâmetros. Essa diversidade metodológica revela que a escolha do tratamento da incerteza depende diretamente do equilíbrio entre a complexidade matemática desejada e a qualidade da informação disponível para o tomador de decisão.

5.6. MÉTODOS DE SOLUÇÃO

Os modelos analisados também se diferenciam quanto aos métodos empregados para sua resolução. De forma geral, observa-se a utilização de abordagens classificadas em duas categorias principais: métodos exatos e métodos aproximados, incluindo heurísticas e metaheurísticas. A análise apresentada na Figura 22 evidencia a predominância de métodos exatos, utilizados em 72% dos estudos, enquanto abordagens heurísticas correspondem a 28%

FIGURA 22 – SOLUÇÕES UTILIZADAS NOS MODELOS



Fonte: elaborada pela autora.

A predominância de métodos exatos indica a preferência por abordagens capazes de garantir a obtenção de soluções ótimas, especialmente em modelos formulados por meio de programação matemática. Essas abordagens são amplamente empregadas na literatura e permitem representar de forma detalhada as decisões estruturais e operacionais das redes de logística reversa. No entanto, sua aplicação pode ser limitada por fatores como o tamanho das instâncias, a estrutura dos dados e o nível de complexidade do modelo.

No conjunto dos métodos exatos identificados na literatura, observa-se a predominância de abordagens baseadas em algoritmos de otimização incorporados em softwares comerciais, fundamentados principalmente em técnicas de *branch-and-bound* e *branch-and-cut*. Em menor escala, identificam-se trabalhos que utilizam técnicas específicas de decomposição, como a decomposição de *Benders* (Borajee, Tavakkoli-Moghaddam e Madani-Saatchi, 2023; Esmailbeigi et al., 2021; Mahéo, Rossit e Kilby, 2023; Reddy, Kumar e Ballantyne, 2019).

Por outro lado, métodos heurísticos, embora menos frequentes (28%), desempenham papel relevante na resolução de problemas de maior escala ou com elevada complexidade estrutural. Técnicas como algoritmos genéticos, recozimento simulado e otimização por enxame de partículas permitem obter soluções de boa qualidade em tempos computacionais viáveis, sendo particularmente úteis em contextos nos quais a resolução exata se torna computacionalmente onerosa.

A Tabela 15 apresenta a classificação dos métodos heurísticos identificados nos estudos analisados, evidenciando a diversidade de abordagens utilizadas na literatura.

TABELA 15 - MÉTODOS DE SOLUÇÃO HEURÍSTICA NOS ARTIGOS DE REFERÊNCIA.

Heurística	
Tratamento	Autor
algoritmo competitivo imperialista autoadaptativo (SAICA)	Vahdani e Mohammadi (2015); Hajiaghaei-Keshteli e Fathollahi Fard (2019);
algoritmo de otimização de baleia (WOA)	Rafiqh et al. (2021);
colônia de formigas	Li, Liu e Li (2019);
otimização de enxame de partículas	Chang et al. (2021); Govindan et al. (2014);
algoritmo genético (GA)	Rajak, Parthiban e Dhanalakshmi (2018); Chen, Chan e Chung (2015); Alshamsi e Diabat (2017); Mohtashami, Aghsami e Jolai (2020); Paydar e Olfati (2018); Shoaieinaeini, Govindan e Rahmani (2022); Valizadeh et al. (2020); Kalantari et al. (2022); Demirel et al. (2014); Chen, Liu e Han (2024); Asghari, Abrishami e Mahdavi (2014); Mirakhorli (2014); Fakhrzad e Goodarzian (2019); Ahranjani et al. (2018); Choudhary et al. (2015); Zhang, Berenguer e Zhang (2024); Roghanian e Pazhoeshfar (2014); Purnomo et al. (2022); Ghezavati e Nia (2015);
algoritmo genético de classificação não dominado (NSGA-II)	Shi et al. (2017); Sathiya et al. (2021); Zarbakhshnia et al. (2019); Shi et al. (2020); Zarbakhshnia et al. (2020); Wang et al. (2022b); Pourjavad e Mayorga (2018); Li, Shi e Li (2023); Govindan, Paam e Abtahi (2016); Hashemi (2021); Asghari, Abrishami e Mahdavi (2014); Mirakhorli (2014); Fakhrzad e Goodarzian (2019); Ahranjani et al. (2018); Guo, Shi e Guo (2022); Choudhary et al. (2015);
busca de vizinhança busca tabu	Devika, Jafarian e Nourbakhsh (2014); Eskandarpour, Nikbakhsh e Zegordi (2014); Wu e Wan (2018); Mirmajlesi e Shafaei (2016); Temucin e Tuzkaya (2020); Li, Liu e Li (2019);
DEH - Decomposition-and-expansion heuristic	Che, Lei e Jiang (2022);
heurística ALA hierárquica (HALA)	Thoney et al. (2020);
heurística de alto nível (HLH); evolutivos multiobjetivo (MOEAs)	Leng et al. (2019); Kiani Mavi et al. (2023);
hierarquia analítica (AHP)	Wang et al. (2022a);
lagrangiana	Govindan et al. (2024); Vali-siar e Roghanian (2022); Cilaci Tomuş, Aras e Verter (2017); Mohammadi, Davoudpour e Motamedi (2014);
Projeto de Parâmetros Robustos (RPD) Taguchi	Ameli, Mansour e Ahmadi-javid (2019);
restrição epsilon (EC)	Mohammadi et al. (2020); Sadeghi Rad e Nahavandi (2018); Seydanlou et al. (2022); Yaspal et al. (2023); Kchaou-Boujelben, Bensalem e Jemai (2023); Park et al. (2021); Rabbani et al. (2020); Taherifar et al. (2024); Wang et al. (2021); Moslehi, Sahebi e Teymouri (2021)
ramificação estática e limite (S-B&B)	Kim e Lee (2019);
YAG método dos autores	Yavari e Geraeli (2019);

Fonte: elaborada pela autora.

De forma geral, essa distribuição evidencia oportunidades para o avanço de abordagens híbridas, que combinem a precisão dos métodos exatos com a eficiência computacional das heurísticas. A integração dessas estratégias pode contribuir para o desenvolvimento de modelos mais robustos e aplicáveis a problemas de maior escala, mantendo o equilíbrio entre qualidade da solução e viabilidade computacional em redes de logística reversa.

6. MODELOS PARA PLANEJAMENTO DA LR DE REEE NO BRASIL

A logística reversa de resíduos eletroeletrônicos (REEE) no Brasil apresenta uma configuração complexa, marcada por desafios estruturais, limitações operacionais e assimetrias regionais que influenciam diretamente a eficiência do sistema. Desde a implantação da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) e do Acordo Setorial de Eletroeletrônicos (Brasil, 2010 e 2020), o país tem avançado na definição de responsabilidades, metas de coleta e diretrizes para tratamento e destinação. No entanto, ainda enfrenta dificuldades relacionadas à alta capilaridade dos pontos de entrega, à distribuição desigual das plantas de reciclagem, à capacidade limitada de triagem e remanufatura e à ausência de mecanismos logísticos consolidados em diversos municípios.

Essas características, detalhadas no levantamento apresentado no Capítulo 3, fornecem a base para a análise de aderência dos modelos de otimização ao contexto nacional. Nesse sentido, compreender em que medida os modelos propostos na literatura internacional refletem ou se distanciam dessa realidade foi fundamental para avaliar seu potencial de aplicação e orientar pesquisas futuras adaptadas ao Brasil.

A revisão sistemática realizada nesta dissertação abrangeu estudos publicados em diferentes países e continentes, incluindo modelos desenvolvidos em contextos altamente industrializados, como China, Estados Unidos, Alemanha e Japão, bem como em economias emergentes, como Índia, Irã, Turquia, Malásia e Brasil. Os estudos revelaram uma variedade de aplicações, que incluem desde redes reversas para equipamentos eletroeletrônicos, baterias de lítio, placas de circuito e computadores, até sistemas de reciclagem de eletrodomésticos, televisores e dispositivos móveis. Muitos desses trabalhos são desenvolvidos em ambientes com infraestrutura consolidada de coleta e recuperação, cadeias produtivas integradas, rastreamento avançado, tecnologias de desmontagem mecanizada e políticas públicas estruturadas — condições que diferem substancialmente do cenário brasileiro.

Ao mesmo tempo, modelos desenvolvidos em países emergentes tendem a apresentar maior aderência ao contexto brasileiro, uma vez que lidam com baixa previsibilidade dos retornos, informalidade no fluxo de resíduos, limitações de capacidade, longas distâncias logísticas, escassez de instalações intermediárias e necessidade de priorizar custos de transporte. Estudos realizados na Índia, Irã, Turquia e países latino-americanos apresentam desafios semelhantes aos observados no Brasil, como a dificuldade de integrar pequenas unidades de coleta, a necessidade de sistemas escalonáveis e o papel crítico dos depósitos

intermediários. Esses elementos fornecem indícios sobre quais abordagens da literatura tendem a ser mais compatíveis com o contexto nacional.

Assim, este capítulo tem como objetivo avaliar a aderência dos modelos de otimização identificados na literatura internacional à configuração real da rede brasileira de logística reversa de REEE, considerando suas estruturas, decisões, restrições e aplicações. A partir da análise integrada dos estudos, discute-se quais modelos apresentam maior potencial de aplicação prática no Brasil. Essa discussão foi essencial não apenas para identificar lacunas entre teoria e prática, mas também para orientar o desenvolvimento de modelos futuros que atendam às necessidades específicas do país e contribuam para a efetiva implementação de uma economia circular no setor eletroeletrônico brasileiro.

6.1. MODELOS DIRETAMENTE APLICADOS A REEE

Os modelos diretamente aplicados a fluxos de resíduos eletroeletrônicos constituem o núcleo mais imediato de aderência ao contexto desta dissertação. Entretanto, sua aplicabilidade ao Brasil depende da compatibilidade entre as camadas estruturais consideradas nos modelos e a configuração real da rede brasileira de REEE, caracterizada a partir do levantamento sistematizado no Capítulo 3.

No Brasil, a rede compõe-se por: (i) pontos de entrega voluntária e varejistas; (ii) operadores logísticos e centros de consolidação; (iii) unidades de triagem e desmontagem — frequentemente com participação de cooperativas; (iv) recicladores especializados; e (v) destinos finais ou mercados secundários. Essa estrutura apresenta baixa capilaridade de coleta, forte concentração regional de recicladores e significativa variabilidade nos volumes retornados.

O modelo de John, Sridharan e Ram Kumar (2018) apresenta forte aderência estrutural ao incorporar múltiplas camadas, incluindo zonas de retorno, centros de coleta, desmontagem, reparo, remanufatura, reciclagem e disposição final. Essa decomposição em múltiplos elos reflete a fragmentação e a necessidade de triagem diferenciada observadas na rede brasileira. A distinção entre rotas de recuperação, reparo, remanufatura e reciclagem, foi particularmente relevante para o Brasil, onde o aproveitamento de componentes e a valorização de materiais dependem da qualidade do retorno e da capacidade técnica disponível.

De forma semelhante, Chen, Liu e Han (2024), ao integrarem canais online e offline de coleta, oferecem uma estrutura compatível com a coexistência, no Brasil, de sistemas formais (varejistas e fabricantes) e fluxos paralelos ou informais. A modelagem multiperíodo e

multiobjetivo também se aproxima da realidade nacional, marcada por incerteza na geração e necessidade de incentivos econômicos para aumentar a taxa de coleta.

No caso de Islam et al. (2020), aplicado a painéis fotovoltaicos, observa-se aderência quanto à necessidade de planejamento antecipado de infraestrutura diante de fluxos crescentes de REEE — situação que tende a se reproduzir no Brasil com a expansão da energia solar. Já Tadaros et al. (2022), ao modelarem baterias de íons de lítio sob incerteza de volumes futuros, oferecem arcabouço metodológico relevante para o contexto brasileiro, no qual a ausência de séries históricas confiáveis dificulta o dimensionamento da capacidade instalada.

Entretanto, apesar da aderência estrutural desses modelos, parte deles assume infraestrutura consolidada, rastreabilidade elevada e tecnologia mecanizada avançada, condições ainda desiguais no território brasileiro. Assim, sua aplicação direta requer adaptações relacionadas à limitação de capacidade de triagem, à concentração geográfica de recicladores e à dependência de centros intermediários de consolidação.

6.2. MODELOS DE PAÍSES COM DESAFIOS ESTRUTURAIIS SEMELHANTES AO BRASIL

Os modelos desenvolvidos em países com desafios semelhantes aos do Brasil apresentam aderência não apenas metodológica, mas também contextual. Países como Índia, Irã e Turquia compartilham características relevantes, como infraestrutura incompleta de coleta, informalidade parcial, concentração de unidades de processamento e elevada variabilidade nos fluxos de retorno.

O modelo de Govindan et al. (2014), embora aplicado a alimentos perecíveis, integra decisões de localização e roteirização sob múltiplos objetivos ambientais. Essa abordagem foi particularmente relevante para o Brasil, onde as grandes distâncias territoriais aumentam o peso do transporte nos custos totais e nas emissões de poluentes. A integração entre localização e roteirização reflete a necessidade de estruturar hubs intermediários, essenciais para viabilizar o envio de REEE a recicladores concentrados em regiões específicas.

De forma análoga, Entezaminia, Heidari e Rahmani (2017) incorporam incerteza por meio de cenários discretos e abordagem robusta, oferecendo uma estrutura adequada para lidar com a imprevisibilidade dos retornos observada no Brasil. A presença de centros de coleta e reciclagem em múltiplos níveis aproxima o modelo da estrutura nacional, na qual a consolidação intermediária constitui etapa essencial.

O modelo estocástico de Karagoz, Aydin e Simic (2022), aplicado a veículos em fim de vida, também apresenta compatibilidade estrutural relevante. Embora o objeto de estudo seja distinto, a necessidade de representar volumes incertos, custos variáveis e decisões estratégicas sob incerteza aplica-se diretamente ao cenário brasileiro de REEE, especialmente em grandes regiões metropolitanas como São Paulo e Rio de Janeiro.

Esses modelos tendem a incorporar explicitamente restrições de capacidade e incerteza na geração de resíduos, dois elementos centrais na configuração da rede brasileira. Por esse motivo, apresentam elevado potencial de adaptação, sobretudo em contextos caracterizados por limitações estruturais e variabilidade operacional.

6.3. MODELOS ESTRUTURALMENTE ADERENTES AO CONTEXTO BRASILEIRO

A análise dos modelos da literatura evidencia que a aderência ao contexto brasileiro não depende apenas do tipo de resíduo estudado, mas principalmente da arquitetura estrutural adotada. No caso brasileiro, três características se mostram determinantes:

- Alta capilaridade de pontos de coleta e elevada heterogeneidade regional;
- Alta concentração geográfica das plantas de reciclagem;
- Elevada incerteza na geração e nos fluxos entre as camadas da rede.

O modelo robusto de Yu e Solvang (2016) apresenta elevada compatibilidade ao incorporar múltiplos cenários adversos e variabilidade exógena de demanda, custos e capacidades. Essa abordagem reflete adequadamente o ambiente brasileiro, no qual a incerteza constitui um elemento estrutural do sistema.

Mota et al. (2018), ao integrarem fluxos diretos e reversos com restrições explícitas de capacidade ao longo das camadas, oferecem uma estrutura altamente compatível com o contexto brasileiro, no qual gargalos na triagem e desmontagem limitam o desempenho do sistema. A consideração simultânea de custos e impactos ambientais também se alinha às diretrizes da PNRS.

O modelo de Subulan, Taşan e Baykasoğlu (2015), com estrutura multiestágio e capacidade limitada, aproxima-se fortemente da configuração brasileira, especialmente no que se refere à necessidade de depósitos intermediários para consolidação de volumes antes do envio à reciclagem.

Entre os estudos com maior proximidade ao contexto brasileiro, destaca-se também Defalque, da Silva e Marins (2021), desenvolvido a partir de dados reais de uma empresa brasileira. Embora aplicado à logística reversa de papel, o modelo apresenta aderência relevante à realidade nacional por incorporar centros intermediários, roteirização de coleta, estoques, capacidade operacional, múltiplos períodos e incerteza na disponibilidade de resíduos. Tais elementos aproximam-se das condições observadas na rede brasileira de REEE, marcada por dispersão territorial, necessidade de consolidação intermediária e limitações de capacidade.

Esses resultados indicam que, no contexto brasileiro, estruturas multiestágio com decisões integradas de localização, capacidade, transporte e tratamento da incerteza apresentam maior potencial de aplicação do que formulações simplificadas ou de período único.

Ainda que não tenham sido originalmente aplicados a resíduos eletroeletrônicos, esses modelos oferecem arquiteturas conceituais e matemáticas adequadas para adaptação ao contexto nacional, contribuindo para o preenchimento de lacunas na literatura. Em particular, destacam-se por sua capacidade de representar sistemas mais robustos, escaláveis e compatíveis com as exigências regulatórias e operacionais da PNRS e do Acordo Setorial de Eletroeletrônicos (Brasil, 2010 e 2020).

6.4. SÍNTESE

A análise da aderência dos modelos de otimização identificados na literatura internacional à realidade brasileira de logística reversa de resíduos eletroeletrônicos evidencia um cenário multifacetado, no qual coexistem avanços metodológicos relevantes e lacunas que limitam a aplicação direta dessas formulações no país. Os estudos analisados podem ser agrupados em três conjuntos: (i) modelos diretamente aplicados a REEE, (ii) modelos desenvolvidos em países com desafios semelhantes aos brasileiros e (iii) modelos estruturalmente compatíveis com o contexto nacional. Em conjunto, esses grupos demonstram que a literatura oferece um arcabouço conceitual robusto, ainda que parcialmente ajustado às particularidades da rede brasileira.

No primeiro grupo, os estudos focados explicitamente em REEE e *e-waste* apresentam o maior alinhamento natural ao contexto brasileiro, pois incorporam múltiplas rotas de recuperação, heterogeneidade de qualidade dos retornos, estruturas complexas de desmontagem e incerteza elevada no fluxo de produtos descartados. Esses elementos correspondem diretamente aos desafios enfrentados no Brasil, onde a rede de coleta encontra-se pouco capilarizada, a triagem realiza-se frequentemente de modo manual, e a recuperação de materiais

depende de unidades regionais que operam com limitações de capacidade e variabilidade de oferta.

O segundo grupo, composto por modelos oriundos de países com desafios estruturais semelhantes, confirma que as condições de logística reversa em economias emergentes, como Índia, Turquia, Irã e Egito, oferecem paralelos valiosos para o caso brasileiro. Nessas regiões, assim como no Brasil, a estrutura da rede reversa segue fragmentada, as instalações de processamento são escassas, os fluxos informais coexistem com sistemas formais e a distância logística eleva custos e emissões. Assim, a aplicação de modelos estocásticos, sob múltiplos cenários ou com decisões integradas de fluxo e localização, mostra-se especialmente relevante para apoiar o planejamento de redes reversas no país.

Por fim, o terceiro grupo demonstra que a aderência ao contexto brasileiro não depende exclusivamente do tipo de resíduo estudado, mas também da arquitetura metodológica adotada. Modelos robustos, estocásticos ou multiobjetivo, que integram decisões estratégicas e operacionais, incorporam restrições de capacidade e contemplam estruturas multiestágio, possuem alta capacidade de adaptação ao contexto nacional, independentemente do produto modelado originalmente. Tais formulações são particularmente adequadas para lidar com a elevada incerteza, a limitação de dados, a irregularidade dos retornos e a necessidade de otimizar tanto custos quanto impactos ambientais – elementos centrais da logística reversa brasileira de REEE.

Ao relacionar as camadas modeladas na literatura com as camadas efetivamente existentes na rede brasileira, observa-se que os modelos mais aderentes são aqueles que:

- incorporam múltiplas etapas de coleta, consolidação e processamento;
- consideram restrições explícitas de capacidade;
- integram decisões de localização e transporte;
- tratam a incerteza por meio de cenários, robustez ou programação estocástica;
- contemplam objetivos ambientais além da minimização de custos.

Modelos que pressupõem infraestrutura homogênea e rastreabilidade consolidada tendem a se distanciar da realidade nacional. Assim, a adaptação ao Brasil exige ajustes estruturais que considerem a extensão territorial, a assimetria regional, a informalidade parcial e a limitação de dados.

No conjunto dos modelos que incorporam a dimensão social, observa-se que a aderência ao contexto brasileiro de REEE é, em geral, parcial. A maior parte desses estudos operacionaliza o social por meio de variáveis como geração de empregos, desenvolvimento regional, nível de serviço ou responsividade da rede. Embora tais critérios ampliem a abrangência dos modelos multiobjetivo, eles nem sempre capturam os elementos sociotécnicos e institucionais centrais da logística reversa de REEE no Brasil, como a responsabilidade compartilhada, a atuação de entidades gestoras, a participação de cooperativas e a coexistência entre fluxos formais e informais. Assim, no contexto brasileiro, a incorporação da dimensão social mostra-se mais aderente quando associada não apenas a indicadores genéricos de benefício social, mas também à estrutura regulatória e organizacional estabelecida pela PNRS(BRASIL, 2010) e pelo Acordo Setorial(Brasil, 2020).

Essa análise reforça que a contribuição da literatura apesar de significativa, sua aplicação prática no Brasil requer calibração às particularidades estruturais da rede de REEE, caracterizada a partir do levantamento sistematizado no Capítulo 3. Pesquisas aplicadas ao cenário nacional devem, portanto, concentrar-se na construção de modelos que reflitam explicitamente essas características, promovendo maior convergência entre teoria de otimização e prática regulatória sob a PNRS e o Acordo Setorial de Eletroeletrônicos.

7. CONCLUSÃO

A presente dissertação apresenta uma revisão sistemática abrangente dos modelos de otimização aplicados ao planejamento de redes de Logística Reversa (LR) e Closed Loop Supply Chain (CLSC), com foco nos resíduos eletroeletrônicos (REEE). A análise dos estudos, extraídos das bases Scopus e Web of Science e classificados segundo suas estruturas de modelagem, camadas da rede, decisões, restrições, funções objetivo e métodos de solução, permitiu identificar padrões, tendências e lacunas na literatura.

Complementarmente, o levantamento e a sistematização de informações sobre a rede reversa de REEE no Brasil, apresentados no Capítulo 3, possibilitaram caracterizar sua estrutura, seus aspectos regulatórios e suas limitações operacionais, fornecendo a base para a análise de aderência dos modelos ao contexto nacional. A partir dessa articulação, foi possível avaliar o potencial e as limitações desses modelos quando confrontados com a realidade brasileira de gestão de REEE.

Observa-se que, apesar da variedade de abordagens, há predominância de formulações que representam redes complexas, com múltiplas camadas e fluxos reversos detalhados. A maioria dos estudos contempla etapas como coleta, depósito, remanufatura, reciclagem e disposição final, evidenciando a complexidade operacional dos sistemas de retorno. Verificaram-se, entretanto, diferenças relevantes entre LR e CLSC: enquanto a primeira tende a enfatizar aspectos operacionais e fluxos reversos isolados, a segunda busca integrar produção, distribuição e recuperação, refletindo maior alinhamento ao paradigma da economia circular.

A análise das decisões de abertura e localização mostrou que apenas parte da literatura contempla decisões estratégicas em todas as camadas da rede. A predominância de estudos que incorporam decisões nas etapas intermediárias, como remanufatura e reciclagem, reforça que nesses estágios se concentram o valor residual dos dispositivos eletrônicos e o potencial de captura econômica e ambiental. Em contrapartida, o aterro sanitário permanece, na maioria dos modelos, como infraestrutura fixa, refletindo tanto restrições regulatórias quanto a orientação ambiental de redução do descarte final.

As decisões de transporte e estoque revelaram que 23,1% dos estudos incluem decisões modais de transporte, considerando relevância desse componente em redes que envolvem resíduos sensíveis, volumosos e potencialmente perigosos, como os REEE. Situação semelhante ocorre com decisões de estoque, igualmente presentes em 23,1% dos trabalhos, sendo essenciais para lidar com retornos incertos e fluxos variáveis. Esses resultados indicam que parte da literatura simplifica dimensões operacionais críticas para garantir a tratabilidade dos modelos matemáticos, o que poderia limitar sua capacidade de representar a complexidade das cadeias reversas.

Em relação às restrições, observa-se predominância das restrições de capacidade, presentes em mais de 70% dos modelos, evidenciando que limitações de processamento e armazenamento são elementos estruturantes da rede reversa. Em contraste, as restrições de estoque permanecem sub-representadas, apesar de sua importância para absorver variações nos fluxos de produtos devolvidos. Essa discrepância evidencia um desalinhamento com os desafios práticos, nos quais o equilíbrio entre entrada e processamento considera-se indispensável.

Ao confrontar os modelos identificados com a realidade da rede brasileira de logística reversa de REEE, observa-se maior aderência em três tipos de abordagens: aquelas aplicadas diretamente a REEE/WEEE, por incorporarem múltiplas rotas de recuperação, incertezas e diversidade material; aquelas desenvolvidas em países com desafios semelhantes aos brasileiros, como Índia, Turquia, Irã e China, que refletem condições de informalidade, restrição de capacidade e cadeias fragmentadas; e aquelas que adotam estruturas metodológicas

robustas, estocásticas e multiobjetivo, capazes de representar a incerteza, as limitações operacionais e a necessidade de conciliar eficiência econômica e sustentabilidade.

Assim, a dissertação indica que, embora existam modelos na literatura com elevado potencial de adaptação ao Brasil, ainda há carência de formulações que capturem plenamente a especificidade da rede brasileira: a presença de fluxos informais, a heterogeneidade territorial, a fragmentação da infraestrutura, a assimetria regulatória e a dificuldade de integração entre consumidores, indústrias, cooperativas e recicladores. Essas lacunas, quando não consideradas, podem limitar a utilidade prática dos modelos para o planejamento e execução de políticas de logística reversa no país.

Por fim, os resultados evidenciam duas direções centrais para avanços futuros: (i) o desenvolvimento de modelos mais realistas, que integrem decisões de abertura, transporte, estoque e restrições interdependentes, representando de forma mais completa a complexidade das cadeias reversas de REEE; e (ii) a construção de modelos orientados ao contexto brasileiro, incorporando especificidades territoriais, socioeconômicas e regulatórias, com base em dados empíricos que permitam validar e fortalecer sua aplicação prática.

Dessa forma, esta dissertação contribui para ampliar o entendimento sobre o estado da arte na modelagem de redes reversas e de ciclo fechado, ao mesmo tempo em que oferece um diagnóstico crítico e diretrizes para o desenvolvimento de soluções mais completas, contextualizadas e sustentáveis para a gestão dos resíduos eletroeletrônicos no Brasil.

REFERÊNCIAS

- Abbasi, S., Daneshmand-Mehr, M., & Kanafi, A. G. (2023a). Designing a Tri-Objective, Sustainable, Closed-Loop, and Multi-Echelon Supply Chain during the COVID-19 and Lockdowns. *Foundations of Computing and Decision Sciences*, 48(3), 269–312. <https://doi.org/10.2478/fcds-2023-0011>
- Abbasi, S., Daneshmand-Mehr, M., & Kanafi, A. G. (2023b). Green Closed-Loop Supply Chain Network Design During the Coronavirus (COVID-19) Pandemic: a Case Study in the Iranian Automotive Industry. *Environmental Modeling and Assessment*, 28(1), 69–103. <https://doi.org/10.1007/s10666-022-09863-0>
- ABDI – AGÊNCIA BRASILEIRA DE DESENVOLVIMENTO INDUSTRIAL. Logística reversa de equipamentos eletroeletrônicos: diagnóstico e diretrizes para o setor no Brasil. Brasília: ABDI, 2013. Disponível em: <https://www.abdi.com.br> . Acesso em: 22 out. 2025
- Abdolazimi, O., Bahrami, F., Shishebori, D., & Ardakani, M. A. (2022). A multi-objective closed-loop supply chain network design problem under parameter uncertainty: comparison of exact methods. *Environment, Development and Sustainability*, 24(9), 10768–10802. <https://doi.org/10.1007/s10668-021-01883-2>
- ABREE – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE RECICLAGEM DE ELETROELETRÔNICOS E ELETRODOMÉSTICOS. Relatório de Atividades 2023. São Paulo: ABREE, 2024. Disponível em: <https://abree.org.br>. Acesso em: 22 out. 2025..
- Achillas, Ch., Aidonis, D., Vlachokostas, Ch., Moussiopoulos, N., Baniyas, G., & Triantafyllou, D. (2012). A multi-objective decision-making model to select waste electrical and electronic equipment transportation media. *Resources, Conservation and Recycling*, 66, 76–84. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2012.01.004>
- Ade Irawan, C., Dan-Asabe Abdulrahman, M., Salhi, S., & Luis, M. (2022). An efficient matheuristic algorithm for bi-objective sustainable closed-loop supply chain networks. *IMA Journal of Management Mathematics*, 33(4), 603–636. <https://doi.org/10.1093/imaman/dpac003>
- Ahmadi, S., & Amin, S. H. (2019). An integrated chance-constrained stochastic model for a mobile phone closed-loop supply chain network with supplier selection. *Journal of Cleaner Production*, 226, 988–1003. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.132>
- Ahranjani, A. R., Seifbarghy, M., Bozorgi-Amiri, A., & Najafi, E. (2018). Closed-loop supply chain network design for the paper industry: A multi-objective stochastic robust approach. *Scientia Iranica*, 25(5E), 2881–2903. <https://doi.org/10.24200/sci.2017.4464>
- Ali, S. S., Paksoy, T., Torğul, B., & Kaur, R. (2020). Reverse logistics optimization of an industrial air conditioner manufacturing company for designing sustainable supply chain: a fuzzy hybrid multi-criteria decision-making approach. *Wireless Networks*, 26(8), 5759–5782. <https://doi.org/10.1007/s11276-019-02246-6>
- Alinezhad, M., Mahdavi, I., Hematian, M., & Tirkolaee, E. B. (2022). A fuzzy multi-objective optimization model for sustainable closed-loop supply chain network design in food industries. *Environment, Development and Sustainability*, 24(6), 8779–8806. <https://doi.org/10.1007/s10668-021-01809-y>
- Aljuneidi, T., & Bulgak, A. A. (2020). Carbon footprint for designing reverse logistics network with hybrid manufacturing-remanufacturing systems. *Journal of Remanufacturing*, 10(2), 107–126. <https://doi.org/10.1007/s13243-019-00076-5>
- Allehashemi, T., Amin, S. H., & Zolfaghari, S. (2022). A proposed multi-objective model for cellphone closed-loop supply chain optimization based on fuzzy QFD. *Expert Systems with Applications*, 210. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2022.118577>

- Alshamsi, A., & Diabat, A. (2017). A Genetic Algorithm for Reverse Logistics network design: A case study from the GCC. *Journal of Cleaner Production*, *151*, 652–669. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.02.096>
- Ambipar. “Soluções em logística reversa e reciclagem de eletroeletrônicos.” São Paulo: Ambipar, 2025. Disponível em: <https://ambipar.com/ambipar-environment/logistica-e-manufatura-reversa/logistica-reversa-eletroeletronicos/> (acesso em 22 out. 2025).
- Ameli, M., Mansour, S., & Ahmadi-Javid, A. (2019). A simulation-optimization model for sustainable product design and efficient end-of-life management based on individual producer responsibility. *Resources, Conservation and Recycling*, *140*, 246–258. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.02.031>
- Amin, S. H., & Zhang, G. (2013). A multi-objective facility location model for closed-loop supply chain network under uncertain demand and return. *Applied Mathematical Modelling*, *37*(6), 4165–4176. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2012.09.039>
- Amin, S. H., & Zhang, G. (2014). Closed-loop supply chain network configuration by a multi-objective mathematical model. Em *Appl. Math. Model., Expert Syst. Appl., J. Syst. Sci. Syst. Eng* (Vol. 6, Número 1).
- Arab, A. (2022). A systematic review of multi-objective optimization applications in reverse logistics. *Journal of Supply Chain Management Science*. <https://doi.org/10.18757/jscms.2022.6177>
- Aravendan, M., & Panneerselvam, R. (2014). Literature Review on Network Design Problems in Closed Loop and Reverse Supply Chains. *Intelligent Information Management*, *06*(03), 104–117. <https://doi.org/10.4236/iim.2014.63012>
- ARIA, M.; CUCCURULLO, C. Bibliometrix: An R-tool for comprehensive science mapping analysis. *Journal of Informetrics*, v. 11, n. 4, p. 959–975, 2017. Disponível em: <https://www.bibliometrix.org>. Acesso em: 22 out. 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.joi.2017.08.007>
- Asghari, M., Abrishami, S. J., & Mahdavi, F. (2014). Reverse logistics network design with incentive-dependent return. *Industrial Engineering and Management Systems*, *13*(4), 383–397. <https://doi.org/10.7232/iems.2014.13.4.383>
- Ashayeri, J., Ma, N., & Sotirov, R. (2015). The redesign of a warranty distribution network with recovery processes. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, *77*, 184–197. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2015.02.017>
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 10004:2004 – Resíduos sólidos – Classificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.
- Atabaki, M. S., Mohammadi, M., & Naderi, B. (2020). New robust optimization models for closed-loop supply chain of durable products: Towards a circular economy. *Computers and Industrial Engineering*, *146*. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.106520>
- Australia. (2020). *Closing the loop Waste reforms for a circular economy*. <https://www.wa.gov.au/system/files/2023-05/closing-the-loop-waste-reforms-for-a-circular-economy.pdf>
- Aviso, K. B., Baquillas, J. C., Chiu, A. S. F., Jiang, P., Fan, Y. Van, Varbanov, P. S., Klemeš, J. J., & Tan, R. R. (2023). Optimizing plastics recycling networks. *Cleaner Engineering and Technology*, *14*. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2023.100632>
- Ayvaz, B., Bolat, B., & Aydin, N. (2015). Stochastic reverse logistics network design for waste of electrical and electronic equipment. *Resources, Conservation and Recycling*, *104*, 391–404. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.07.006>
- Azadeh, A., Ahmadzadeh, K., & Eslami, H. (2019). Location optimization of municipal solid waste considering health, safety, environmental, and economic factors. *Journal of Environmental Planning and Management*, *62*(7), 1185–1204. <https://doi.org/10.1080/09640568.2018.1482200>

- Bal, A., & Badurdeen, F. (2020). A multi-objective facility location model to implement circular economy. *Procedia Manufacturing*, 51, 1592–1599. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.10.222>
- Bal, A., & Satoglu, S. I. (2018). A goal programming model for sustainable reverse logistics operations planning and an application. *Journal of Cleaner Production*, 201, 1081–1091. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.104>
- Banguera, L. A., Sepúlveda, J. M., Ternero, R., Vargas, M., & Vásquez, Ó. C. (2018). Reverse logistics network design under extended producer responsibility: The case of out-of-use tires in the Gran Santiago city of Chile. *International Journal of Production Economics*, 205, 193–200. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2018.09.006>
- Bardin, L. (2011). *Análise de conteúdo*. Lisboa: Edições 70.
- Bas, S. A., & Ozkok, B. A. (2020). A fuzzy approach to multi-objective mixed-integer linear programming model for multi-echelon closed-loop supply chain with multi-product multi-time period. *Operations Research and Decisions*, 30(1), 25–46. <https://doi.org/10.37190/ord200102>
- BASEL CONVENTION ON THE CONTROL OF TRANSBOUNDARY MOVEMENTS OF HAZARDOUS WASTES AND THEIR DISPOSAL*. (1989).
- Batista, R. A. S., & Brandalise, M. Â. T. (2023). A utilização do software Iramuteq na análise de dados textuais em revisão sistemática de literatura. *Roteiro*, 48. <https://doi.org/10.18593/r.v48.32352>
- Biçe, K., & Batun, S. (2021). Closed-loop supply chain network design under demand, return and quality uncertainty. *Computers and Industrial Engineering*, 155. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.107081>
- Borajee, M., Tavakkoli-Moghaddam, R., & Madani-Saatchi, S. H. (2023). A chance-constraint optimization model for a multi-echelon multi-product closed-loop supply chain considering brand diversity: An accelerated Benders decomposition algorithm. *Computers and Operations Research*, 152. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2022.106130>
- BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 3 ago. 2010. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm . Acesso em: 22 out. 2025.
- BRASIL. (2019). Acordo Setorial-Eletroeletrônico sem anexos. *Ministério Meio Ambiente*.
- BRASIL. Decreto nº 10.240, de 12 de fevereiro de 2020. Regulamenta o art. 33 da Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, para dispor sobre a logística reversa de produtos eletroeletrônicos de uso doméstico e seus componentes. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 13 fev. 2020. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2020/decreto/d10240.htm . Acesso em: 22 out. 2025.
- BRASIL. (2021). *INSTRUÇÃO NORMATIVA Nº 8/2021/GABIN/ICMBIO, DE 28 DE SETEMBRO DE 2021*. https://sei.icmbio.gov.br/sei/controlador.php?acao=documento_imprimir_web&acao_origem=arvore_visualizar&id_documento=9880008&infra_si.../1/1702070.012609/2017-80Telefone:612028-9011/9013
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Plano Nacional de Resíduos Sólidos – Planares (Versão B). Brasília: SINIR, 2022. Disponível em: <https://portal-api.sinir.gov.br/wp-content/uploads/2022/07/Planares-B.pdf>. Acesso em: 15/09/2025.

- Brasil. (2023). Decreto Nº 11.413, de 13 de fevereiro de 2023, que institui o Certificado de Crédito de Reciclagem de Logística Reversa, o Certificado de Estruturação e Reciclagem de Embalagens em Geral e o Certificado de Crédito de Massa Futura. *Brasília DF*.
- Brasil. (2024). Decreto Nº 11.414, DE 13 DE FEVEREIRO DE 2023, institui o Programa Diogo de Sant'Ana Pró-Catadoras e Pró-Catadores para a Reciclagem Popular e o Comitê Interministerial para Inclusão Socioeconômica de Catadoras e Catadores de Materiais Reutilizáveis e Recicláveis. *Brasília DF*.
- BRASILREVERSO. BrasilReverso, 2025. Disponível em: < <https://www.brasilreverso.com.br/site/>>. Acesso em: 6 jul. 2025.
- Budak, A. (2020). Sustainable reverse logistics optimization with triple bottom line approach: An integration of disassembly line balancing. *Journal of Cleaner Production*, 270. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122475>
- Camargo, B. V., & Justo, A. M. (2021). *Tutorial para uso do software de análise textual IRAMUTEQ*. <http://www.iramuteq.org/documentation/fichiers/tutoriel-en-portugais>
- Cao, C., Li, J., Liu, J., Liu, J., Qiu, H., & Zhen, J. (2022). Sustainable development-oriented location-transportation integrated optimization problem regarding multi-period multi-type disaster medical waste during COVID-19 pandemic. *Annals of Operations Research*. <https://doi.org/10.1007/s10479-022-04820-2>
- Capraz, O., Polat, O., & Gungor, A. (2015). Planning of waste electrical and electronic equipment (REEE) recycling facilities: MILP modelling and case study investigation. *Flexible Services and Manufacturing Journal*, 27(4), 479–508. <https://doi.org/10.1007/s10696-015-9217-3>
- Carvalho, M. M., Fleury, A., & Lopes, A. P. (2013). An overview of the literature on technology roadmapping (TRM): Contributions and trends. *Technological Forecasting and Social Change*, 80(7), 1418–1437. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2012.11.008>
- Cavallin, A., Rossit, D. G., Herrán Symonds, V., Rossit, D. A., & Frutos, M. (2020). Application of a methodology to design a municipal waste pre-collection network in real scenarios. *Waste Management and Research*, 38(1_suppl), 117–129. <https://doi.org/10.1177/0734242X19894630>
- Chang, L., Zhang, H., Xie, G., Yu, Z., Zhang, M., Li, T., Tian, G., & Yu, D. (2021a). Reverse logistics location based on energy consumption: Modeling and multi-objective optimization method. *Applied Sciences (Switzerland)*, 11(14). <https://doi.org/10.3390/app11146466>
- Chang, L., Zhang, H., Xie, G., Yu, Z., Zhang, M., Li, T., Tian, G., & Yu, D. (2021b). Reverse logistics location based on energy consumption: Modeling and multi-objective optimization method. *Applied Sciences (Switzerland)*, 11(14). <https://doi.org/10.3390/app11146466>
- Che, A., Lei, J., & Jiang, Z. (2022). Optimised redesign of reverse logistics network with multi-level capacity choices for household appliances. *International Journal of Production Research*, 60(18), 5615–5632. <https://doi.org/10.1080/00207543.2021.1967499>
- Chen, W., Kucukyazici, B., Verter, V., & Jesús Sáenz, M. (2015). Supply chain design for unlocking the value of remanufacturing under uncertainty. *European Journal of Operational Research*, 247(3), 804–819. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.06.062>
- Chen, W., Liu, Y., & Han, M. (2024). Designing a sustainable reverse logistics network for used cell phones based on offline and online trading systems. *Journal of Environmental Management*, 354. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.120417>
- Chen, Y. T., Chan, F. T. S., & Chung, S. H. (2015). An integrated closed-loop supply chain model with location allocation problem and product recycling decisions. *International Journal of Production Research*, 53(10), 3120–3140. <https://doi.org/10.1080/00207543.2014.975849>
- China. (2004). *Law of the People's Republic of China on the Prevention and Control of Environmental Pollution by Solid Waste*.

- China. (2008). *Circular Economy Promotion Law*.
http://english.mep.gov.cn/Resources/laws/envir_elatedlaws/201712/t20171212_427823.shtml
- Choudhary, A., Sarkar, S., Settur, S., & Tiwari, M. K. (2015). A carbon market sensitive optimization model for integrated forward-reverse logistics. *International Journal of Production Economics*, 164, 433–444. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2014.08.015>
- Cilacı Tombuş, A., Aras, N., & Verter, V. (2017). Designing distribution systems with reverse flows. *Journal of Remanufacturing*, 7(2–3), 113–137. <https://doi.org/10.1007/s13243-017-0036-4>
- Darbari, J. D., Kannan, D., Agarwal, V., & Jha, P. C. (2019). Fuzzy criteria programming approach for optimising the TBL performance of closed loop supply chain network design problem. *Annals of Operations Research*, 273(1–2), 693–738. <https://doi.org/10.1007/s10479-017-2701-2>
- de Brito, M. P., & Dekker, R. (2004). A Framework for Reverse Logistics. Em *Reverse Logistics* (p. 3–27). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-540-24803-3_1
- Decreto nº 10.936, de 12 de janeiro de 2022 Regulamenta a Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos., Brasília DF (2022).
- Defalque, C. M., da Silva, A. F., & Marins, F. A. S. (2021). Goal programming model applied to waste paper logistics processes. *Applied Mathematical Modelling*, 98, 185–206. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2021.05.002>
- Dehghan, E., Amiri, M., Shafiei Nikabadi, M., & Jabbarzadeh, A. (2019). Novel robust fuzzy programming for closed-loop supply chain network design under hybrid uncertainty. *Journal of Intelligent and Fuzzy Systems*, 37(5), 6457–6470. <https://doi.org/10.3233/JIFS-18117>
- Demirel, N., Özceylan, E., Paksoy, T., & Gökçen, H. (2014). A genetic algorithm approach for optimising a closed-loop supply chain network with crisp and fuzzy objectives. *International Journal of Production Research*, 52(12), 3637–3664. <https://doi.org/10.1080/00207543.2013.879616>
- Detwal, P. K., Agrawal, R., Samadhiya, A., & Kumar, A. (2023). Metaheuristics in circular supply chain intelligent systems: A review of applications journey and forging a path to the future. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 126. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2023.107102>
- Devika, K., Jafarian, A., & Nourbakhsh, V. (2014). Designing a sustainable closed-loop supply chain network based on triple bottom line approach: A comparison of metaheuristics hybridization techniques. *European Journal of Operational Research*, 235(3), 594–615. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2013.12.032>
- Diabat, A., Kannan, D., Kaliyan, M., & Svetinovic, D. (2013). An optimization model for product returns using genetic algorithms and artificial immune system. *Resources, Conservation and Recycling*, 74, 156–169. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2012.12.010>
- dos Reis, A. H. S., de Oliveira, A. L. M., Fritsch, C., Zouch, J., Ferreira, P., & Polese, J. C. (2023). Usefulness of machine learning softwares to screen titles of systematic reviews: a methodological study. *Systematic Reviews*, 12(1). <https://doi.org/10.1186/s13643-023-02231-3>
- DRAFT. “Em Sorocaba, Sintronics faz 95% do resíduo eletroeletrônico virar matéria-prima de alta qualidade...”. 17 jan. 2022. Disponível em: <https://www.projetodraft.com/sintronics-faz-95-do-residuo-eletroeletronico-virar-materia-prima-de-alta-qualidade/>. Acesso em: 22 out. 2025.
- Elkington, J. (1997). *CANNIBALS WITH FORKS The Triple Bottom Line of 21st Century Business*. Capstone.
- Entezaminia, A., Heidari, M., & Rahmani, D. (2017). Robust aggregate production planning in a green supply chain under uncertainty considering reverse logistics: a case study. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 90(5–8), 1507–1528. <https://doi.org/10.1007/s00170-016-9459-6>

- ERCC. ([s.d.]). Recuperado 19 de fevereiro de 2025, de <https://www.ecycleclearinghouse.org/contentpage.aspx?pageid=10>
- Eskandarpour, M., Nikbakhsh, E., & Zegordi, S. H. (2014). Variable neighborhood search for the bi-objective post-sales network design problem: A fitness landscape analysis approach. *Computers and Operations Research*, 52, 300–314. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2013.06.002>
- Esmailbeigi, R., Middleton, R., García-Flores, R., & Heydar, M. (2021). Benders decomposition for a reverse logistics network design problem in the dairy industry. *Annals of Operations Research*. <https://doi.org/10.1007/s10479-021-04309-4>
- EU. (2003). *DIRECTIVE 2002/95/EC OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL*.
- EU. (2012). *DIRECTIVE 2012/19/EU OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL*.
- EXAME. “Flex Brasil se torna referência global com certificação Zero Waste”. 26 set. 2022. Disponível em: <https://exame.com/bussola/flex-brasil-se-torna-referencia-global-com-certificacao-zero-waste/> . Acesso em: 22 out. 2025.
- Fakhrzad, M. B., & Goodarzian, F. (2019). A Fuzzy Multi-Objective Programming Approach to Develop a Green Closed-Loop Supply Chain Network Design Problem under Uncertainty: Modifications of Imperialist Competitive Algorithm. *RAIRO - Operations Research*, 53(3), 963–990. <https://doi.org/10.1051/ro/2019018>
- FITSintronics. “SincBin – Dispositivo IoT para otimização da logística reversa de cartuchos”. 2019. Disponível em: <https://www.fit-tecnologia.org.br/assets/downloads/case-sincbin.pdf> . Acesso em: 22 out. 2025.
- Fleischmann, M., Bloemhof-Ruwaard, J. M., Dekker, R., Van Der Laan, E., Van Nunen, J. A. E. E., & Van Wassenhove, L. N. (1997). EUROPEAN JOURNAL OF OPERATIONAL RESEARCH Quantitative models for reverse logistics: A review. Em *European Journal of Operational Research* (Vol. 103).
- Flex. “Bringing circular manufacturing to electronics with Sintronics”. 22 ago. 2019. Disponível em: <https://flex.com/resources/bringing-circular-manufacturing-to-electronics-with-sintronics/> . Acesso em: 22 out. 2025.
- Galvão, T. F., Tiguman, G. M. B., Sarkis-Onofre, R., Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., Shamseer, L., Tetzlaff, J. M., Akl, E. A., Brennan, S. E., Chou, R., Glanville, J., Grimshaw, J. M., Hróbjartsson, A., Lalu, M. M., Li, T., ... Moher, D. (2022). A declaração PRISMA 2020: Diretriz atualizada para relatar revisões sistemáticas. *Epidemiologia e Serviços de Saude*, 31(2). <https://doi.org/10.5123/S1679-49742022000200033>
- Gao, X. (2019). A novel reverse logistics network design considering multi-level investments for facility reconstruction with environmental considerations. *Sustainability (Switzerland)*, 11(9). <https://doi.org/10.3390/su11092710>
- Garetti, M., & Taisch, M. (2012). Sustainable manufacturing: Trends and research challenges. *Production Planning and Control*, 23(2–3), 83–104. <https://doi.org/10.1080/09537287.2011.591619>
- Garg, K., Kannan, D., Diabat, A., & Jha, P. C. (2015). A multi-criteria optimization approach to manage environmental issues in closed loop supply chain network design. *Journal of Cleaner Production*, 100, 297–314. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.02.075>
- Gaur, J., Subramoniam, R., Govindan, K., & Huisingh, D. (2017). Closed-loop supply chain management: From conceptual to an action oriented framework on core acquisition. *Journal of Cleaner Production*, 167, 1415–1424. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.098>
- Ghafarimoghdam, A., Ghayebloo, S., & Pishvae, M. S. (2019). A fuzzy-budgeted robust optimization model for joint network design-pricing problem in a forward–reverse supply chain:

- the viewpoint of third-party logistics. *Computational and Applied Mathematics*, 38(4).
<https://doi.org/10.1007/s40314-019-0966-6>
- Ghezavati, V., & Nia, N. S. (2015). Development of an optimization model for product returns using genetic algorithms and simulated annealing. *Soft Computing*, 19(11), 3055–3069.
<https://doi.org/10.1007/s00500-014-1465-8>
- Ghoushchi, S. J., & Hushyar, I. (2020). DESIGNING A CLOSED-LOOP SUPPLY CHAIN NETWORK AND PROVIDING A MULTI-OBJECTIVE MATHEMATICAL MODEL TO SELECT A THIRD-PARTY LOGISTICS COMPANY AND SUPPLIER SIMULTANEOUSLY. *INTERNATIONAL JOURNAL OF INDUSTRIAL ENGINEERING-THEORY APPLICATIONS AND*, 27(2), 245–275.
- Ghulam, S. T., & Abushammala, H. (2023). Challenges and Opportunities in the Management of Electronic Waste and Its Impact on Human Health and Environment. Em *Sustainability (Switzerland)* (Vol. 15, Número 3). MDPI. <https://doi.org/10.3390/su15031837>
- Gil, A. C. (2017). *Como Elaborar Projetos de Pesquisa* (Atlas, Org.; 6. ed.).
- GM&C Logística Reversa. “Alta tecnologia para separação de materiais; pioneiros na reciclagem de eletroeletrônicos no Brasil.” São José dos Campos: GM&C, 2025. Disponível em: <https://gmclog.com.br> (acesso em 22 out. 2025)
- Goli, A., Babae Tirkolae, E., Golmohammadi, A. M., Atan, Z., Weber, G. W., & Ali, S. S. (2023). A robust optimization model to design an IoT-based sustainable supply chain network with flexibility. *Central European Journal of Operations Research*. <https://doi.org/10.1007/s10100-023-00870-4>
- Golpîra, H., & Javanmardan, A. (2021). Decentralized Decision System for Closed-Loop Supply Chain: A Bi-Level Multi-Objective Risk-Based Robust Optimization Approach. *Computers and Chemical Engineering*, 154. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2021.107472>
- Goedkoop, mark; Spriensma, Rosalie. The Eco-indicator 99: A Damage Oriented Method for Life Cycle Impact Assessment: Methodology Report. Amersfoort: PRé Consultants B.V., 2001. Disponível em: https://www.pre-sustainability.com/download/EI99_methodology_v3.pdf . Acesso em: 23 out. 2025.
- Govindan, K., Asgari, F., Naieni Fard, F. S., & Mina, H. (2024). Application of IoT technology for enhancing the consumer willingness to return E-waste for achieving circular economy: A Lagrangian relaxation approach. *Journal of Cleaner Production*, 459. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.142421>
- Govindan, K., Darbari, J. D., Agarwal, V., & Jha, P. C. (2017). Fuzzy multi-objective approach for optimal selection of suppliers and transportation decisions in an eco-efficient closed loop supply chain network. *Journal of Cleaner Production*, 165, 1598–1619. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.06.180>
- Govindan, K., Fattahi, M., & Keyvanshokoo, E. (2017). Supply chain network design under uncertainty: A comprehensive review and future research directions. *European Journal of Operational Research*, 263(1), 108–141. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2017.04.009>
- Govindan, K., Jafarian, A., Khodaverdi, R., & Devika, K. (2014). Two-echelon multiple-vehicle location-routing problem with time windows for optimization of sustainable supply chain network of perishable food. *International Journal of Production Economics*, 152, 9–28. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2013.12.028>
- Govindan, K., Paam, P., & Abtahi, A. R. (2016). A fuzzy multi-objective optimization model for sustainable reverse logistics network design. *Ecological Indicators*, 67, 753–768. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.03.017>

- Govindan, K., Soleimani, H., & Kannan, D. (2015). Reverse logistics and closed-loop supply chain: A comprehensive review to explore the future. Em *European Journal of Operational Research* (Vol. 240, Número 3, p. 603–626). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2014.07.012>
- GREEN ELETRON. (2023). *ASSOCIACAO GESTORA PARA RESIDUOS DE EQUIPAMENTOS ELETROELETRONICOS NACIONAL GREEN ELETRON*. GREEN ELETRON. <https://greeneletron.org.br/sobre>
- Guo, Y., Shi, Q., & Guo, C. (2022). A Fuzzy Robust Programming Model for Sustainable Closed-Loop Supply Chain Network Design with Efficiency-Oriented Multi-Objective Optimization. *Processes*, *10*(10). <https://doi.org/10.3390/pr10101963>
- Hajiaghahi-Keshteli, M., & Fathollahi Fard, A. M. (2019). Sustainable closed-loop supply chain network design with discount supposition. *Neural Computing and Applications*, *31*(9), 5343–5377. <https://doi.org/10.1007/s00521-018-3369-5>
- Harijani, A. M., Mansour, S., & Fatemi, S. (2023). Closed-loop supply network of electrical and electronic equipment under carbon tax policy. *Environmental Science and Pollution Research*, *30*(32), 78449–78468. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-27443-x>
- Hashemi, S. E. (2021). A fuzzy multi-objective optimization model for a sustainable reverse logistics network design of municipal waste-collecting considering the reduction of emissions. *Journal of Cleaner Production*, *318*. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128577>
- Hassanzadeh Amin, S., Wu, H., & Karaphillis, G. (2018). A perspective on the reverse logistics of plastic pallets in Canada. *Journal of Remanufacturing*, *8*(3), 153–174. <https://doi.org/10.1007/s13243-018-0051-0>
- Hatefi, S. M., Jolai, F., Torabi, S. A., & Tavakkoli-Moghaddam, R. (2015). A credibility-constrained programming for reliable forward-reverse logistics network design under uncertainty and facility disruptions. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, *28*(6), 664–678. <https://doi.org/10.1080/0951192X.2014.900863>
- He, M., Li, Q., Lin, T., Fan, J., Wu, X., & Han, X. (2024). Designing a Reverse Logistics Network for End-of-Life Vehicles in an Uncertain Environment. *World Electric Vehicle Journal*, *15*(4). <https://doi.org/10.3390/wevj15040140>
- He, M., Li, Q., Wu, X., & Han, X. (2024). A novel multi-level reverse logistics network design optimization model for waste batteries considering facility technology types. *Journal of Cleaner Production*, *467*. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.142966>
- Hejazi, T. H., & Khorshidvand, B. (2024). Robust optimization of sustainable closed-loop supply chain network considering product family. *Environment, Development and Sustainability*, *26*(4), 10591–10621. <https://doi.org/10.1007/s10668-023-03166-4>
- Hiebl, M. R. W. (2021). Sample Selection in Systematic Literature Reviews of Management Research. *Organizational Research Methods*. <https://doi.org/10.1177/1094428120986851>
- Hoyer, C., Kieckhäfer, K., & Spengler, T. S. (2015). Technology and capacity planning for the recycling of lithium-ion electric vehicle batteries in Germany. *Journal of Business Economics*, *85*(5), 505–544. <https://doi.org/10.1007/s11573-014-0744-2>
- Hu, Z., Parwani, V., & Hu, G. (2021). Closed-Loop Supply Chain Network Design under Uncertainties Using Fuzzy Decision Making. *Logistics*, *5*(1). <https://doi.org/10.3390/logistics5010015>
- India. (2008). *Hazardous Waste (Management, Handling & Transboundary Movement) Rules*. Ministry of Environment, Forest and Climate Change Government of India. <https://cpcb.nic.in/rules/>
- India. (2022). *The E-Waste Management and Handling Rules*. Ministry of Environment, Forest and Climate Change Government of India. <https://cpcb.nic.in/rules-6/>

- INTERNATIONAL MONETARY FUND (IMF). World Economic Outlook Database, April 2025: Gross Domestic Product, current prices (U.S. dollars). Washington, D.C.: IMF, 2025. Disponível em: <https://www.imf.org/en/Publications/WEO/weo-database/2025/April>. Acesso em: 23 out. 2025.
- Islam, M. T., & Huda, N. (2018). Reverse logistics and closed-loop supply chain of Waste Electrical and Electronic Equipment (REEE)/E-waste: A comprehensive literature review. *Resources, Conservation and Recycling*, 137, 48–75. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.05.026>
- Islam, M. T., Nizami, M. S. H., Mahmoudi, S., & Huda, N. (2021). Reverse logistics network design for waste solar photovoltaic panels: A case study of New South Wales councils in Australia. *Waste Management and Research*, 39(2), 386–395. <https://doi.org/10.1177/0734242X20962837>
- ISO. (2010). *ISO 26000 Guidance on social responsibility Discovering*. <https://www.iso.org/files/live/sites/isoorg/files/store/en/PUB100258.pdf>
- Jabarzadeh, Y., Reyhani Yamchi, H., Kumar, V., & Ghaffarinasab, N. (2020). A multi-objective mixed-integer linear model for sustainable fruit closed-loop supply chain network. *Management of Environmental Quality: An International Journal*, 31(5), 1351–1373. <https://doi.org/10.1108/MEQ-12-2019-0276>
- Jabbarzadeh, A., Haughton, M., & Khosrojerdi, A. (2018). Closed-loop supply chain network design under disruption risks: A robust approach with real world application. *Computers and Industrial Engineering*, 116, 178–191. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2017.12.025>
- Jan van Eck, N., & Waltman, L. (2011). *Text mining and visualization using VOSviewer*. www.vosviewer.com.
- Jan van Eck, N., & Waltman, L. (2021). VOSviewer Manual. *Leiden: Univeriteit Leiden*, 1–53.
- Jiang, G., Wang, Q., Wang, K., Zhang, Q., & Zhou, J. (2020). A novel closed-loop supply chain network design considering enterprise profit and service level. *Sustainability (Switzerland)*, 12(2). <https://doi.org/10.3390/su12020544>
- Jin, H., Song, B. D., Mendis, G., Yih, Y., & Sutherland, J. W. (2018). A location-allocation model for sustainable NdFeB magnet recovery under uncertainties. *CIRP Annals*, 67(1), 37–40. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2018.04.050>
- Jindal, A., & Sangwan, K. S. (2017). Multi-objective fuzzy mathematical modelling of closed-loop supply chain considering economical and environmental factors. *Annals of Operations Research*, 257(1–2), 95–120. <https://doi.org/10.1007/s10479-016-2219-z>
- John, S. T., Sridharan, R., & Kumar, P. N. R. (2017). Multi-period reverse logistics network design with emission cost. *International Journal of Logistics Management*, 28(1), 127–149. <https://doi.org/10.1108/IJLM-08-2015-0143>
- John, S. T., Sridharan, R., & Ram Kumar, P. N. (2018a). Reverse logistics network design: a case of mobile phones and digital cameras. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 94(1–4), 615–631. <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0864-2>
- John, S. T., Sridharan, R., & Ram Kumar, P. N. (2018b). Reverse logistics network design: a case of mobile phones and digital cameras. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 94(1–4), 615–631. <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0864-2>
- Kalantari Khalil Abad, A. R., Barzinpour, F., & Pishvae, M. S. (2023). Green and reliable medical device supply chain network design under deep dynamic uncertainty: A novel approach in the context of COVID-19 outbreak. *Applied Soft Computing*, 149. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2023.110964>
- Kalantari, S., Kazemipoor, H., Movahedi Sobhani, F., & Mohammad Hadji Molana, S. (2022). Designing sustainable closed-loop supply chain network with considering spot-to-point inflation and carbon emission policies: A case study. *Computers and Industrial Engineering*, 174. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2022.108748>

- Kannan, D., Solanki, R., Darbari, J. D., Govindan, K., & Jha, P. C. (2023). A novel bi-objective optimization model for an eco-efficient reverse logistics network design configuration. *Journal of Cleaner Production*, 394. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136357>
- Karagoz, S., Aydin, N., & Simic, V. (2022). A Novel Stochastic Optimization Model for Reverse Logistics Network Design of End-of-Life Vehicles: A Case Study of Istanbul. *Environmental Modeling and Assessment*, 27(4), 599–619. <https://doi.org/10.1007/s10666-022-09834-5>
- Kaza, S., Yao, L. C., Bhada-Tata, P., & Van Woerden, F. (2018). What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050. *World Bank*.
- Kazancoglu, Y., Yuksel, D., Sezer, M. D., Mangla, S. K., & Hua, L. (2022). A Green Dual-Channel Closed-Loop Supply Chain Network Design Model. *Journal of Cleaner Production*, 332. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.130062>
- Kchaou-Boujelben, M., Bensalem, M., & Jemai, Z. (2023). Bi-objective stochastic closed-loop supply chain network design under uncertain quantity and quality of returns. *Computers and Industrial Engineering*, 181. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2023.109308>
- Kiani Mavi, R., Hosseini Shekarabi, S. A., Kiani Mavi, N., Arisian, S., & Moghdani, R. (2023). Multi-objective optimisation of sustainable closed-loop supply chain networks in the tire industry. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 126. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2023.107116>
- Kilic, H. S., Cebeci, U., & Ayhan, M. B. (2015). Reverse logistics system design for the waste of electrical and electronic equipment (REEE) in Turkey. *Resources, Conservation and Recycling*, 95, 120–132. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2014.12.010>
- Kilic, H. S., Kalender, Z. T., Solmaz, B., & Iseri, D. (2023). A two-stage MCDM model for reverse logistics network design of waste batteries in Turkey. *Applied Soft Computing*, 143. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2023.110373>
- Kim, J. S., & Lee, D. H. (2019). Collection network design with capacity planning in reverse logistics: static and restricted-dynamic models. *Engineering Optimization*, 51(8), 1430–1445. <https://doi.org/10.1080/0305215X.2018.1524462>
- Krug, Z., Guillaume, R., & Battaña, O. (2021). Design of reverse supply chains under uncertainty: the lexicographic criterion for exploring opportunities. *International Journal of Production Research*, 59(11), 3221–3236. <https://doi.org/10.1080/00207543.2020.1866782>
- Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998. Dispõe sobre as sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente, e dá outras providências., Pub. L. No. 6905, Brasília DF (1998).
- Leng, L., Zhao, Y., Zhang, J., & Zhang, C. (2019). An effective approach for the multiobjective regional low-carbon location-routing problem. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(11). <https://doi.org/10.3390/ijerph16112064>
- Li, D., Liu, C., & Li, K. (2019). A Remanufacturing Logistics Network Model Based on Improved Multi-objective Ant Colony Optimization. *Journal European des Systemes Automatises*, 52(4), 391–395. <https://doi.org/10.18280/jesa.520409>
- Li, M., Shi, Y., & Li, M. (2023). Solving the Vehicle Routing Problem for a Reverse Logistics Hybrid Fleet Considering Real-Time Road Conditions. *Mathematics*, 11(7). <https://doi.org/10.3390/math11071659>
- Li, Y., Kannan, D., Jha, P. C., Garg, K., Darbari, J., & Agarwal, N. (2023). Design of a multi echelon product recovery embeded reverse logistics network for multi products and multi periods. *Annals of Operations Research*, 323(1–2), 131–152. <https://doi.org/10.1007/s10479-018-2776-4>
- Lindhqvist, T. Extended Producer Responsibility in Cleaner Production: Policy Principle to Promote Environmental Improvements of Product Systems. Lund: IIIIEE, Lund University, 2000.

- Liu, C., Tang, J., & Zhang, Z. H. (2024). Impacts of capacity redundancy and process flexibility on risk mitigation in e-waste recycling supply chain management. *Omega (United Kingdom)*, 128. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2024.103110>
- Lotfi, R., Mehrjerdi, Y. Z., Pishvae, M. S., Sadeghieh, A., & Weber, G. W. (2021). A robust optimization model for sustainable and resilient closed-loop supply chain network design considering conditional value at risk. *Numerical Algebra, Control and Optimization*, 11(2), 221–253. <https://doi.org/10.3934/naco.2020023>
- Lu, S., Zhu, L., Wang, Y., Xie, L., & Su, H. (2020). Integrated forward and reverse logistics network design for a hybrid assembly-recycling system under uncertain return and waste flows: A fuzzy multi-objective programming. *Journal of Cleaner Production*, 243. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118591>
- Lv, J., Dong, H., Geng, Y., & Li, H. (2020). Optimization of recyclable MSW recycling network: A Chinese case of Shanghai. *Waste Management*, 102, 763–772. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.11.041>
- Mahéo, A., Rossit, D. G., & Kilby, P. (2023). Solving the integrated bin allocation and collection routing problem for municipal solid waste: a Benders decomposition approach. *Annals of Operations Research*, 322(1), 441–465. <https://doi.org/10.1007/s10479-022-04918-7>
- Maung, M., Wilson, C., & Yu, W. (2020). Does reputation risk matter? Evidence from cross-border mergers and acquisitions. *Journal of International Financial Markets, Institutions and Money*, 66. <https://doi.org/10.1016/j.intfin.2020.101204>
- McKeown, S., & Mir, Z. M. (2021). Considerations for conducting systematic reviews: evaluating the performance of different methods for de-duplicating references. *Systematic Reviews*, 10(1). <https://doi.org/10.1186/s13643-021-01583-y>
- Medrano-Gómez, X. D., Ferreira, D., Toso, E. A. V., & Ibarra-Rojas, O. J. (2020). Using the maximal covering location problem to design a sustainable recycling network. *Journal of Cleaner Production*, 275. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124020>
- Messmann, L., Helbig, C., Thorenz, A., & Tuma, A. (2019). Economic and environmental benefits of recovery networks for REEE in Europe. *Journal of Cleaner Production*, 222, 655–668. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.02.244>
- Mirakhorli, A. (2014). Fuzzy multi-objective optimization for closed loop logistics network design in bread-producing industries. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 70(1–4), 349–362. <https://doi.org/10.1007/s00170-013-5264-7>
- Mirmajlesi, S. R., & Shafaei, R. (2016). An integrated approach to solve a robust forward/reverse supply chain for short lifetime products. *Computers and Industrial Engineering*, 97, 222–239. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2016.05.015>
- Mishra, S., & Singh, S. P. (2022). A stochastic disaster-resilient and sustainable reverse logistics model in big data environment. *Annals of Operations Research*, 319(1), 853–884. <https://doi.org/10.1007/s10479-020-03573-0>
- Mogale, D. G., De, A., Ghadge, A., & Aktas, E. (2022). Multi-objective modelling of sustainable closed-loop supply chain network with price-sensitive demand and consumer's incentives. *Computers and Industrial Engineering*, 168. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2022.108105>
- Mohajeri, A., & Fallah, M. (2016a). A carbon footprint-based closed-loop supply chain model under uncertainty with risk analysis: A case study. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 48, 425–450. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2015.09.001>
- Mohajeri, A., & Fallah, M. (2016b). A carbon footprint-based closed-loop supply chain model under uncertainty with risk analysis: A case study. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 48, 425–450. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2015.09.001>

- Mohammadi, A. S., Alemtabriz, A., Pishvae, M. S., & Zandieh, M. (2020). A multi-stage stochastic programming model for sustainable closed-loop supply chain network design with financial decisions: A case study of plastic production and recycling supply chain. *Scientia Iranica*, 27(1 E), 377–395. <https://doi.org/10.24200/SCI.2019.21531>
- Mohammadi, M. A., Davoudpour, H., & Motamedi, Z. (2014). A competitive facility location in a closed form supply chain. *Decision Science Letters*, 3(3), 335–342. <https://doi.org/10.5267/j.dsl.2014.3.004>
- Mohammed, A., & Wang, Q. (2017a). The fuzzy multi-objective distribution planner for a green meat supply chain. *International Journal of Production Economics*, 184, 47–58. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2016.11.016>
- Mohammed, A., & Wang, Q. (2017b). The fuzzy multi-objective distribution planner for a green meat supply chain. *International Journal of Production Economics*, 184, 47–58. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2016.11.016>
- Mohtashami, Z., Aghsami, A., & Jolai, F. (2020). A green closed loop supply chain design using queuing system for reducing environmental impact and energy consumption. *Journal of Cleaner Production*, 242. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118452>
- Moslehi, M. S., Sahebi, H., & Teymouri, A. (2021). A multi-objective stochastic model for a reverse logistics supply chain design with environmental considerations. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 12(7), 8017–8040. <https://doi.org/10.1007/s12652-020-02538-2>
- Mota, B., Gomes, M. I., Carvalho, A., & Barbosa-Povoa, A. P. (2018). Sustainable supply chains: An integrated modeling approach under uncertainty. *Omega (United Kingdom)*, 77, 32–57. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2017.05.006>
- Mu, N., Wang, Y., Chen, Z. S., Xin, P., Devenci, M., & Pedrycz, W. (2023). Multi-objective combinatorial optimization analysis of the recycling of retired new energy electric vehicle power batteries in a sustainable dynamic reverse logistics network. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(16), 47580–47601. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-25573-w>
- Nanayakkara, P. R., Jayalath, M. M., Thibbotuwawa, A., & Perera, H. N. (2022). A circular reverse logistics framework for handling e-commerce returns. *Cleaner Logistics and Supply Chain*, 5. <https://doi.org/10.1016/j.clscn.2022.100080>
- Nili, M., Seyedhosseini, S. M., Jabalameli, M. S., & Dehghani, E. (2021). A multi-objective optimization model to sustainable closed-loop solar photovoltaic supply chain network design: A case study in Iran. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 150. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111428>
- OECD. *Extended Producer Responsibility: Updated Guidance for Efficient Waste Management*. Paris: OECD Publishing, 2016.
- Ongondo, F. O., Williams, I. D., & Cherrett, T. J. (2011). How are REEE doing? A global review of the management of electrical and electronic wastes. Em *Waste Management* (Vol. 31, Número 4, p. 714–730). <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2010.10.023>
- ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT (OECD). *Extended Producer Responsibility: Updated Guidance for Efficient Waste Management*. Paris: OECD Publishing, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1787/9789264256385-en>
- OUZZANI, M.; HAMMADY, H.; FEDOROWICZ, Z.; ELMAGARMID, A. Rayyan — a web and mobile app for systematic reviews. *Systematic Reviews*, v. 5, n. 1, p. 210, dez. 2016. Disponível em: <https://rayyan.qcri.org>. Acesso em: 22 out. 2025. DOI: <https://doi.org/10.1186/s13643-016-0384-4>.
- Özceylan, E., & Paksoy, T. (2013). A mixed integer programming model for a closed-loop supply-chain network. *International Journal of Production Research*, 51(3), 718–734. <https://doi.org/10.1080/00207543.2012.661090>

- Ozgun Polat, L., & Gungor, A. (2021a). REEE closed-loop supply chain network management considering the damage levels of returned products. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(7), 7786–7804. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-10249-6>
- Ozgun Polat, L., & Gungor, A. (2021b). REEE closed-loop supply chain network management considering the damage levels of returned products. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(7), 7786–7804. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-10249-6>
- Özker, V., & Başlıgil, H. (2013). Multi-objective optimization of closed-loop supply chains in uncertain environment. *Journal of Cleaner Production*, 41, 114–125. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.10.013>
- Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., Shamseer, L., Tetzlaff, J. M., Akl, E. A., Brennan, S. E., Chou, R., Glanville, J., Grimshaw, J. M., Hróbjartsson, A., Lalu, M. M., Li, T., Loder, E. W., Mayo-Wilson, E., McDonald, S., ... Moher, D. (2021). The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. *Em The BMJ* (Vol. 372). BMJ Publishing Group. <https://doi.org/10.1136/bmj.n71>
- Pahlevan-Sharif, S., Mura, P., & Wijesinghe, S. N. R. (2019). A systematic review of systematic reviews in tourism. *Journal of Hospitality and Tourism Management*, 39, 158–165. <https://doi.org/10.1016/j.jhtm.2019.04.001>
- Palacio, A., Adenso-Díaz, B., & Lozano, S. (2018). A decision-making model to design a sustainable container depot logistic network: The case of the port of valencia. *Transport*, 33(1), 119–130. <https://doi.org/10.3846/16484142.2015.1107621>
- Papen, P., & Amin, S. H. (2019). Network configuration of a bottled water closed-loop supply chain with green supplier selection. *Journal of Remanufacturing*, 9(2), 109–127. <https://doi.org/10.1007/s13243-018-0061-y>
- Park, K., Kim, J., Ko, Y. D., & Song, B. D. (2021). Redesign of reverse logistics network with managerial decisions on the minimum quality level and remanufacturing policy. *Journal of the Operational Research Society*, 72(7), 1564–1577. <https://doi.org/10.1080/01605682.2020.1745702>
- Paydar, M. M., & Olfati, M. (2018). Designing and solving a reverse logistics network for polyethylene terephthalate bottles. *Journal of Cleaner Production*, 195, 605–617. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.05.218>
- Plástico Moderno. “Economia circular – logística reversa de eletroeletrônicos”. 8 fev. 2022. Disponível em: <https://www.plastico.com.br/economia-circular-logistica-reversa-de-eletroeletronicos/> . Acesso em: 22 out. 2025.
- Pouriani, S., Asadi-Gangraj, E., & Paydar, M. M. (2019). A robust bi-level optimization modelling approach for municipal solid waste management; a real case study of Iran. *Journal of Cleaner Production*, 240. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118125>
- Pourjavad, E., & Mayorga, R. V. (2018). Optimization of a sustainable closed loop supply chain network design under uncertainty using multi-objective evolutionary algorithms. *Advances in Production Engineering And Management*, 13(2), 216–228. <https://doi.org/10.14743/apem2018.2.286>
- Pourjavad, E., & Mayorga, R. V. (2019). An optimization model for network design of a closed-loop supply chain: a study for a glass manufacturing industry. *International Journal of Management Science and Engineering Management*, 14(3), 169–179. <https://doi.org/10.1080/17509653.2018.1512387>
- Poursoltan, L., Seyed-Hosseini, S. M., & Jabbarzadeh, A. (2021). Green closed-loop supply chain network under the COVID-19 pandemic. *Sustainability (Switzerland)*, 13(16). <https://doi.org/10.3390/su13169407>

- Purnomo, M. R. A., Wangsa, I. D., Rizky, N., Jauhari, W. A., & Zahria, I. (2022). A multi-echelon fish closed-loop supply chain network problem with carbon emission and traceability. *Expert Systems with Applications*, 210. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2022.118416>
- Puspita Sari, D., Aini Masruroh, N., & Sri Asih, A. M. (2024). Economic and Environmental Benefits of E-Waste Management Networks Design in Yogyakarta Province, Indonesia. *Journal of Industrial Engineering and Management*, 17(1), 292–320. <https://doi.org/10.3926/jiem.6651>
- Rabbani, M., Hashemi, P., Bineshpour, P., & Farrokhi-Asl, H. (2020). Municipal solid waste management considering NGO's role in consumer environmental awareness and government regulations for air pollution. *Journal of Modelling in Management*, 15(3), 783–807. <https://doi.org/10.1108/JM2-08-2018-0128>
- Rachih, H., Mhada, F. Z., & Chiheb, R. (2019). Meta-heuristics for reverse logistics: A literature review and perspectives. *Computers and Industrial Engineering*, 127, 45–62. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.11.058>
- Rafiqh, P., Akbari, A. A., Bidhandi, H. M., & Kashan, A. H. (2021). Sustainable closed-loop supply chain network under uncertainty: a response to the COVID-19 pandemic. *Environmental Science and Pollution Research*. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-16077-6>
- Rajabzadeh, M., Mousavi, S. M., & Azimi, F. (2024a). A new gray optimization model for disposing or re-commercializing unsold goods in reverse logistics networks with a cross-docking center. *Kybernetes*. <https://doi.org/10.1108/K-12-2022-1637>
- Rajabzadeh, M., Mousavi, S. M., & Azimi, F. (2024b). A new gray optimization model for disposing or re-commercializing unsold goods in reverse logistics networks with a cross-docking center. *KYBERNETES*. <https://doi.org/10.1108/K-12-2022-1637>
- Rajak, S., Parthiban, P., & Dhanalakshmi, R. (2018). Selection of transportation channels in closed-loop supply chain using meta-heuristic algorithm. *International Journal of Information Systems and Supply Chain Management*, 11(3), 64–86. <https://doi.org/10.4018/IJSSCM.2018070104>
- Ratinaud, p. IRaMuTeQ: Interface de R pour les Analyses Multidimensionnelles de Textes et de Questionnaires. Toulouse: Université de Toulouse, 2009. Disponível em: <http://www.iramuteq.org>. Acesso em: 22 out. 2025.
- Reddy, K. N., Kumar, A., & Ballantyne, E. E. F. (2019). A three-phase heuristic approach for reverse logistics network design incorporating carbon footprint. *International Journal of Production Research*, 57(19), 6090–6114. <https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1526422>
- RE-Teck. RE-Teck, 2025. Disponível em: <<https://www.re-teck.com/>>. Acesso em: 6 jul. 2025.
- Rodríguez-Escoto, J. N., Olivares-Benitez, E., Nucamendi-Guillén, S., & Drzymalski, J. (2024). A multi-objective sustainable closed-loop supply chain network problem with hybrid facilities. *International Transactions in Operational Research*. <https://doi.org/10.1111/itor.13523>
- Roghianian, E., & Pazhoheshfar, P. (2014). An optimization model for reverse logistics network under stochastic environment by using genetic algorithm. *Journal of Manufacturing Systems*, 33(3), 348–356. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2014.02.007>
- Rosenberg, S., Glöser-Chahoud, S., Huster, S., & Schultmann, F. (2023). A dynamic network design model with capacity expansions for EoL traction battery recycling – A case study of an OEM in Germany. *Waste Management*, 160, 12–22. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2023.01.029>
- Rouhani, S., Amin, S. H., & Wardley, L. (2024). A novel multi-objective robust possibilistic flexible programming to design a sustainable apparel closed-loop supply chain network. *Journal of Environmental Management*, 365. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.121496>
- Sadeghi Rad, R., & Nahavandi, N. (2018a). A novel multi-objective optimization model for integrated problem of green closed loop supply chain network design and quantity discount. *Journal of Cleaner Production*, 196, 1549–1565. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.06.034>

- Sadeghi Rad, R., & Nahavandi, N. (2018b). A novel multi-objective optimization model for integrated problem of green closed loop supply chain network design and quantity discount. *Journal of Cleaner Production*, *196*, 1549–1565. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.06.034>
- Sadjadi, S. J., Soltani, R., & Eskandarpour, A. (2014). Location based treatment activities for end of life products network design under uncertainty by a robust multi-objective memetic-based heuristic approach. *Applied Soft Computing Journal*, *23*, 215–226. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2014.06.028>
- Safaei, A. S., Roozbeh, A., & Paydar, M. M. (2017). A robust optimization model for the design of a cardboard closed-loop supply chain. *Journal of Cleaner Production*, *166*, 1154–1168. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.08.085>
- Safdar, N., Khalid, R., Ahmed, W., & Imran, M. (2020). Reverse logistics network design of e-waste management under the triple bottom line approach. *Journal of Cleaner Production*, *272*. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122662>
- Saffar, M. M., Hamed Shakouri, G., & Razmi, J. (2015). A new multi objective optimization model for designing a green supply chain network under uncertainty. *International Journal of Industrial Engineering Computations*, *6*(1), 15–32. <https://doi.org/10.5267/j.ijiec.2014.10.001>
- Sahebjamnia, N., Fathollahi-Fard, A. M., & Hajiaghayi-Keshteli, M. (2018). Sustainable tire closed-loop supply chain network design: Hybrid metaheuristic algorithms for large-scale networks. *Journal of Cleaner Production*, *196*, 273–296. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.05.245>
- Salçuk, K., & Şahin, C. (2022). A novel multi-objective optimization model for sustainable supply chain network design problem in closed-loop supply chains. *Neural Computing and Applications*, *34*(24), 22157–22175. <https://doi.org/10.1007/s00521-022-07668-6>
- Santos-Penate, D. R., Suarez-Vega, R. R., & de la Nuez, C. F. (2023). A Location-allocation Model for Bio-waste Management in the Hospitality Sector. *NETWORKS & SPATIAL ECONOMICS*, *23*(3), 611–639. <https://doi.org/10.1007/s11067-023-09593-0>
- Sar, K., & Ghadimi, P. (2023). A systematic literature review of the vehicle routing problem in reverse logistics operations. *Computers and Industrial Engineering*, *177*. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2023.109011>
- Sathiya, V., Chinnadurai, M., Ramabalan, S., & Appoloni, A. (2021). Mobile robots and evolutionary optimization algorithms for green supply chain management in a used-car resale company. *Environment, Development and Sustainability*, *23*(6), 9110–9138. <https://doi.org/10.1007/s10668-020-01015-2>
- Saulick, P., Bokhoree, C., & Bekaroo, G. (2023). Business sustainability performance: A systematic literature review on assessment approaches, tools and techniques. *Journal of Cleaner Production*, *408*. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136837>
- Schleier, J., & Walther, G. (2024). Strategic network design for recycling of EPS insulation material – insights from a German case study. *International Journal of Production Research*, 1–27. <https://doi.org/10.1080/00207543.2024.2302041>
- Seydanlou, P., Jolai, F., Tavakkoli-Moghaddam, R., & Fathollahi-Fard, A. M. (2022). A multi-objective optimization framework for a sustainable closed-loop supply chain network in the olive industry: Hybrid meta-heuristic algorithms. *Expert Systems with Applications*, *203*. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2022.117566>
- Shankar, R., Bhattacharyya, S., & Choudhary, A. (2018). A decision model for a strategic closed-loop supply chain to reclaim End-of-Life Vehicles. *International Journal of Production Economics*, *195*, 273–286. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2017.10.005>
- Sharma, N., Saraswat, C., Sharma, J., Mittal, M. L., & Keprate, A. (2024). Multi-Objective Optimization for Economic and Environmental Sustainability in Apparel E-commerce Reverse

- Logistics. *International Journal of Mathematical, Engineering and Management Sciences*, 9(1), 111–128. <https://doi.org/10.33889/IJMEMS.2024.9.1.006>
- Shi, J., Chen, W., Zhou, Z., & Zhang, G. (2020). A bi-objective multi-period facility location problem for household e-waste collection. *International Journal of Production Research*, 58(2), 526–545. <https://doi.org/10.1080/00207543.2019.1598591>
- Shi, J., Liu, Z., Tang, L., & Xiong, J. (2017). Multi-objective optimization for a closed-loop network design problem using an improved genetic algorithm. *Applied Mathematical Modelling*, 45, 14–30. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2016.11.004>
- Shoaeinaeini, M., Govindan, K., & Rahmani, D. (2022). Pricing policy in green supply chain design: the impact of consumer environmental awareness and green subsidies. *Operational Research*, 22(4), 3989–4028. <https://doi.org/10.1007/s12351-021-00680-z>
- Shokohyar, S., & Mansour, S. (2013). Simulation-based optimisation of a sustainable recovery network for Waste from Electrical and Electronic Equipment (REEE). *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 26(6), 487–503. <https://doi.org/10.1080/0951192X.2012.731613>
- Sintronics. Flex Sintronics, 2025. Disponível em: < <https://sintronics.com.br/>>. Acesso em: 6 jul. 2025.
- SINIR+. (2024). Disponível em: < <https://www.sinir.gov.br/suplementares/novo-portal-sinir/>>. Acesso em: 5 jul. 2024.
- Soares, S. S. S., Souza, N. V. D. de O., Carvalho, E. C., Queiroz, A. B. A., da Costa, C. C. P., & Souto, J. da S. S. (2022). COVID-19 pandemic and nursing week: analysis from software Iramuteq. *Revista Brasileira de Enfermagem*, 75. <https://doi.org/10.1590/0034-7167-2020-0690>
- Subulan, K., Taşan, A. S., & Baykasoğlu, A. (2015). Designing an environmentally conscious tire closed-loop supply chain network with multiple recovery options using interactive fuzzy goal programming. *Applied Mathematical Modelling*, 39(9), 2661–2702. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2014.11.004>
- Sultana, n.; Rahman, m. M.; Khanam, R. The effect of the informal sector on sustainable development: Evidence from developing countries. *Business Strategy and Development*, v. 5, p. 437–451, 2022. DOI: 10.1002/bsd2.217
- Sun, Q. (2017). Research on the influencing factors of reverse logistics carbon footprint under sustainable development. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(29), 22790–22798. <https://doi.org/10.1007/s11356-016-8140-9>
- Suyabatmaz, A. Ç., Altekin, F. T., & Şahin, G. (2014). Hybrid simulation-analytical modeling approaches for the reverse logistics network design of a third-party logistics provider. *Computers and Industrial Engineering*, 70(1), 74–89. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2014.01.004>
- Tadaros, M., Migdalas, A., Samuelsson, B., & Segerstedt, A. (2022). Location of facilities and network design for reverse logistics of lithium-ion batteries in Sweden. *Operational Research*, 22(2), 895–915. <https://doi.org/10.1007/s12351-020-00586-2>
- Tadić, D., Mimović, P., Kostić, J., & Dordević, M. Z. (2016). A fuzzy bi-linear management model in reverse logistic chains. *Yugoslav Journal of Operations Research*, 26(1), 61–74. <https://doi.org/10.2298/YJOR131015037T>
- Taherifar, M., Hasani, N., Zokaee, M., Aghsami, A., & Jolai, F. (2024). A scenario-based sustainable dual-channel closed-loop supply chain design with pickup and delivery considering social conditions in a natural disaster under uncertainty: a real-life case study. *Environment, Development and Sustainability*, 26(8), 19443–19490. <https://doi.org/10.1007/s10668-023-03421-8>
- Talaei, M., Farhang Moghaddam, B., Pishvae, M. S., Bozorgi-Amiri, A., & Gholamnejad, S. (2016). A robust fuzzy optimization model for carbon-efficient closed-loop supply chain network design

- problem: A numerical illustration in electronics industry. *Journal of Cleaner Production*, 113, 662–673. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.10.074>
- Tari, I., & Alumur, S. A. (2014). Collection Center Location with Equity Considerations in Reverse Logistics Networks. *INFOR*, 52(4), 157–173. <https://doi.org/10.3138/infor.52.4.157>
- Tavana, M., Kian, H., Nasr, A. K., Govindan, K., & Mina, H. (2022). A comprehensive framework for sustainable closed-loop supply chain network design. *Journal of Cleaner Production*, 332. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129777>
- Temucin, T., & Tuzkaya, G. (2020). A multi-objective reverse logistics network design model for after-sale services and a tabu search based methodology. *Journal of Intelligent and Fuzzy Systems*, 38(4), 4139–4157. <https://doi.org/10.3233/JIFS-190431>
- Temur, G. T., & Yanik, S. (2017). *A Novel Approach for Multi-Period Reverse Logistics Network Design under High Uncertainty*.
- Thoney, K. A., Sas, I., Joines, J. A., & King, R. E. (2020). Logistics of carpet recycling in the U.S.: designing the recycling network. *Journal of the Textile Institute*, 111(12), 1724–1734. <https://doi.org/10.1080/00405000.2020.1723257>
- Tian, G., Xia, Z., Tian, R., Sun, H., Yu, L., & Sun, D. (2024). Online and offline cooperation promotion mechanism in the E-waste recycling industry. *Environmental Impact Assessment Review*, 104. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2023.107337>
- Tokhmehchi, N., Makui, A., & Sadi-Nezhad, S. (2015). A hybrid approach to solve a model of closed-loop supply chain. *Mathematical Problems in Engineering*, 2015. <https://doi.org/10.1155/2015/179102>
- Torshizi, E., Bozorgi-Amiri, A., & Sabouhi, F. (2024). Resilient and sustainable global COVID-19 vaccine supply chain design considering reverse logistics. *Applied Soft Computing*, 151. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2023.111041>
- Tosarkani, B. M., & Amin, S. H. (2020). A robust optimization model for designing a wastewater treatment network under uncertainty: Multi-objective approach. *Computers and Industrial Engineering*, 146. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.106611>
- Tosarkani, B. M., Amin, S. H., & Ghiasvand, M. R. (2024). Designing a sustainable plastic bottle reverse logistics network: A data-driven optimization approach. *Expert Systems with Applications*, 251. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2024.123918>
- Tosarkani, B. M., Amin, S. H., & Zolfagharinia, H. (2020). A scenario-based robust possibilistic model for a multi-objective electronic reverse logistics network. *International Journal of Production Economics*, 224. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2019.107557>
- Trochu, J., Chaabane, A., & Ouhimmou, M. (2018a). Reverse logistics network redesign under uncertainty for wood waste in the CRD industry. *Resources, Conservation and Recycling*, 128, 32–47. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.09.011>
- Trochu, J., Chaabane, A., & Ouhimmou, M. (2018b). Reverse logistics network redesign under uncertainty for wood waste in the CRD industry. *Resources, Conservation and Recycling*, 128, 32–47. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.09.011>
- Trochu, J., Chaabane, A., & Ouhimmou, M. (2019). A two-stage stochastic optimization model for reverse logistics network design under dynamic suppliers' locations. *Waste Management*, 95, 569–583. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.06.012>
- Trochu, J., Chaabane, A., & Ouhimmou, M. (2020). A carbon-constrained stochastic model for eco-efficient reverse logistics network design under environmental regulations in the CRD industry. *Journal of Cleaner Production*, 245. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118818>
- Tsao, Y. C., Nugraha Ridhwan Amir, E., Thanh, V. Van, & Dachyar, M. (2021). Designing an eco-efficient supply chain network considering carbon trade and trade-credit: A robust fuzzy

- optimization approach. *Computers and Industrial Engineering*, 160. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2021.107595>
- Tsao, Y. C., Tesfaye Balo, H., & Lee, C. K. H. (2024). Resilient and sustainable semiconductor supply chain network design under trade credit and uncertainty of supply and demand. *International Journal of Production Economics*, 274. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2024.109318>
- Turrioni, J. B.; Melo, D. C. Metodologia de pesquisa em engenharia de produção. Itajubá: Editora da Universidade Federal de Itajubá, 2012.
- UE. (2012). *Diretiva 2012/19/UE do Parlamento Europeu e do Conselho, de 4 de julho de 2012, relativa aos resíduos de equipamentos elétricos e eletrónicos (REEE)*. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/PDF/?uri=CELEX:32012L0019>
- UK. (2013). *The Waste Electrical and Electronic Equipment Regulations 2013*.
- United Nations Environment Programme. (2024). *Global Waste Management Outlook 2024: Beyond an age of waste – Turning rubbish into a resource*. . <https://wedocs.unep.org/20.500.11822/44939>
- Vahdani, B., & Mohammadi, M. (2015). A bi-objective interval-stochastic robust optimization model for designing closed loop supply chain network with multi-priority queuing system. *International Journal of Production Economics*, 170, 67–87. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2015.08.020>
- Vahdani, B., Tavakkoli-Moghaddam, R., Jolai, F., & Baboli, A. (2013). Reliable design of a closed loop supply chain network under uncertainty: An interval fuzzy possibilistic chance-constrained model. *Engineering Optimization*, 45(6), 745–765. <https://doi.org/10.1080/0305215X.2012.704029>
- Vali-Siar, M. M., & Roghanian, E. (2022). Sustainable, resilient and responsive mixed supply chain network design under hybrid uncertainty with considering COVID-19 pandemic disruption. *Sustainable Production and Consumption*, 30, 278–300. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2021.12.003>
- Valizadeh, J., Sadeh, E., Amini Sabegh, Z., & Hafezalkotob, A. (2020). Robust optimization model for sustainable supply chain for production and distribution of polyethylene pipe. *Journal of Modelling in Management*, 15(4), 1613–1653. <https://doi.org/10.1108/JM2-06-2019-0139>
- Van eck, n. J.; Waltman, I. Software survey: VOSviewer, a computer program for bibliometric mapping. *Scientometrics*, v. 84, n. 2, p. 523–538, 2010. Disponível em: <https://www.vosviewer.com> . Acesso em: 22 out. 2025. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11192-009-0146-3>
- Van Engeland, J., Beliën, J., De Boeck, L., & De Jaeger, S. (2020). Literature review: Strategic network optimization models in waste reverse supply chains. Em *Omega (United Kingdom)* (Vol. 91). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2018.12.001>
- Wang, J., Cevik, M., Amin, S. H., & Parsaee, A. A. (2021). Mixed-integer linear programming models for the paint waste management problem. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 151. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2021.102343>
- Wang, Q., Li, R., Jiang, L., Chen, L., Wang, Y., & Wang, G. (2022). Site Selection Optimization of Reverse Logistics Network for Waste Tires. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2022. <https://doi.org/10.1155/2022/5438290>
- Wang, Y., Zhe, J., Wang, X., Fan, J., Wang, Z., & Wang, H. (2022). Collaborative multicenter reverse logistics network design with dynamic customer demands. *Expert Systems with Applications*, 206. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2022.117926>
- Wang, Z., Huang, L., & He, C. X. (2021). A multi-objective and multi-period optimization model for urban healthcare waste's reverse logistics network design. *Journal of Combinatorial Optimization*, 42(4), 785–812. <https://doi.org/10.1007/s10878-019-00499-7>

- Wenzhu Liao, G. H., & Luo, X. (2022). Collaborative reverse logistics network for electric vehicle batteries management from sustainable perspective. *Journal of Environmental Management*, 324. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116352>
- Wu, H., & Wan, Z. (2018). A multiobjective optimization model and an orthogonal design-based hybrid heuristic algorithm for regional urban mining management problems. *Journal of the Air and Waste Management Association*, 68(2), 146–169. <https://doi.org/10.1080/10962247.2017.1386141>
- Xiao, Z., Sun, J., Shu, W., & Wang, T. (2019a). Location-allocation problem of reverse logistics for end-of-life vehicles based on the measurement of carbon emissions. *Computers and Industrial Engineering*, 127, 169–181. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.12.012>
- Xiao, Z., Sun, J., Shu, W., & Wang, T. (2019b). Location-allocation problem of reverse logistics for end-of-life vehicles based on the measurement of carbon emissions. *Computers and Industrial Engineering*, 127, 169–181. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.12.012>
- Xu, J., Jiang, J., & Shi, Y. (2022). An innovative optimization model for sustainable hazardous waste reverse logistics network considering co-processing in cement kilns technology. *Process Safety and Environmental Protection*, 163, 167–190. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2022.04.071>
- Yakavenka, V., Mallidis, I., Vlachos, D., Iakovou, E., & Eleni, Z. (2020). Development of a multi-objective model for the design of sustainable supply chains: the case of perishable food products. *Annals of Operations Research*, 294(1–2), 593–621. <https://doi.org/10.1007/s10479-019-03434-5>
- Yaspal, B., Jauhar, S. K., Kamble, S., Belhadi, A., & Tiwari, S. (2023). A data-driven digital transformation approach for reverse logistics optimization in a medical waste management system. *Journal of Cleaner Production*, 430. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.139703>
- Yavari, M., & Geraeli, M. (2019). Heuristic method for robust optimization model for green closed-loop supply chain network design of perishable goods. *Journal of Cleaner Production*, 226, 282–305. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.279>
- YILDIZBASI, A., & ARIÖZ, Y. (2021). *A Novel Hybrid Network Optimization Model for Printed Circuit Boards Recycling: A Circular Economy Perspective*. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-157521/v1>
- Yıldız, T. D. (2021). Possible effects of mining zone regulation on mining companies in Turkey & evaluation of mining companies. *Resources Policy*, 71. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2021.102011>
- Yousefi-Babadi, A., Tavakkoli-Moghaddam, R., Bozorgi-Amiri, A., & Seifi, S. (2017). Designing a Reliable Multi-Objective Queuing Model of a Petrochemical Supply Chain Network under Uncertainty: A Case Study. *Computers and Chemical Engineering*, 100, 177–197. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2016.12.012>
- Yu, H., & Solvang, W. D. (2016a). A general reverse logistics network design model for product reuse and recycling with environmental considerations. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 87(9–12), 2693–2711. <https://doi.org/10.1007/s00170-016-8612-6>
- Yu, H., & Solvang, W. D. (2016b). A stochastic programming approach with improved multi-criteria scenario-based solution method for sustainable reverse logistics design of waste electrical and electronic equipment (REEE). *Sustainability (Switzerland)*, 8(12). <https://doi.org/10.3390/su8121331>
- Yu, H., & Solvang, W. D. (2017). A carbon-constrained stochastic optimization model with augmented multi-criteria scenario-based risk-averse solution for reverse logistics network design under uncertainty. *Journal of Cleaner Production*, 164, 1248–1267. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.07.066>

- Yu, H., & Solvang, W. D. (2020). A fuzzy-stochastic multi-objective model for sustainable planning of a closed-loop supply chain considering mixed uncertainty and network flexibility. *Journal of Cleaner Production*, 266. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121702>
- Yu, H., Sun, X., Solvang, W. D., & Zhao, X. (2020). Reverse logistics network design for effective management of medical waste in epidemic outbreaks: Insights from the coronavirus disease 2019 (COVID-19) outbreak in Wuhan (China). *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(5). <https://doi.org/10.3390/ijerph17051770>
- Yu, H., & Tong, X. (2021). Producer vs. local government: The locational strategy for end-of-life photovoltaic modules recycling in Zhejiang province. *Resources, Conservation and Recycling*, 169. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105484>
- Zarbakshnia, N., Kannan, D., Kiani Mavi, R., & Soleimani, H. (2020). A novel sustainable multi-objective optimization model for forward and reverse logistics system under demand uncertainty. *Annals of Operations Research*, 295(2), 843–880. <https://doi.org/10.1007/s10479-020-03744-z>
- Zarbakshnia, N., Soleimani, H., Goh, M., & Razavi, S. S. (2019). A novel multi-objective model for green forward and reverse logistics network design. *Journal of Cleaner Production*, 208, 1304–1316. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.138>
- Zhang, X., Zou, B., Feng, Z., Wang, Y., & Yan, W. (2022). A Review on Remanufacturing Reverse Logistics Network Design and Model Optimization. *Em Processes* (Vol. 10, Número 1). MDPI. <https://doi.org/10.3390/pr10010084>
- Zhang, Y., Berenguer, G., & Zhang, Z. H. (2024). A subsidized reverse supply chain in the Chinese electronics industry. *Omega (United Kingdom)*, 122. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2023.102937>
- Ziari, M., & Sajadieh, M. S. (2022). A joint pricing and network design model for a closed-loop supply chain under disruption (glass industry). *RAIRO - Operations Research*, 56(1), 431–444. <https://doi.org/10.1051/ro/2022002>