UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO

Escola Politécnica & Escola de Química

Programa de Engenharia Ambiental

Rafaela Gomes Correa

AVALIAÇÃO DA EFICÁCIA DAS PRINCIPAIS ESTRATÉGIAS DE ECONOMIA CIRCULAR QUANTO À SUSTENTABILIDADE

Rio de Janeiro

2025

UFRJ

Rafaela Gomes Correa

AVALIAÇÃO DA EFICÁCIA DAS PRINCIPAIS ESTRATÉGIAS DE ECONOMIA CIRCULAR QUANTO À SUSTENTABILIDADE

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Engenharia Ambiental, Escola Politécnica & Escola de Química, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Ambiental.

Orientadores: Professor Eduardo Gonçalves Serra, D.Sc.
Professor Sérgio Luiz Costa Bonecker, D.Sc.

Rio de Janeiro

2025

Correa, Rafaela Gomes.
Avaliação da eficácia das principais estratégias de economia circular quanto à sustentabilidade / Rafaela Gomes Correa. – – Rio de Janeiro, 2025.
229 f.

Orientador: Eduardo Gonçalves Serra.
Coorientador: Sérgio Luiz Costa Bonecker.

Tese (doutorado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Escola de Química, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, 2025.

1. Economia circular. 2. Economia verde. 3. Estratégias de circularidade. 4. Desenvolvimento sustentável. I. Serra, Eduardo Gonçalves, orient. II. Bonecker, Sérgio Luiz Costa, coorient. III. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Escola Politécnica e Escola de Química. IV. Título.

AVALIAÇÃO DA EFICÁCIA DAS PRINCIPAIS ESTRATÉGIAS DE ECONOMIA CIRCULAR QUANTO À SUSTENTABILIDADE

Rafaela Gomes Correa

Orientadores: Professor Eduardo Gonçalves Serra, D.Sc.
Professor Sérgio Luiz Costa Bonecker, D.Sc.

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Engenharia Ambiental, Escola Politécnica & Escola de Química, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Ambiental.

Aprovada pela Banca em: 01 / 02 / 2025

Presidente, Prof. Eduardo Gonçalves Serra, D.Sc., UFRJ

Prof. Sérgio Luiz Costa Bonecker, D.Sc., UFRJ

Prof. Estevão Freire, D.Sc., UFRJ

Prof. Maria Antonieta Peixoto Gimenes Couto, D.Sc., UFRJ

Prof. Rafael Garcia Barbastefano, D.Sc., CEFET-RJ

Prof. Sérgio de Mattos Fonseca, D.Sc., FAETEC

Prof. Victor Paulo Peçanha Esteves, D.Sc., UFRJ

Rio de Janeiro
2025

AGRADECIMENTOS

A Deus, porque tudo é dom e graça d'Ele.

Aos meus orientadores, professor Dr. Eduardo Gonçalves Serra, cuja enorme experiência e profundo conhecimento me incentivaram a refletir criticamente sobre a realidade à minha volta, e professor Dr. Sérgio Luiz Costa Bonecker pelo generoso acolhimento acadêmico.

À Escola Politécnica, à Escola de Química e ao Programa de Engenharia Ambiental (PEA) da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), pela oportunidade de participar do curso de doutorado nesta prestigiada instituição.

A todos os professores do PEA, pelos conhecimentos transmitidos, e à assistente em administração, Andreia da Conceição Rangel, pelo irrestrito apoio técnico-administrativo ao longo do curso.

À minha família, meus amados pais Agildo e Maria Cristina, que proporcionaram os meios materiais durante toda a minha vida que resultaram nesta conquista, e meu amado companheiro, Marcio Henrique, pela presença certa em todos os momentos desta jornada.

RESUMO

CORREA, Rafaela Gomes. **Avaliação da eficácia das principais estratégias de economia circular quanto à sustentabilidade**. Rio de Janeiro, 2025. Tese (Doutorado) – Programa de Engenharia Ambiental, Escola Politécnica e Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2025.

O desenvolvimento tecnológico e econômico gerou relevantes benefícios à humanidade ao longo dos anos, mas também representou um elevado custo para o planeta, cuja capacidade de renovação vem sendo suplantada pela crescente demanda global por recursos naturais. Em termos mundiais, enquanto os elevados volumes de produção e consumo de bens vêm resultando em expressivas taxas de geração de resíduos, os índices de recuperação destes materiais não vêm evoluindo na mesma proporção. Dentre os bens de consumo não duráveis, os resíduos têxteis pós-consumo destacam-se em virtude das baixas taxas de reciclagem que apresentam. Já, sob a perspectiva dos bens de consumo duráveis, equipamentos eletroeletrônicos estão entre aqueles que geram elevadas quantidades anuais de resíduos. Neste cenário, à medida que o crescimento populacional avança, impulsionando a demanda por bens de consumo, urge a necessidade de soluções para o gerenciamento adequado dos volumes crescentes de resíduos gerados. O presente trabalho analisa a abrangência da economia circular, verificando até que ponto diferentes estratégias de economia circular podem contribuir para a transição em direção ao desenvolvimento sustentável. Para isso, investiga o discurso da economia circular que se coloca como uma solução final e definitiva para a degradação ambiental vigente, avaliando se, de fato, apresenta a capacidade de aprimorar a sustentabilidade. Nesta análise, foram selecionados dois grupos de produtos significativos em termos de volumes de produção e consumo, quais sejam: os produtos têxteis e os equipamentos eletroeletrônicos do tipo máquinas de lavar roupa. Estes grupos foram analisados à luz das principais estratégias circulares identificadas na literatura, de forma a avaliar as restrições de aplicação dos conceitos e os limites da prática de sobrevivência das empresas nesse cenário. A metodologia empregada envolveu a proposição de avaliação da sustentabilidade por meio de um sistema de respostas à degradação ambiental dividido em três níveis, a saber: mitigação primária, mitigação sistemática e mitigação sistêmica. A crítica realizada na tese é considerada inédita por considerar as limitações da aplicação da economia circular e identificar a necessidade de reconfigurar os padrões vigentes de produção e consumo. Os resultados permitem concluir que, em meio à economia de mercado atual, as estratégias de economia circular podem mitigar os impactos ambientais, mas, por si só, não são capazes de gerar soluções sustentáveis. Para aprimorar a sustentabilidade é necessário alterar os sistemas sociais de produção e consumo para níveis mais sustentáveis, reduzindo os volumes produzidos e consumidos, por meio de abordagens, como por exemplo, a desmercantilização, isto é, não ter produtos como mercadorias, mas sim pelo seu valor de uso.

Palavras-chave: economia circular, economia verde, ecologia industrial, reciclagem, remanufatura, produto como serviço, compartilhamento, sustentabilidade.

ABSTRACT

CORREA, Rafaela Gomes **Effectiveness assessment of main circular economy strategies in terms of sustainability**. Rio de Janeiro, 2025. Tese (Doutorado) – Programa de Engenharia Ambiental, Escola Politécnica e Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2025.

Technological and economic development has generated relevant benefits for humanity over the years, but it has also represented a high cost for the planet, whose capacity for renewal has been surpassed by the growing global demand for natural resources. In global terms, although the high volumes of production and consumption of goods have resulted in significant rates of waste generation, the recovery rates of these materials have not evolved at the same pace. Among non-durable consumer goods, post-consumer textile waste stands out for its low recycling rates. From the perspective of consumer durables, electronic equipment is among those that generate large amounts of waste annually. As population growth advances, leading to increased demand for consumer goods, there is an urgent need for solutions for the adequate management of the growing volumes of waste generated. This work evaluates the possibility of achieving sustainability through the adoption of circular strategies in two economic segments. For this analysis, textile products and electronic equipment such as washing machines were selected as they have significant relevance in the national economy. This work analyzes the scope of the circular economy, verifying the extent to which different circular economy strategies can contribute to the transition towards sustainable development. To do this, investigate the discourse of the circular economy, which stands as a final and definitive solution for current environmental management, evaluating whether, in fact, it has the capacity to improve sustainability. In this analysis, two groups of products that were significant in terms of production and consumption volumes were selected, namely: textile products and electrical and electronic equipment such as washing machines. These groups were analyzed in light of the main circular strategies identified in the literature, in order to evaluate the restrictions on the application of the concepts and the limits of companies' survival practices in this scenario. The methodology used also involved the proposition of assessing sustainability through a system of responses to environmental degradation divided into three levels, namely: primary mitigation, systematic mitigation and systemic mitigation. The criticism carried out in this thesis is considered unprecedented because it considers the limitations of applying the circular economy and identifies the need to reconfigure current production and consumption patterns. The results allow us to conclude that, in the current market economy, circular economy strategies can mitigate environmental impacts, but, by themselves, they are not capable of generating sustainable solutions. To improve sustainability, it is necessary to change social systems of production and consumption to more sustainable levels, reducing the volumes produced and consumed, through approaches such as decommodification, that is, not having products as commodities, but rather for their use value.

Keywords: circular economy, green economy, industrial ecology, reuse, recycling, remanufacturing, product as service, sharing, sustainability.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Produção de artigos têxteis e de confecção por segmento no Brasil 90
Tabela 2 - Produção nacional de fibras têxteis por tipo (em mil toneladas) 94
Tabela 3 - Produção de fibras global no ano de 2022 96
Tabela 4 - Cronograma de implantação do sistema de logística reversa de eletroeletrônicos 126
Tabela 5 - Metais presentes e recuperados nos REEE 143
Tabela 6 - Geração, coleta e reciclagem de REEE por categoria no mundo em 2022 148
Tabela 7 - Tempo de vida das máquinas de lavar 149
Tabela 8 - Indicação de pesos médios das máquinas de lavar para os vinte e oito Estados-Membros da União Europeia 150
Tabela 9 - Composição de materiais em uma máquina de lavar 150
Tabela 10 - Participação relativa das fases do ciclo de vida de uma máquina de lavar por categoria de impacto 154
Tabela 11 - Produção de máquinas de lavar em quantidade e em valor no Brasil no período de 2018 a 2022 159
Tabela 12 - Vendas de máquinas de lavar em quantidade e em valor no Brasil no período de 2018 a 2022 161
Tabela 13 - Cenários de reúso 165
Tabela 14 - Taxas de reciclagem dos materiais reciclados presentes nos RSU 188
Tabela 15 - Índices de recuperação de RSU 190

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Filtros de pesquisa na base Web of Science 30
Quadro 2 - Filtros de pesquisa utilizados na base Web of Science 35
Quadro 3 - Filtros de pesquisa utilizados na base Web of Science 38
Quadro 4 - Pesquisa pelos termos "circular economy", production e consumption 41
Quadro 5 - Filtros de pesquisa na base Web of Science 86
Quadro 6 - Filtros de pesquisa na base Web of Science 127
Quadro 7 - Filtros de pesquisa na base Web of Science 130
Quadro 8 - Filtros de pesquisa na base Web of Science 130

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Índice Planeta Vivo Global 19
Figura 2 - Pegada ecológica e biocapacidade mundiais (gha por pessoa) 20
Figura 3 – Fluxograma esquemático da metodologia utilizada 28
Figura 4 - Estrutura da tese 29
Figura 5 - Tipos de documentos no período analisado 31
Figura 6 - Quantidade de artigos publicados por ano no período analisado 32
Figura 7 - Distribuição percentual dos artigos por área de interesse no período analisado 33
Figura 8 - Continuação da distribuição percentual dos artigos publicados por área de interesse no período analisado 33
Figura 9 - Distribuição dos artigos publicados por países / regiões 34
Figura 10 - Continuação da distribuição dos artigos publicados por países / regiões 35
Figura 11 - Quantidade total de publicações sobre as principais estratégias de economia circular na base Web of Science no período analisado 36
Figura 12 - Caminho metodológico empregado 40
Figura 13 - Linha do tempo das preocupações ambientais 47
Figura 14 - Diagrama de borboleta da Economia Circular 65
Figura 15 - Influências históricas e bases para a economia circular 69
Figura 16 - Pegada ecológica da humanidade por atividades 78
Figura 17 - Pegada ecológica de uso da terra da população global 79
Figura 18 - Cadeia Produtiva Têxtil e de Confecção 83
Figura 19 - Tipos de documentos no período analisado 86
Figura 20 - Quantidade de artigos publicados por ano 87
Figura 21 - Distribuição percentual dos artigos publicados por área de interesse 88
Figura 22 - Distribuição dos artigos publicados por países / regiões 89
Figura 23 - Consumo mundial de fibras têxteis 91
Figura 24 - Produção e consumo por habitante de têxteis no Brasil 92
Figura 25 - Mercado de fibra global em 2022 98
Figura 26 - Fluxo de materiais globais para vestuário 99
Figura 27 - Impactos ambientais no ciclo de vida (do berço ao túmulo) de uma peça têxtil por fibra: algodão, poliéster e viscose 101
Figura 28 - Mercado de fibras recicladas por tipo em 2022 107
Figura 29 - Ciclo de vida de uma peça de vestuário 108
Figura 30 - Comércio de antiguidades, brechós e bazares no Brasil 112
Figura 31 - Hierarquia de resíduos 115
Figura 32 - Tipos de documentos no período analisado 127
Figura 33 - Quantidade de artigos publicados por ano 128
Figura 34 - Distribuição percentual dos artigos publicados por área de interesse 129
Figura 35 - Distribuição dos artigos publicados por países / regiões 129
Figura 36 - Quantidade de artigos publicados por ano 130
Figura 37 - Distribuição percentual dos artigos publicados por área de interesse 131
Figura 38 - Distribuição dos artigos publicados por países / regiões 132
Figura 39 - Fluxo dos REEE gerados em 2022 134
Figura 40 - Quantidades de REEE gerados e documentados como formalmente coletados e reciclados por região 135
Figura 41 - Países com maior geração de REEE nas Américas 136

Figura 42 - Fluxos de EEE e REEE 138
Figura 43 - Coleta e reciclagem formais de REEE 139
Figura 44 - Descarte de REEE juntamente com os resíduos comuns 140
Figura 45 - Coleta e reciclagem informais de REEE em países com infraestrutura de gestão de REEE 141
Figura 46 - Coleta e reciclagem informais de REEE em países sem infraestrutura de gestão de REEE 142
Figura 47 - Impactos ambientais de uma máquina de lavar 153
Figura 48 - Contribuição dos diferentes materiais para o consumo energético correspondente ao fornecimento de materiais 155
Figura 49 - Custos do ciclo de vida de uma máquina de lavar 156
Figura 50 - Os principais recursos e emissões envolvidos no ciclo de vida de uma máquina de lavar 157
Figura 51 - Percentual de domicílios brasileiros que possuem máquina de lavar 162
Figura 52 - Estratégias de economia circular sistematizadas por modelo de ação 179
Figura 53 - Estratégias da economia circular ao longo da cadeia de valor de valor 183
Figura 54 - Projeções de geração global de RSU por ano em 2030, 2040 e 2050, na ausência de ações urgentes 185
Figura 55 - Custos diretos estimados da gestão de RSU no mundo em 2020 186
Figura 56 - Metas do Planares por tipo de destinação final de RSU 191
Figura 57 - Comparativo entre os índices de reciclagem de resíduos têxteis e eletroeletrônicos e a recuperação de RSU 193

LISTA DE SIGLAS

ABDI	Associação Brasileira de Desenvolvimento Industrial
ABINEE	Associação Brasileira Indústria Elétrica Eletrônica
ABIT	Associação Brasileira da Indústria Têxtil e de Confecção
ABRAFAS	Associação Brasileira de Produtores de Fibras Artificiais e Sintéticas
ABRAPA	Associação Brasileira dos Produtores de Algodão
ABREE	Associação Brasileira de Reciclagem de Eletroeletrônicos e Eletrodomésticos
ABRELPE	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
ABREMA	Associação Brasileira de Resíduos e Meio Ambiente
ANCAT	Associação Nacional de Catadores e Catadoras de Materiais Recicláveis
ANTP	Associação Nacional de Transportes Públicos
ASG	Ambiental, Social e Governança Corporativa
CEBDS	Conselho Empresarial Brasileiro para o Desenvolvimento Sustentável
CIRFS	European Man-made Fibres Association
CNI	Confederação Nacional da Indústria
C2C	Cradle to Cradle
EEE	Equipamento Eletroeletrônico
ENEC	Estratégia Nacional de Economia Circular
EPI	Equipamento de Proteção Individual
ESG	Environmental, Social and Corporate Governance
FAO	Food and Agriculture Organization
FEM	Fórum Econômico Mundial
FGVces	Centro de Estudos em Sustentabilidade da FGV
FSC	Forest Stewardship Council
GEE	Gases de Efeito Estufa
GFN	Global Footprint Network
GPEA	Grupo Pesquisador em Educação Ambiental, Comunicação e Arte
IBER	Instituto Brasileiro de Energia Reciclável
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICAC	International Cotton Advisory Commitee
IEMI	Inteligência de Mercado
IPEA	Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada
IRP	International Resource Panel
ISWA	International Solid Waste Association
ITU	International Telecommunication Union
IWTO	International Wool Textile Organisation
MDL	Mecanismo de Desenvolvimento Limpo
MEI	Microempreendedor Individual
MP	Material particulado
NMHC	Hidrocarbonetos Não Metanos
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
OECD	Organisation for Economic Co-operation and Development

OMC	Organização Mundial do Comércio
ONU	Organização das Nações Unidas
PET	Politereftalato de Etileno
PIA-Produto	Pesquisa Industrial Anual
PNAD Contínua	Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios Contínua
PNEC	Política Nacional de Economia Circular
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
PNUMA	Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente
REDD	Redução das Emissões por Desmatamento e Degradação Florestal
REEE	Resíduo de Equipamento Eletroeletrônico
RSU	Resíduo Sólido Urbano
SBCE	Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões de Gases de Efeito Estufa
SEBRAE	Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas
SINIR	Sistema Nacional de Informações sobre a Gestão dos Resíduos Sólidos
StEP	Solving the E-Waste Problem
UNEP	United Nations Environment Programme
UNITAR	United Nations Institute for Training and Research
UNU	United Nations University
WEEE	Waste from Eletrical and Eletronic Equipment
WWF	World Wildlife Fund

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 16
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO, JUSTIFICATIVA E OBJETIVO DA PESQUISA 16
1.2 ESTRUTURA DA PESQUISA 23
1.3 HIPÓTESE 25
2 METODOLOGIA 26
2.1 PRODUÇÃO ACADÊMICA DA ECONOMIA CIRCULAR E SUAS ESTRATÉGIAS 29
2.2 PROPOSIÇÃO DE AVALIAÇÃO DA SUSTENTABILIDADE POR NÍVEIS DE RESPOSTA 37
2.3 ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA 38
3 REFERENCIAL TÉORICO 42
3.1 BASES HISTÓRICAS 42
3.2 SUSTENTABILIDADE: ORIGENS E APLICAÇÃO DO CONCEITO 48
3.3 ECONOMIA VERDE: O CAMPO DA ECONOMIA CIRCULAR 50
3.3.1 A perspectiva da ética na economia verde 54
3.3.2 Mudanças climáticas no âmbito da economia verde 55
3.3.3 Os limites da economia verde em uma sociedade de mercado 59
3.4 ECONOMIA CIRCULAR 60
3.4.1 Definições e princípios 60
3.4.2 Evolução da economia circular: escolas de pensamento 68
3.4.3 Componentes básicos da economia circular 72
3.5 DIAGNÓSTICO INICIAL DOS VOLUMES DE PRODUÇÃO NOS SEGMENTOS ANALISADOS 76
4 TÊXTEIS E VESTUÁRIO 80
4.1 VISÃO GERAL E ESTRUTURA DO SETOR 80
4.2 ESFORÇOS DE PESQUISA ACADÊMICA NO DOMÍNIO DA ECONOMIA CIRCULAR 85
4.3 PRODUÇÃO E CONSUMO DE PRODUTOS TÊXTEIS E DE VESTUÁRIO 89
4.4 GERAÇÃO DE RESÍDUOS TÊXTEIS E DE VESTUÁRIO E OS SEUS IMPACTOS 98
4.4.1 Impactos ambientais 98
4.4.2 Impactos econômicos 104
4.5 TAXAS DE RECICLAGEM DE FIBRAS TÊXTEIS 105
4.6 DESENVOLVIMENTOS DA ECONOMIA CIRCULAR NO ÂMBITO DA INDÚSTRIA TÊXTIL E DE VESTUÁRIO 107
4.6.1 Recuperação de recursos 110
4.6.2 Extensão da vida útil 111
4.6.3 Reúso 113
4.6.4 Reciclagem 114
4.6.4.1 Reciclagem têxtil 114
4.6.4.2 Reciclagem a partir de materiais não têxteis 119
4.6.5 Remanufatura 120

4.6.6 Compartilhamento ... 121
5 EQUIPAMENTOS ELETROELETRÔNICOS ... 123
5.1 VISÃO GERAL E ESTRUTURA DO SETOR ... 123
5.2 ESFORÇOS DE PESQUISA ACADÊMICA NO DOMÍNIO DA ECONOMIA CIRCULAR ... 127
5.3 PRODUÇÃO E CONSUMO DE EQUIPAMENTOS ELETROELETRÔNICOS ... 132
5.4 GERAÇÃO DE RESÍDUOS ELETROELETRÔNICOS E SEUS IMPACTOS ... 142
5.4.1 Impactos ambientais ... 142
5.4.2 Impactos econômicos ... 145
5.5 TAXAS DE RECICLAGEM DE RESÍDUOS ELETROELETRÔNICOS ... 147
5.6 ELETROELETRÔNICOS: O CASO DAS MÁQUINAS DE LAVAR ... 149
5.7 PRODUÇÃO E CONSUMO DE MÁQUINAS DE LAVAR ... 158
5.8 DESENVOLVIMENTOS DA ECONOMIA CIRCULAR NO ÂMBITO DA INDÚSTRIA DE MÁQUINAS DE LAVAR ... 163
5.8.1 Recuperação de recursos ... 163
5.8.2 Extensão da vida útil ... 164
5.8.2 Reúso ... 165
5.8.4 Remanufatura ... 167
5.8.5 Sistema Produto-Serviço (PSS) ... 169
5.8.6 Compartilhamento ... 171
6 ANÁLISE DA SUSTENTABILIDADE DAS ESTRATÉGIAS DE ECONOMIA CIRCULAR ... 173
6.1 ECONOMIA CIRCULAR E EFEITO REBOTE ... 173
6.2 IMPACTO DAS ESTRATÉGIAS CIRCULARES SOB A SUSTENTABILIDADE ... 177
6.2.1 Análise quanto aos atributos de circularidade ... 177
6.2.2 Análise quanto ao grau de circularidade ... 182
6.3 RECUPERAÇÃO DE RESÍDUOS: CUSTOS E TAXAS ... 184
6.3.1. Custos de recuperação de RSU ... 184
6.3.2 Taxas de recuperação de RSU ... 187
6.3.3 Taxas de recuperação de resíduos têxteis e eletroeletrônicos vs. RSU ... 189
6.4 LIMITAÇÕES DA ECONOMIA CIRCULAR COMO SOLUÇÃO MITIGADORA ... 194
6.4.1 Economia circular não é a bala de prata para a degradação ambiental ... 197
6.5 RECONFIGURAÇÃO DOS SISTEMAS SOCIAIS DE PRODUÇÃO E CONSUMO COMO RESPOSTA À DEGRADAÇÃO AMBIENTAL ... 199
6.6 DESAFIOS PARA O AUMENTO DA EFICÁCIA DAS ESTRATÉGIAS DE ECONOMIA CIRCULAR QUANTO À SUSTENTABILIDADE ... 200
7 CONCLUSÕES ... 203
7.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS ... 206
7.2 LIMITAÇÕES DO ESTUDO ... 210
7.3 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS ... 210
REFERÊNCIAS ... 212

1 INTRODUÇÃO

Este capítulo apresenta uma breve contextualização acerca do tema de desenvolvimento sustentável no contexto da economia circular. Nesta seção, o problema de pesquisa é posicionado em um contexto histórico, demonstrando a transição do modelo econômico linear para propostas de soluções circulares. Esta seção apresenta, também, a hipótese inicial, bem como as justificativas que motivam a realização desta investigação. Como motivação para o desenvolvimento desta tese, observa-se a importância de se analisar as iniciativas de economia circular no âmbito das indústrias têxtil e de equipamentos eletroeletrônicos em função dos relevantes potenciais de geração de externalidades negativas que apresentam.

Externalidades são efeitos externos a qualquer transação econômica. Hall e Lieberman (2003) descrevem que uma externalidade é um subproduto de um bem ou atividade que gera efeitos sobre um agente não envolvido na transação de forma imediata. Os autores observam que, caso esses efeitos sejam benéficos a terceiros, tem-se uma externalidade positiva; caso sejam prejudiciais, a externalidade é negativa.

Como exemplo de externalidade negativa, tem-se o caso hipotético de uma organização fabricante de produtos químicos que libera contaminantes no meio ambiente. Neste caso, o preço de mercado dos produtos químicos pode não estar refletindo de forma precisa os custos sociais efetivos, uma vez que pode não estar comtemplando os danos causados a terceiros. Deste modo, a informação transmitida pelos preços do mercado é imprecisa, refletindo em uma alocação ineficiente dos recursos (Nicholson, 2008). Portanto, o preço reflete o custo privado, mas não o custo social.

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO, JUSTIFICATIVA E OBJETIVO DA PESQUISA

A expressão “bala de prata” tem origem em histórias de folclore, nas quais uma bala mágica seria capaz de eliminar seres sobrenaturais e imortais como lobisomens, bruxas, dentre outros monstros. Este sistema de crenças originou uma metáfora usada quando adotamos uma solução simples e acessível para sanar um problema de elevada complexidade (Marques, 2020).

No mundo atual, dotado de intensa evolução tecnológica e rápida transformação digital, produtores e vendedores de balas de prata podem ser encontrados em muitos lugares. Há, por exemplo, indivíduos que defendem a inovação como se ela tivesse a capacidade de, por si só, superar os problemas de uma determinada área. No entanto, a despeito da existência de pessoas que tratam a tecnologia como um fim em si mesma (isto é, capaz de curar todos os males existentes), não existe um sistema ou qualquer infraestrutura que tenha a capacidade de resolver, em sua plenitude, os desafios que a atualidade impõe (Araújo, 2020).

Neste mundo moderno, submetido à contínua e crescente degradação ambiental, muito se fala em soluções capazes de mitigar os impactos adversos gerados ao meio ambiente. Dentre as alternativas apresentadas por parte da comunidade científica e noticiada pela mídia, a economia circular vem ganhando destaque como uma possível “bala de prata”, isto é, uma solução em si mesma para resolver de forma definitiva os problemas ambientais.

O relatório *Stockholm + 50 Unlocking a Better Future* emitido em junho de 2022 (SEI e CEEW, 2022) enfatiza que o mundo passou por muitas mudanças nos últimos cinquenta anos, mas não na direção que a Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente Humano realizada em Estocolmo em 1972 requeria.

As questões econômicas, especialmente aquelas pertinentes à produção e ao consumo, nunca estiveram tão vinculadas às discussões ambientais e sociais como nos dias atuais. A humanidade vem discutindo, desde a década de 1970, formas para conciliar desenvolvimento e conservação dos recursos necessários à vida e à manutenção do planeta (Betiol *et al*., 2012).

Em seu relatório *World Population Prospects 2024,* as Nações Unidas projetam o aumento da população mundial nas próximas cinco ou seis décadas, passando de 8,2 bilhões de pessoas em 2024 para cerca de 10,3 bilhões de pessoas em meados de 2080, alcançando o pico populacional. Na sequência temporal, estima-se uma diminuição gradual da população mundial para 10,2 bilhões de pessoas até o ano de 2100 (United Nations, 2024). O incremento de aproximadamente 26% na população mundial entre os anos de 2024 a 2080 intensifica a pressão sobre o consumo de recursos naturais e, em se mantendo os padrões atuais de produção e consumo, o agravamento dos fenômenos das mudanças climáticas.

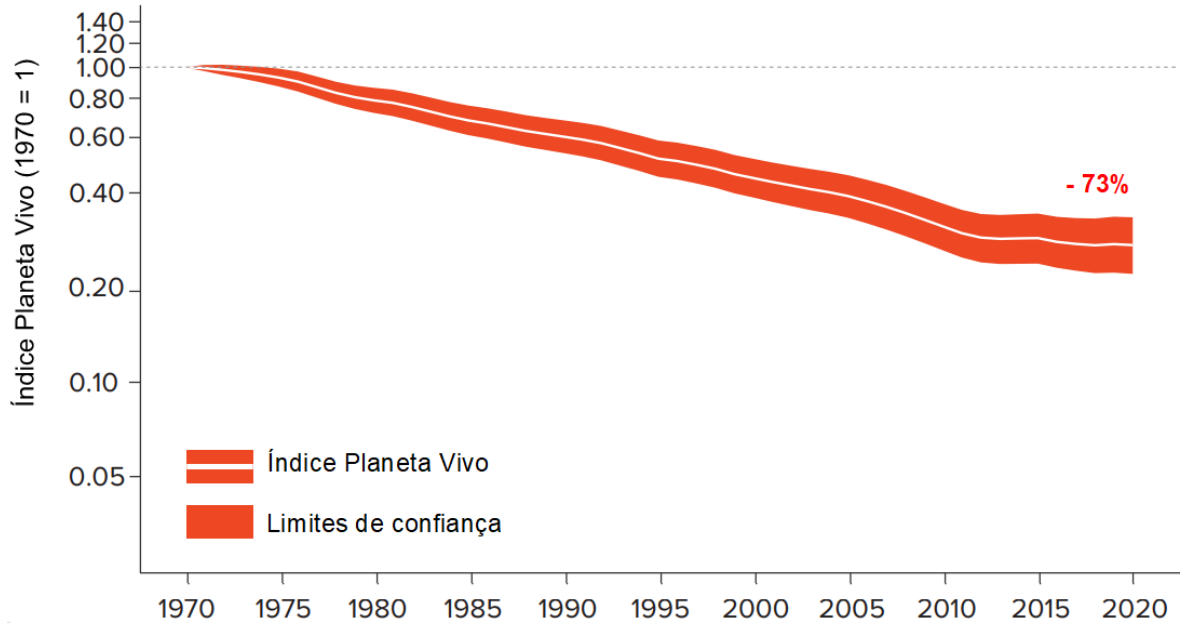
Neste contexto, a economia circular apresenta-se como uma possível alternativa ao modelo econômico atual baseado na tríade de extração, produção e desperdício. Em sua busca por redefinir a ideia de crescimento com a geração de benefícios para toda a sociedade, propõe a dissociação do desenvolvimento econômico do consumo de recursos finitos, bem como a eliminação de resíduos do sistema por princípio. O modelo circular baseia-se em três princípios, a saber: i. eliminação de resíduos e poluição ao longo de todo o processo produtivo; ii. manutenção de produtos e materiais em uso; iii. regeneração dos sistemas naturais (Ellen MacArthur Foundation, 2017b).

A perda acelerada da biodiversidade constituiu uma severa consequência do esgotamento dos recursos ambientais, com o desaparecimento ou a diminuição do quantitativo de populações animais e vegetais. Entre os anos de 1970 e 2000, o declínio de 35% da biodiversidade é comparável apenas à ocorrência de fenômenos de extinção em massa provocados pela natureza (e não pelos fatores antrópicos, como nos dias atuais), os quais totalizaram somente quatro ou cinco casos ao longo de bilhões de anos (WWF-Brasil, 2007).

Demonstrando a urgente crise de biodiversidade vivenciada, o Índice Global Planeta Vivo 2024 apresentado pela organização World Wide Fund for Nature (WWF) evidencia uma queda de 73% no tamanho médio das populações de vida selvagem monitoradas no período de 1970 a 2020 (com intervalo entre 67% e 78%), conforme ilustrado na Figura 1. Este índice reflete uma redução média anual de 2,6%. A linha branca representa os valores do indicador, enquanto as áreas sombreadas demonstram a incerteza estatística em torno do valor (WWF, 2024).

O referido índice tem como base 34.836 populações monitoradas dentre 5.495 espécies de anfíbios, aves, peixes, mamíferos e répteis. As populações mais afetadas foram aquelas de água doce (reduzindo 85%), seguidas pelas terrestres (diminuindo 69%) e as marinhas (com 56% de redução) (WWF, 2024).

Figura 1 - Índice Planeta Vivo Global



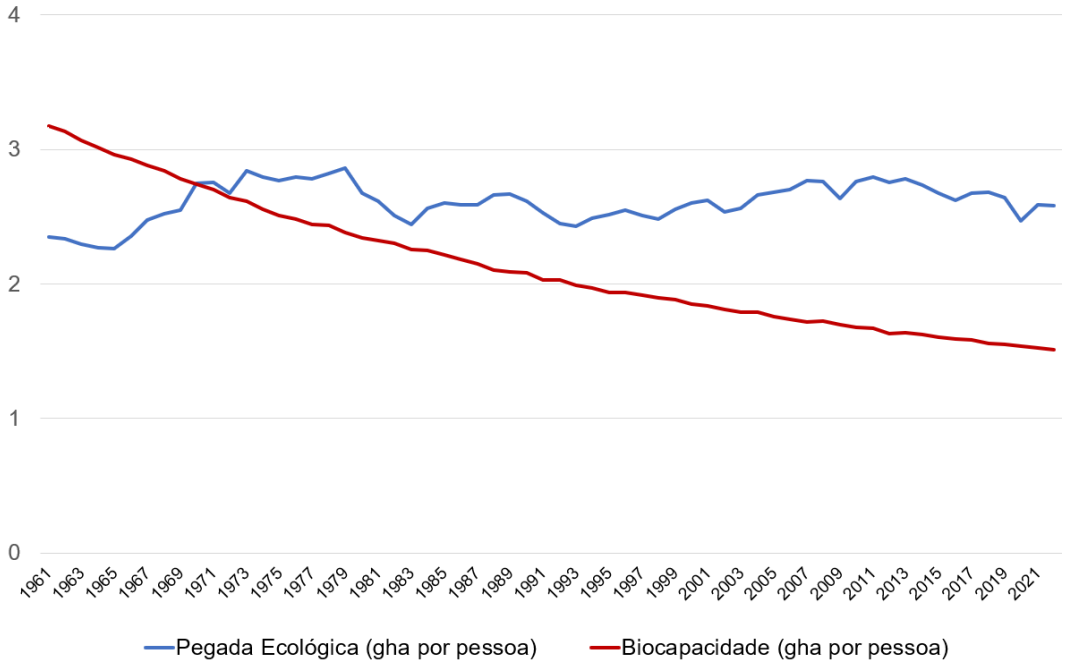
Fonte: Adaptado de WWF (2024)

A relação entre a biocapacidade da Terra (isto é, a quantidade de recursos ecológicos que o planeta é capaz de gerar no ano) e a pegada ecológica da humanidade (ou seja, a demanda por recursos naturais naquele ano) representa o indicador conhecido como *Earth Overshoot Day* (em tradução livre do inglês, “Dia da Sobrecarga da Terra”. Desde a virada do último milênio, a data tem ocorrido cada vez mais cedo, passando de 17 de setembro em 2000 para 16 de agosto em 2020 (Global Footprint Network, 2024).

Em 2024, o *Earth Overshoot Day* ocorreu em 01 de agosto, representando o momento em que a humanidade esgotou o orçamento de recursos naturais para o ano, passando, então, a operar em déficit ecológico, reduzindo os estoques de recursos locais e acumulando dióxido de carbono na atmosfera (Global Footprint Network, 2024).

Por meio da análise da série histórica expressa na Figura 2, a partir dos dados disponibilizados pelas instituições Global Footprint Network, York University e Footprint Data Foundation (2023), é possível verificar que a pegada ecológica superou a biocapacidade do planeta no ano de 1970, em uma acumulação de déficit ao longo do tempo até a atualidade. No ano de 2020, a pegada mundial média foi de 2,64 hectares globais por pessoa, enquanto a biocapacidade foi de 1,55 hectares globais per capita.

Figura 2 - Pegada ecológica e biocapacidade mundiais (gha por pessoa)



Fonte: Adaptado de York University Ecological Footprint Initiative & Global Footprint Network (2023) e de Global Footprint Network, York University e Footprint Data Foundation (2023)

Nota: os últimos três anos são estimativas

A humanidade vive na iminência do esgotamento dos recursos naturais renováveis – a taxa de exploração já superou, em muitos casos, a taxa de renovação – e não renováveis, como petróleo e metais.

Os níveis de consumo da população mundial excedem em 74% a capacidade de regeneração biológica do planeta (Global Footprint Network, 2021). Desde a década de 1970, a demanda mundial por recursos naturais supera a capacidade do planeta de renová-los. Atualmente, o planeta necessita de 1,7 ano para regenerar os recursos naturais consumidos em um ano (Global Footprint Network, 2022). Os modelos econômicos atuais, de forma geral, apresentam-se intensivos no consumo de recursos naturais, comprometendo a biocapacidade do Planeta.

Na área da alimentação, a média global de consumo hídrico para produção de um quilo de carne bovina é de 15,4 mil litros de água, em um sistema de semiconfinamento, e considerando toda a cadeia produtiva (desde a produção de matérias-primas até a oferta do produto ao mercado consumidor) (Palhares, 2018).

O setor de bens de consumo também se apresenta intensivo na demanda por recursos naturais. Somente a produção têxtil consome cerca de 93 bilhões de metros

cúbicos de água anualmente (Ellen MacArthur Foundation, 2017a). Já a produção de equipamentos eletroeletrônicos culminou na geração de resíduos contendo uma estimativa de 31 milhões de toneladas de metais, 17 milhões de toneladas de plásticos, e 14 milhões de toneladas de outros materiais como minerais, vidro e materiais compósitos em 2022 (Baldé *et al*., 2024).

Estes dois segmentos da economia explicitam as fortes pressões que os padrões atuais de produção e consumo, baseados na lógica econômica linear, exercem sobre os recursos ambientais.

A produção de têxteis no Brasil aumentou de 12,7 kg/habitante para 12,9 kg/habitante no período de 2009 a 2019. O consumo de fibras têxteis também apresentou crescimento, com aumentos de 8% (no caso das fibras naturais) e 131,43% (no caso das fibras sintéticas) no período de 2000 a 2020 (IEMI, 2021).

O montante de peças acumuladas ano após ano apresenta um potencial impacto ao meio ambiente, visto que a indústria têxtil e de vestuário têxtil é intensiva no consumo de água, energia e matérias-primas como algodão, petróleo (para a fabricação de tecidos sintéticos[1]) e corantes.

Ademais, os processos de tingimento das peças de roupas (na fase de produção) e de lavagem (nas fases de produção e uso) representam um elevado risco à conservação ambiental, em virtude dos efluentes líquidos gerados contendo pigmentos e microplásticos, estes presentes nos tecidos sintéticos de poliéster.

Por sua vez, o segmento eletroeletrônico é um dos mais estratégicos na atual era da economia digital e Internet das Coisas, com faturamento anual superior a R$ 210 bilhões e empregando mais de 260 mil trabalhadores. O setor vem se tornando cada vez mais importante para a economia brasileira ao possibilitar o fornecimento de tecnologia a variados setores econômicos (da agricultura à gestão das cidades) e contribuir para a geração de empregos. Está presente, ainda, desde a fase de transformação de recursos naturais em energia até a transformação do bit em informação nos dispositivos eletrônicos (ABINEE, 2022).

Sob a perspectiva da sustentabilidade, este promissor setor em fase de expansão das suas atividades representa um potencial risco à conservação ambiental

[1] As fibras sintéticas são produzidas a partir da conversão de nafta petroquímica (a qual é derivada do petróleo) em benzeno, eteno, p-xileno e propeno, os quais consistem em matérias-primas para a fabricação dessas fibras. O benzeno é o insumo para a fabricação de náilon 6.6 (ou poliamida 6.6) e náilon 6 (ou poliamida 6), enquanto o p-xileno dá origem ao poliéster, e o propeno é a matéria-prima para a produção da fibra de elastano (ABRAFAS, s.d.).

em função dos seus elevados volumes produzidos. Baldé *et al*. (2024) indicam o aumento da produção mundial de equipamentos eletrônicos passando de 62 milhões de toneladas para 96 milhões de toneladas no período de 2010 a 2022.

Dentre os equipamentos eletroeletrônicos, a máquina de lavar foi selecionada como objeto de investigação devido à sua expressiva participação na sociedade. Dados do IBGE (2024) indicam sua presença em 70,2% dos domicílios brasileiros em 2022, apresentando um aumento de 7,3% no período de 2016 a 2022.

Além disso, as quantidades produzidas e vendidas de máquinas de lavar ou secar roupa para uso doméstico tiveram acréscimos, respectivamente, de 6% e 22%, no período de 2018 a 2022 (IBGE, 2022b).

O presente trabalho tem como objetivo avaliar o nível de eficácia da utilização dos diversos instrumentos oferecidos pela economia circular na mitigação dos impactos ambientais e no aprimoramento da sustentabilidade, por meio da quantificação dos resultados para os dois grupos selecionados relevantes para a economia brasileira. Desta forma, a pesquisa visa avaliar até que ponto as estratégias de economia circular nesses setores impactam a sustentabilidade, isto é, se apresentam, eficácia significativa ou limitada.

Maximiano (2000) define eficácia como a relação entre os objetivos desejados e os resultados alcançados. Para o autor, este conceito de desempenho diz respeito à capacidade que um sistema, processo, produto ou serviço tem de solucionar um problema.

Desta forma, o conceito de eficácia encontra relevante aplicação nesta tese, uma vez que a pesquisa investiga a dicotomia entre a proposta da economia circular como um caminho que pode contribuir para a transição para a sustentabilidade e o discurso de que a sustentabilidade poderá ser alcançada pela economia circular e outras ações mitigadoras, sem necessidade de alteração mais profunda nos padrões atuais de produção e consumo, com destaque para as escalas envolvidas.

Diante do cenário de níveis crescentes de produção de bens, a presente pesquisa avalia o embate entre esses dois discursos que situam a economia circular em duas correntes distintas, a saber: como um caminho de transição para a sustentabilidade ou como a solução final e definitiva para tal.

A abordagem de transição preconiza o desenvolvimento de uma nova forma de organizar os sistemas sociais de produção e consumo, que, por vezes, pode ainda não estar completamente estabelecida.

Já a abordagem de economia circular como solução final e definitiva defende que ações mais aprofundadas não são necessárias para a promoção da sustentabilidade. Está, portanto, orientada para a manutenção do *status-quo* dos volumes de produção e consumo de produtos, isto é, sem a necessidade de realização de críticas ao sistema capitalista de incentivo ao aumento das quantidades produzidas e consumidas.

1.2 ESTRUTURA DA PESQUISA

A presente tese está estruturada em sete capítulos, descritos a seguir.

O capítulo 1, relativo à introdução, compreende a contextualização, justificativa e objetivo do trabalho, bem como a sua estrutura, além da hipótese formulada.

O capítulo 2 explora a metodologia empregada, apresentando um fluxograma esquemático da metodologia utilizada e a produção acadêmica da economia circular e suas estratégias, além de uma proposição de avaliação da sustentabilidade orientada por três níveis de resposta aos impactos ambientais; O capítulo encerra com uma análise bibliométrica acerca da relação entre economia circular, produção e consumo.

O capítulo 3 apresenta o referencial teórico da pesquisa, descrevendo as bases histórias que remontam à discussão ambiental e as origens e aplicação da sustentabilidade. Na sequência, aborda os conceitos transversais ao tema da economia verde, área de conhecimento em que a economia circular se situa. Neste momento, é posicionada uma discussão acerca da relação entre ética e economia verde, além dos limites que esta abordagem apresenta em uma sociedade de mercado. Neste capítulo, também são apresentados as definições e os princípios acerca da economia circular, além das principais escolas de pensamento que influenciaram o seu desenvolvimento, bem como os elementos centrais que a compõem. Esta seção é encerrada apesentando um diagnóstico preliminar dos volumes de produção e consumo relacionados aos dois segmentos da economia objetos desta pesquisa: têxteis e vestuário, e equipamentos eletroeletrônicos.

O capítulo 4 aborda o segmento de produtos têxteis e de vestuário, apresentando uma visão geral e a estrutura do setor, além de um mapeamento das pesquisas acadêmicas identificadas relacionadas à economia circular neste tema. Também são detalhados os volumes de produção e consumo de produtos têxteis e de vestuário, bem como a geração de resíduos oriundos deste setor e os impactos associados, além das taxas de reciclagem de fibras têxteis. Ademais, são apresentados os desenvolvimentos da economia circular verificados no setor.

No capítulo 5 é apresentado o segmento de equipamentos eletroeletrônicos, destacando o caso em estudo, de máquinas de lavar roupa. De forma análoga àquela procedida para o segmento de têxteis e vestuários, o capítulo apresenta uma visão geral e a estrutura do setor, além de levantamentos das pesquisas acadêmicas identificadas no âmbito da economia circular. Também aborda os volumes de produção de equipamentos eletroeletrônicos, bem como os impactos ambientais e econômicos associados à geração de seus resíduos, além das suas taxas de reciclagem. Adicionalmente, apresenta o caso concreto dos eletroeletrônicos do tipo máquinas de lavar, caracterizando os principais impactos ambientais identificados ao longo do seu ciclo de vida, além dos seus volumes de produção e consumo, e os desenvolvimentos da economia circular identificados para este produto.

No capítulo 6 é realizada uma discussão acerca do potencial de sustentabilidade das estratégias de economia circular. Inicialmente, a ocorrência do fenômeno de efeito rebote[2] é avaliada na aplicação de estratégias circulares. Na sequência, verifica-se o impacto das estratégias de economia circular sob a sustentabilidade. Para isso, as estratégias de economia circular são analisadas segundo dois grupos propostos, a saber: quanto aos atributos de circularidade, e quanto ao grau de circularidade. Em seguida, são avaliados os custos de recuperação de RSU, bem como as taxas de recuperação dos resíduos têxteis e de equipamentos eletroeletrônicos, enquanto componentes integrantes dos RSU. Ademais, são descritas as limitações da economia circular como solução mitigadora dos impactos ambientais. A partir desta constatação, a desmercantilização dos bens é apresentada como uma abordagem possível para efetivar a reconfiguração dos sistemas sociais de produção e consumo. O capítulo encerra com uma descrição dos desafios

[2] O fenômeno de efeito rebote ocorre quando melhorias na eficiência em função do progresso tecnológico são compensadas pelo aumento do uso do bem (Schröder et al., 2019).

identificados para o aumento da eficácia das estratégias de economia circular quanto à sustentabilidade.

No capítulo 7, são descritos os principais aspectos da pesquisa na forma de conclusão. Neste momento, são realizadas as considerações finais da tese e relatadas as limitações que envolvem o estudo. Também são realizadas sugestões para trabalhos futuros.

Por fim, são apresentadas as referências bibliográficas utilizadas na elaboração deste trabalho.

1.3 HIPÓTESE

O conjunto de instrumentos que compõem a economia circular ajuda no enfrentamento do problema ambiental, mas não o resolve. Desta forma, a economia circular é um conjunto de ferramentas que visam mitigar a degradação ambiental, mas não é a solução final e definitiva.

2 METODOLOGIA

Esta tese é caracterizada como uma investigação aplicada com o objetivo de desenvolver conhecimento a respeito de um problema específico e prático. Com relação aos seus objetivos, este trabalho envolve uma pesquisa explicativa, exploratória e descritiva. Quanto à forma de abordagem da investigação proposta, o método de pesquisa reúne elementos qualitativos e quantitativos. Já a coleta de dados ocorreu por meio do procedimento de revisão bibliográfica, a qual envolveu pesquisas nas bases de dados Web of Science, além de buscas em websites de associações setoriais e instituições governamentais.

O referencial bibliográfico consiste em uma revisão da literatura disponível mediante a análise de livros, artigos científicos, relatórios técnicos, teses, dissertações, publicações em revistas e sites especializados. Legislações e normas técnicas nacionais e internacionais também compõem a base de pesquisa, juntamente com demais regulamentações ambientais aplicáveis.

As pesquisas foram realizadas por meio de uma análise bibliométrica na base de dados Web of Science, selecionada por se tratar de um banco de informações multidisciplinar que indexa os periódicos mais citados em suas respectivas áreas.

A revisão sistemática e a análise bibliométrica da literatura contribuem para a integração de protocolos quantitativos para a coleta e o tratamento de dados nas pesquisas por revisão bibliográfica. A partir dos resultados obtidos por meio da revisão sistemática, a bibliometria é aplicada de modo quantitativo, avaliando a relevância das publicações e fornecendo direcionamento para a seleção do referencial bibliográfico de interesse (Medeiros *et al*., 2015).

A partir da formulação de uma hipótese central, a pesquisa analisa dois grupos de produtos significativos para a economia brasileira, isto é, que apresentam relevância na produção e no consumo da população, além de impactos ambientais significativos. Cada produto é avaliado sob a perspectiva das principais estratégias de economia circular aplicáveis.

A Figura 3 ilustra a metodologia utilizada na presente tese. Inicialmente, foi realizada uma revisão da literatura, como estratégia metodológica selecionada. Em seguida, foi realizado um diagnóstico preliminar, de forma a identificar a produção científica acerca da economia circular e suas estratégias de atuação. Também foram

verificados os volumes de produção e consumo envolvidos nos setores têxteis e vestuário, e equipamentos eletroeletrônicos. Procedeu-se, então, à formulação da hipótese para testagem.

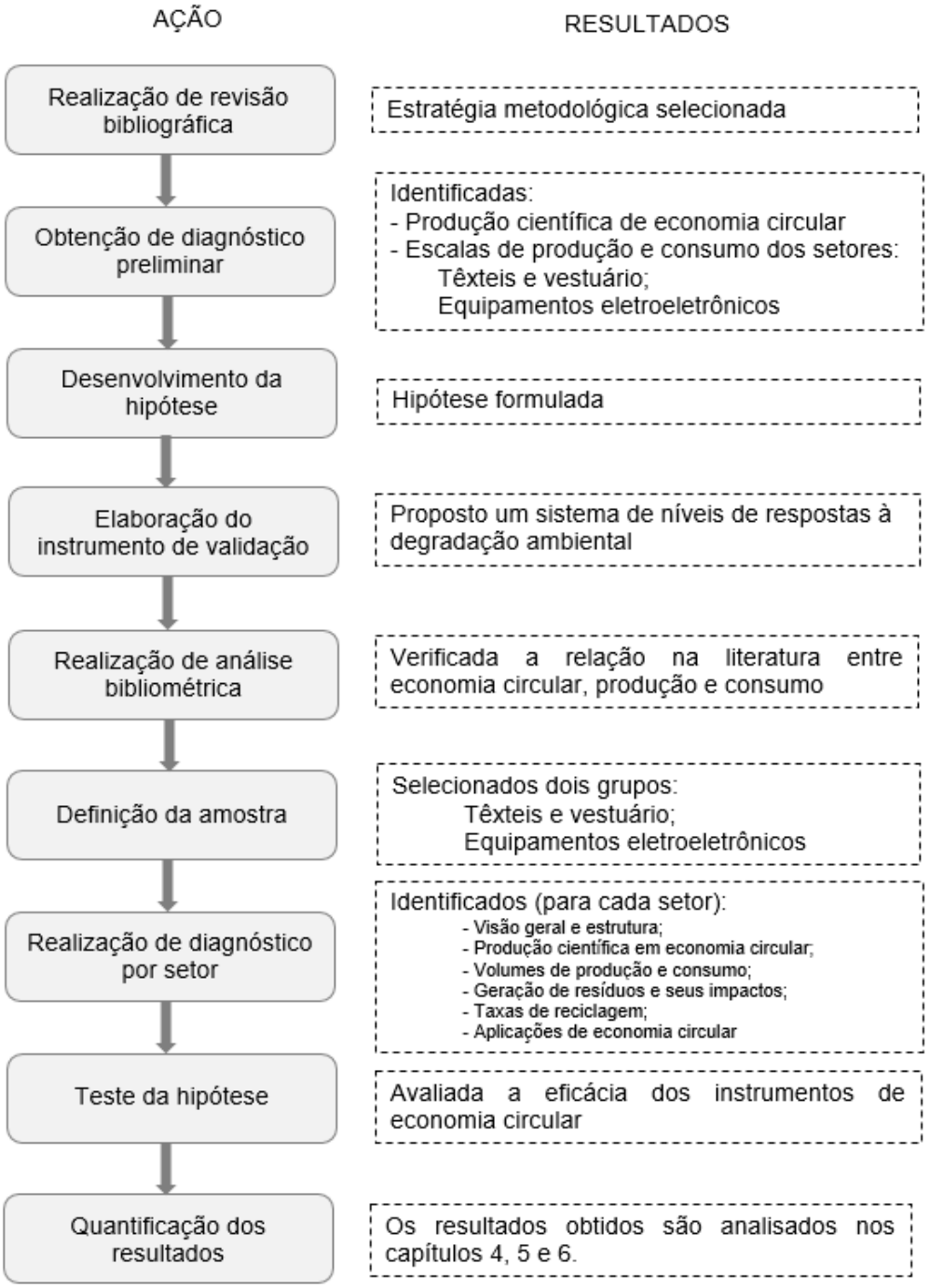
Para validação da hipótese, foi proposto um sistema de classificação em três níveis de resposta à degradação ambiental. De forma a verificar a existência de publicações que abordem ações situadas no terceiro nível de respostas, isto é, aquelas capazes de promover alterações nos sistemas sociais de produção e consumo, foi realizada uma análise bibliométrica mediante pesquisa pelas palavras-chaves “circular economy” AND production AND consumption.

Em função dos dados gerados nas etapas de revisão bibliográfica a diagnóstico preliminar, dois grupos de produtos foram selecionados para testes e validação da hipótese, a saber: têxteis e vestuário, e equipamentos eletroeletrônicos.

Em seguida, para cada grupo de produtos, foi realizado um amplo diagnóstico, caracterizando as seguintes informações: visão geral e estrutura do setor; produção científica em economia circular; volumes de produção e consumo de produtos; geração de resíduos e os impactos gerados; taxas de reciclagem envolvidas; e desenvolvimentos em economia circular.

A hipótese formulada foi testada com o objetivo de avaliar o nível de eficácia das estratégias de economia circular. Os resultados gerados para cada setor foram quantificados e discutidos nos capítulos 4, 5 e 6 da tese.

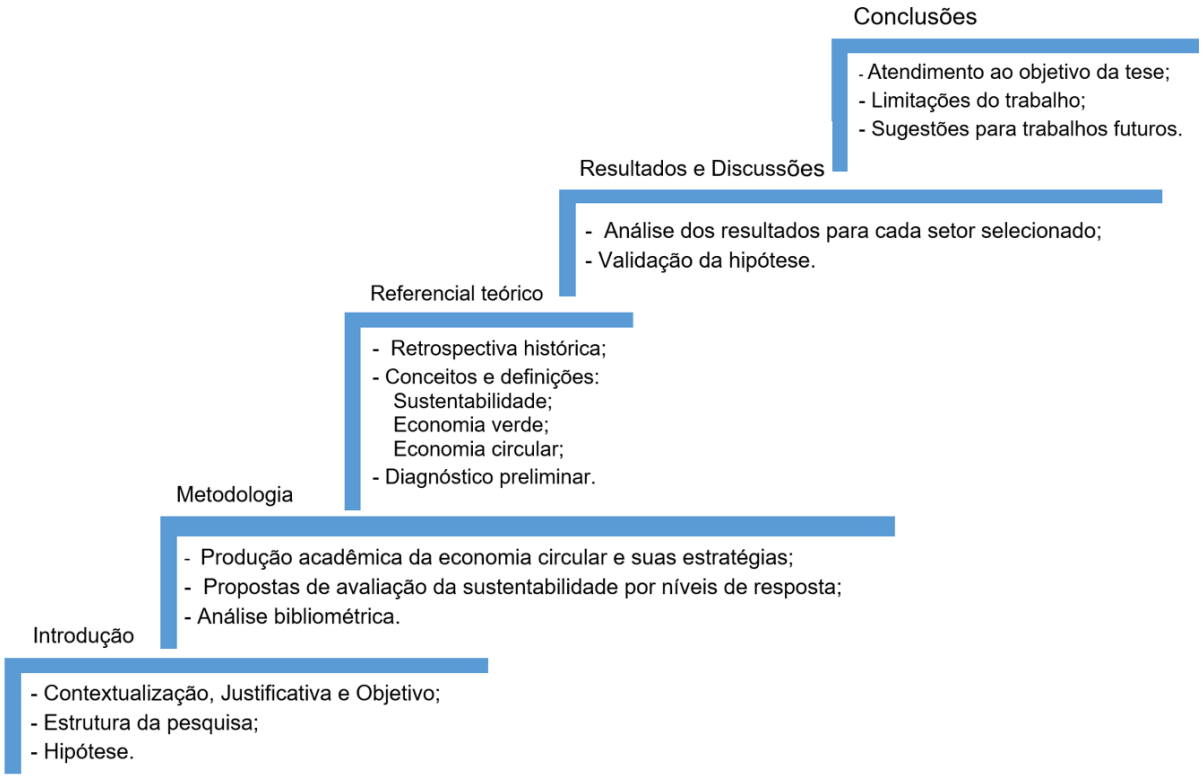
Figura 3 – Fluxograma esquemático da metodologia utilizada



Fonte: elaboração própria (2025)

A Figura 4 demonstra a estrutura da tese, composta por introdução, metodologia, referencial bibliográfico, resultados e discussões, e conclusões.

Figura 4 - Estrutura da tese



Fonte: elaboração própria (2025)

2.1 PRODUÇÃO ACADÊMICA DA ECONOMIA CIRCULAR E SUAS ESTRATÉGIAS

A economia circular e as suas estratégias de atuação vêm sendo, amplamente, objeto de pesquisa científica-acadêmica. Com o objetivo de identificar a bibliografia relevante acerca do tema da economia circular, pesquisas foram realizadas em uma base de dados científica verificando as publicações realizadas no período de cinco anos compreendido entre 01/01/2018 a 31/12/2022.

A base Web of Science foi selecionada por se tratar de um dos bancos de dados científicos mais seletivos e reconhecidos no âmbito acadêmico.

Nas pesquisas, a expressão “circular economy” foi empregada entre aspas de modo a garantir a geração de resultados mediante essa expressão exata.

Os limites de busca concentrados no período de cinco anos e limitados ao título das publicações tem como objetivo selecionar os documentos mais recentes e específicos ao tema.

No primeiro conjunto de pesquisas, foram verificadas a quantidade total de publicações e, de forma mais refinada, a quantidade de artigos publicados no período

analisado com o título “circular economy” na base Web of Science. Em seguida, realizou-se uma pesquisa no Portal Periódicos CAPES seguindo os mesmos critérios e os quantitativos obtidos foram comparados.

Já o segundo conjunto de pesquisas foi constituído por cinco buscas na base Web of Science, utilizando como segundo filtro no título cada uma das cinco principais estratégias de economia circular analisadas (reciclagem, reúso, remanufatura, produto-serviço e compartilhamento). Foram utilizados os mesmos critérios empregados na primeira busca e acrescentou-se ao título o nome de cada estratégia, uma por vez, totalizando cinco pesquisas.

A primeira pesquisa foi conduzida na base de dados Web of Science utilizando os filtros descritos no Quadro 1.

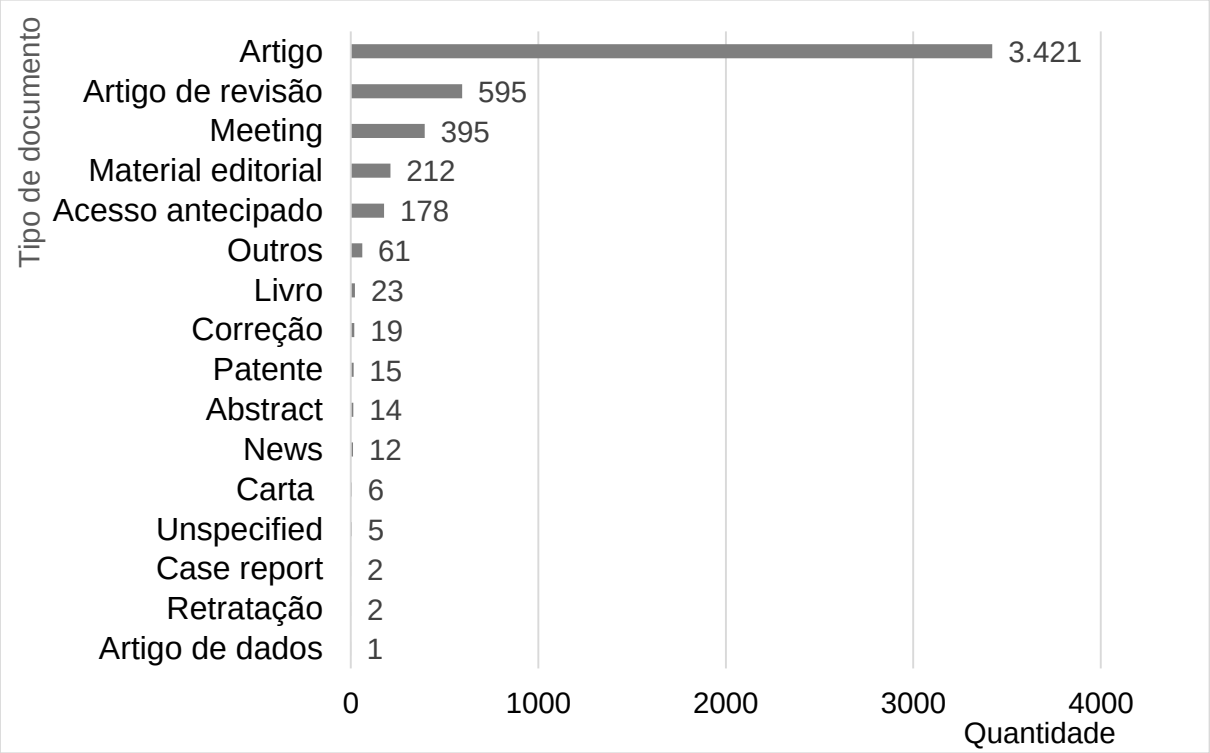
Quadro 1 - Filtros de pesquisa na base Web of Science

Pesquisar em:	All data bases
Coleções:	All
Título:	“circular economy”
Data de publicação:	2018-01-01 até 2022-12-31

Fonte: elaboração própria (2023)

Esta pesquisa retornou 4.194 resultados, compostos pelos seguintes documentos apresentados na Figura 5.

Figura 5 - Tipos de documentos no período analisado



Fonte: elaboração própria (2023)

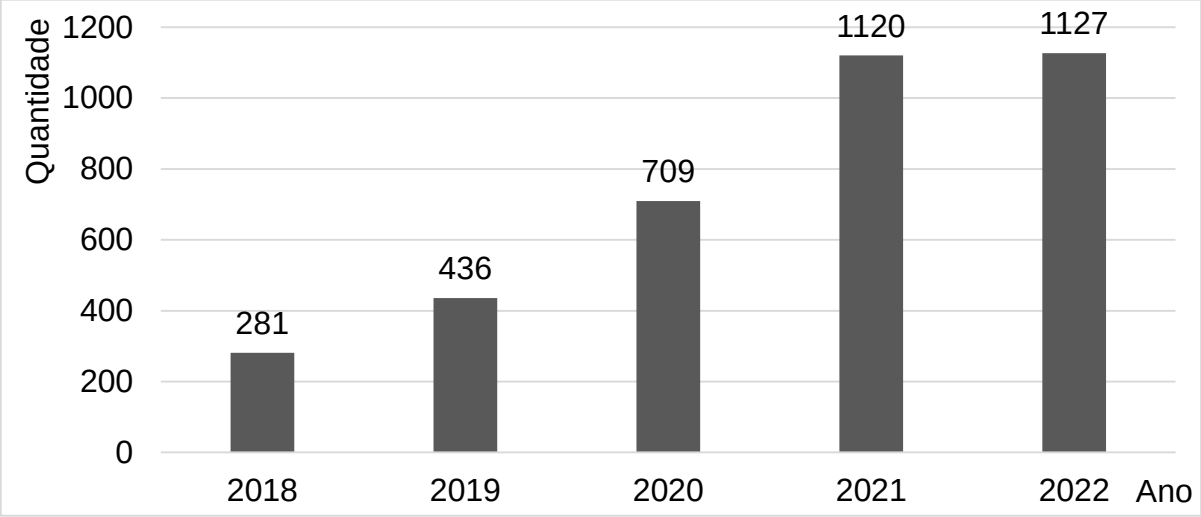
Uma pesquisa na base Periódicos CAPES utilizando os mesmos critérios de busca adotados para a pesquisa na base Web of Science gerou 6.751 resultados. Desta forma, nas condições analisadas, é possível observar que o total de publicações na base Web of Science representa aproximadamente 62,12% dos resultados apresentados pelo Portal Periódicos da CAPES no período, ratificando a sua relevância e robustez, e validando a representatividade da amostra obtida.

De modo a restringir a amostra obtida na pesquisa na base Web of Science (4.194 resultados) apenas aos artigos publicados, foi realizado um refinamento por tipos de documentos. Para isto, foram selecionados apenas três tipos: artigo, artigo de revisão e artigo de dados.

Desta forma, a nova pesquisa retornou 3.673 artigos, dos quais 3.620 encontram-se na Coleção principal da Web of Science, 44 apresentam-se na SciElo Citation Index, enquanto 23 estão alocadas na KCI, base de dados de periódicos coreanos.

A Figura 6 apresenta o crescimento na quantidade de publicações acerca da economia circular ao longo do período de 2018 a 2022, demonstrando tratar-se de um tema de relevância crescente no meio acadêmico.

Figura 6 - Quantidade de artigos publicados por ano no período analisado



Fonte: elaboração própria (2023)

O crescimento da quantidade de artigos publicados sobre economia circular demonstra que este tema está situado em um campo de pesquisa que apresenta significativo potencial de investigação acadêmica e científica.

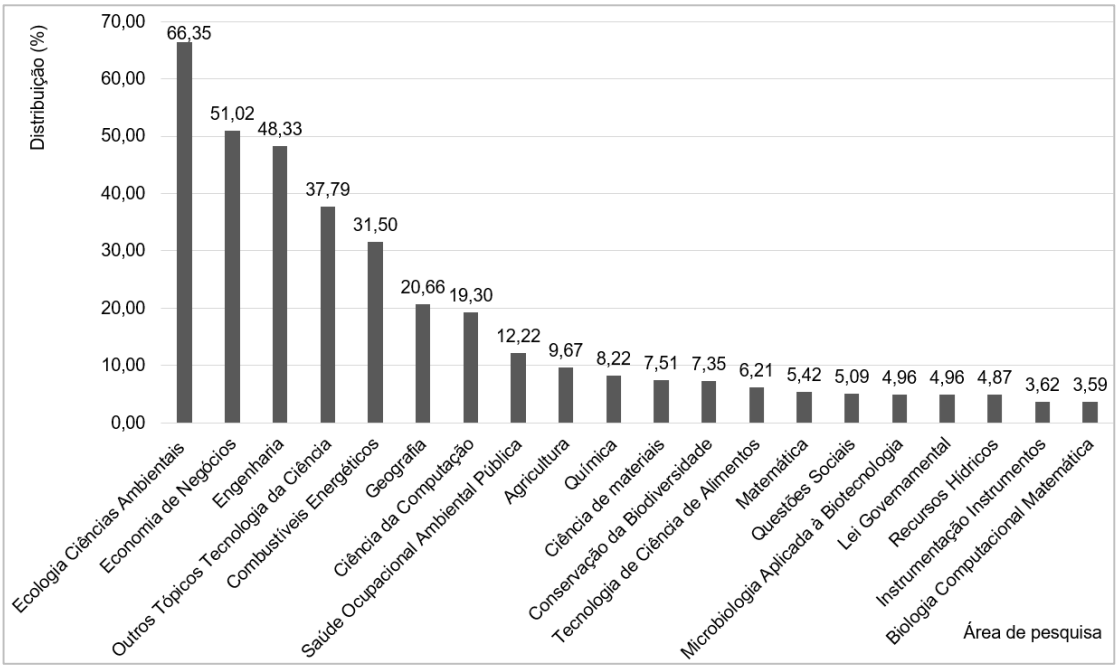
Uma nova pesquisa na base Periódicos CAPES foi realizada utilizando os mesmos critérios de busca adotados para a busca na base Web of Science, isto é, refinando-se a pesquisa por tipo de documento. Foram selecionados apenas os artigos, totalizando 5.194 resultados. Desta forma, nas condições analisadas, a quantidade de artigos publicados na base Web of Science (isto é, 3.673 resultados) representa cerca de 70,72% do total de publicações de artigos totais no Portal Periódicos CAPES.

As Figuras 7 e 8 apresentam a distribuição percentual dos artigos identificados na base Web of Science por área de interesse. Para efeito de melhor visualização, foram plotadas as áreas que apresentam no mínimo 0,5% de participação na distribuição.

Por meio da análise das Figuras 7 e 8, é possível verificar que as dez áreas nas quais as pesquisas sobre economia circular se concentram são as seguintes: ecologia / ciências ambientais (66,35% das publicações), economia de negócios (51,02% das publicações), engenharia (48,33% das publicações), outros tópicos de tecnologia da ciência (37,79% das publicações), combustíveis energéticos (31,50% das publicações), geografia (20,66% das publicações), ciência da computação

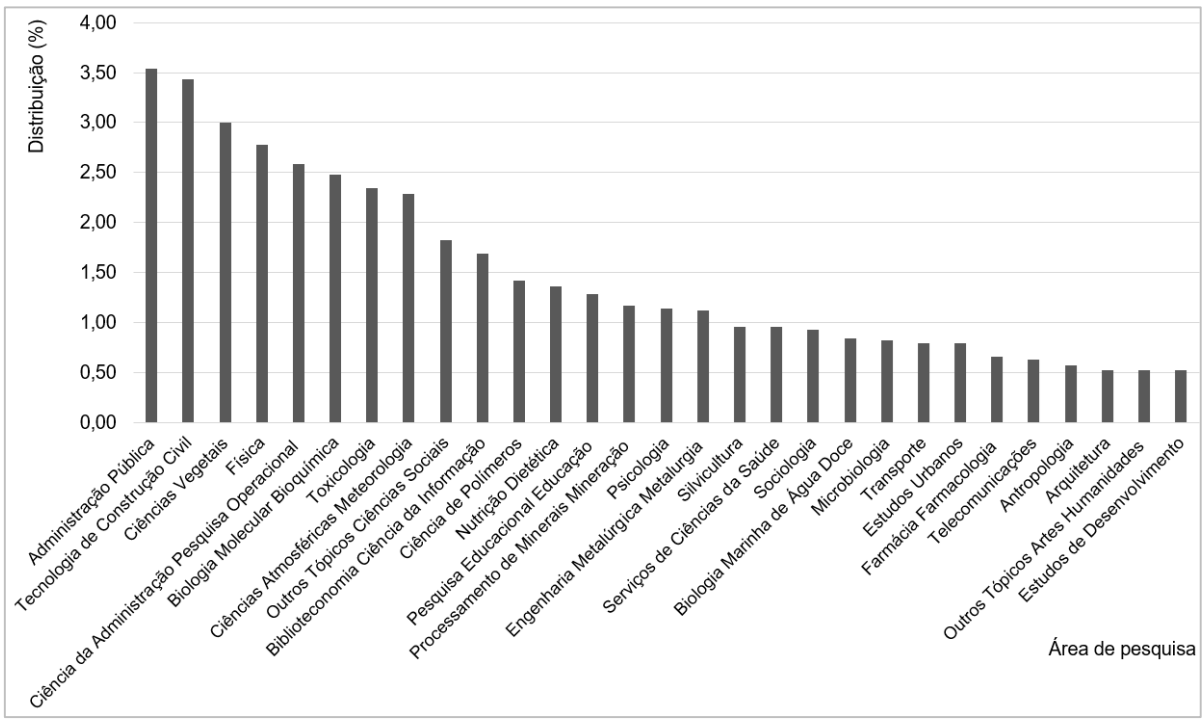
(19,30% das publicações), saúde ocupacional ambiental pública (12,22% das publicações), agricultura (9,67%) e química (8,22%).

Figura 7 - Distribuição percentual dos artigos por área de interesse no período analisado



Fonte: elaboração própria (2023)

Figura 8 - Continuação da distribuição percentual dos artigos publicados por área de interesse no período analisado

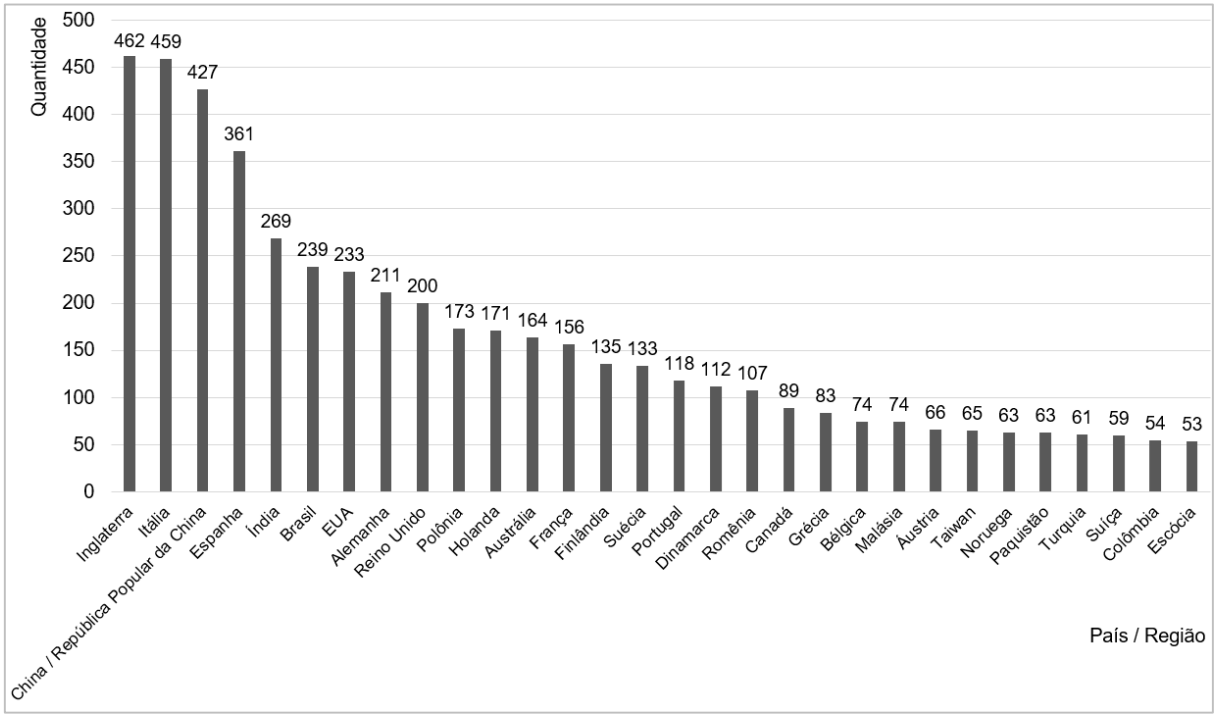


Fonte: elaboração própria (2023)

A distribuição de artigos por área de interesse apresentada nas Figuras 7 e 8 demonstra a presença do estudo da economia circular em diversas atividades econômicas da sociedade. Desta forma, é possível observar que a preocupação com o componente ambiental encontra-se presente em variados campos do conhecimento.

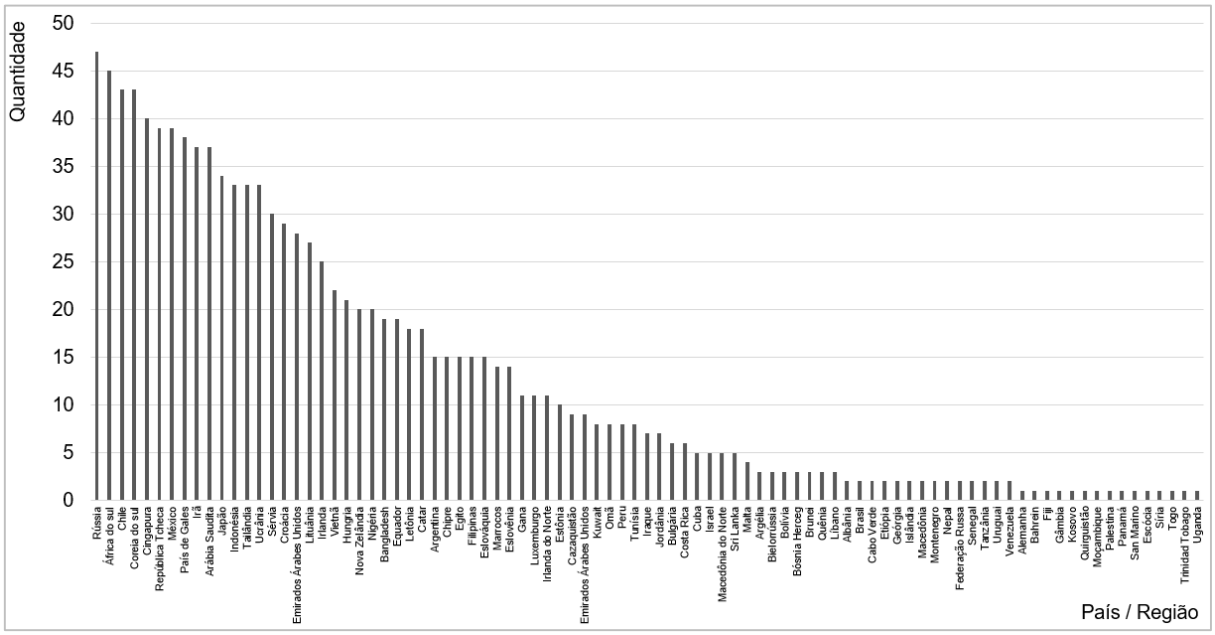
As Figuras 9 e 10 apresentam a distribuição dos artigos publicados por país ou região. É possível observar que Inglaterra, Itália e China / República Popular da China lideram na publicação de artigos na área (com, respectivamente, 462, 459 e 427 artigos cada). O Brasil ocupa a sexta posição, com 239 artigos publicados na área no período.

Figura 9 - Distribuição dos artigos publicados por países / regiões



Fonte: elaboração própria (2023)

Figura 10 - Continuação da distribuição dos artigos publicados por países / regiões



Fonte: elaboração própria (2023)

O segundo conjunto de pesquisas verificou as principais estratégias de economia circular na base Web of Science utilizando os critérios descritos no Quadro 2.

Quadro 2 - Filtros de pesquisa utilizados na base Web of Science

Pesquisar em:		All data bases
Coleções:		All
Pesquisa 1:	Título:	“circular economy” and reclyc*
Pesquisa 2:	Título:	“circular economy” and reuse
Pesquisa 3:	Título:	“circular economy” and remanufactur*
Pesquisa 4:	Título:	“circular economy” and product service
Pesquisa 5:	Título:	“circular economy” and "sharing economy"
Data de publicação:		2018-01-01 até 2022-12-31

Fonte: elaboração própria (2023)

Na pesquisa, foi utilizado o recurso de asterisco para aumentar a amplitude da geração dos resultados. Desta forma, ao utilizar a expressão reclyc*, é possível obter resultados como recycling e recycled. De forma análoga, a utilização da expressão remanufactur* possibilita a geração de resultados com remanufacturing e remanufactured. Já a utilização das expressões “circular economy” e “sharing economy” entre aspas garante a obtenção de resultados mediante a expressão exata.

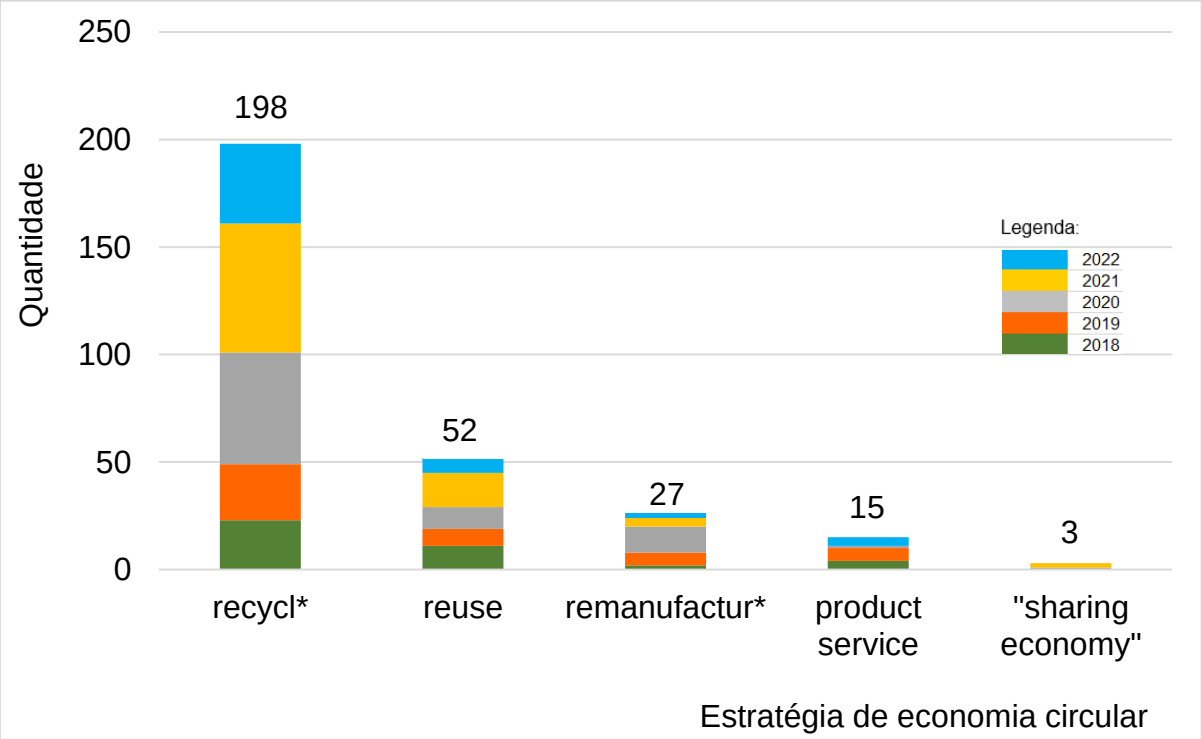
A Figura 11 apresenta os resultados obtidos. É possível observar que, nas condições analisadas, os termos relacionados à reciclagem (representados por

recycl*) foram os mais pesquisados (apresentando 198 resultados, o que corresponde a 67,1% da amostra analisada), seguidos pelo reúso (52 resultados), remanufatura (27 resultados), produto e serviço (15 resultados) e economia compartilhada (3 resultados).

Ainda que organizações relacionadas a práticas de circularidade venham discorrendo sobre diferentes estratégias circulares, na prática, observa-se que os esforços de pesquisa científica têm sido orientados, principalmente, para o processo de reciclagem. Possíveis justificativas para esta predominância residem na falsa percepção social de que a reciclagem pode ser infinita, além da maior disseminação nas mídias e nos meios de comunicação desta estratégia em detrimento das demais.

Estes resultados, analisados ao longo do período de 2018 a 2022, demonstram a relevância de cada estratégia de economia circular e o potencial de estudo que apresentam.

Figura 11 - Quantidade total de publicações sobre as principais estratégias de economia circular na base Web of Science no período analisado



Fonte: elaboração própria (2023)

2.2 PROPOSIÇÃO DE AVALIAÇÃO DA SUSTENTABILIDADE POR NÍVEIS DE RESPOSTA

Para avaliação da sustentabilidade nos grupos de produtos selecionados, é proposto um sistema de níveis de resposta à degradação ambiental.

É possível classificar as respostas em relação à degradação ambiental em curso em três níveis (além, do “nível zero”, que é o da negação da existência da crise ambiental): a mitigação primária, que compreende ações de micro ou pequeno porte, de baixo impacto, de pessoas ou pequenos grupos, ou de empresas isoladas, como a economia de energia ou do uso de água nas residências; a mitigação sistemática, que é regida por leis, regulamentos, acordos ou mudanças culturais estruturais, como no caso da substituição de lâmpadas incandescentes (que não podem mais ser fabricadas no Brasil) por lâmpadas a led ou fluorescentes. Esse nível de resposta apresenta impactos mais relevantes, em geral, e pode ser capaz de chegar à sustentabilidade desejada para determinados setores; o terceiro nível de resposta, sistêmico, é a reconfiguração de sistemas sociais de produção e consumo, que propõe a redução drástica de escalas de produção ou mesmo, em alguns casos, na própria eliminação de produtos do mercado. Esse nível é citado por Graça e Serra (2020)[3] e por autores que discutem a transição para a sustentabilidade e questionam a compatibilidade entre o modo de produção capitalista e a sustentabilidade, como Harvey (2013), Löwy (2021), Altvater (2010) e outros.

A presente pesquisa propõe uma sistematização de classificação composta por três níveis de repostas aos impactos ambientais. O primeiro nível corresponde à mitigação primária e consiste na tomada de iniciativas individuais, apresentando baixo alcance e impacto. Como exemplo, tem-se a situação em que um indivíduo realiza a calibragem adequada do seu veículo automotor, o que reduz o consumo de combustível e, consequentemente, diminui a emissão de poluentes.

No segundo nível encontra-se a mitigação sistemática, cujo alcance e impacto são mais significativos do que aqueles observados no nível anterior, mas que não gera soluções definitivas. Ações realizadas neste nível estimulam a criação de uma cultura

[3] Os autores analisaram o discurso da educação ambiental sob a perspectiva do desenvolvimento sustentável e verificaram a influência de demais interesses nos discursos propagados pelos canais de comunicação.

para a sustentabilidade, mas não garantem a sustentabilidade. Desta forma, este nível de resposta melhora o problema ambiental, mas não o resolve. É possível citar, por exemplo, o uso obrigatório por força de lei de catalisadores em todos os veículos automotores, o que reduz a emissão de Gases de Efeito Estufa.

Já o terceiro nível de solução baseia-se na reconfiguração dos sistemas sociais de produção e consumo orientados pela filosofia capitalista, representando um incremento ao desenvolvimento sustentável.

2.3 ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA

A produção científica atual conduz à noção de que a economia circular está situada nos dois primeiros níveis de mitigação (primária e sistemática). A presente pesquisa irá investigar se os modelos conhecidos de economia circular podem, de fato, ser caracterizados como mitigação nos níveis primário e sistemático, e se um ou mais modelos são capazes de alterar o sistema de produção e consumo vigente e, desta forma, evoluírem para o terceiro nível de resposta e alcançar a sustentabilidade.

De forma a identificar na literatura a existência de artigos relacionando economia circular, produção e consumo, foi realizada uma pesquisa na base Web of Science, segundo os parâmetros descritos no Quadro 3. Com isso, busca-se identificar a existência de autores investigando a economia circular sob a ótica da reconfiguração dos sistemas sociais de produção e consumo.

Quadro 3 - Filtros de pesquisa utilizados na base Web of Science

Pesquisar em:		All data bases
Coleções:		All
	Título:	“circular economy”
E	Título:	production
E	Título:	consumption
Data de publicação:		2018-01-01 até 2022-12-31

Fonte: elaboração própria (2023)

A Figura 12 sintetiza a pesquisa realizada. É possível observar que, após a fase de pesquisa exploratória (descrita no Quadro 3), a seleção inicial conduziu a oito resultados, dos quais sete correspondem a artigos publicados em periódicos,

enquanto um refere-se a uma conferência. Também é possível verificar as seguintes áreas de pesquisa em que estes estudos se concentram, ratificando a natureza multidisciplinar da economia circular: tecnologia científica, combustíveis energéticos; ecologia e ciências ambientais; economia de negócios; engenharia; conservação da biodiversidade; biologia computacional matemática; ciência da computação; geografia; tecnologia de ciência de alimentos; administração pública; ciências sociais; agricultura; microbiologia aplicada à biotecnologia; instrumentação; ciência de materiais; ciências atmosféricas / meteorologia; e recursos hídricos.

Por meio da análise dos Abstracts dos oito documentos, verificou-se que nenhum elemento da amostra apresentou relevância no tema proposto, isto é, a investigação se os modelos de economia circular são capazes de promover a reconfiguração do sistema atual de produção e consumo.

Desta forma, a análise bibliométrica conduzida para identificar publicações que relacionam economia circular com a produção e o consumo de bens expressaram a precariedade de pesquisas acerca de ações capazes de alterar os sistemas sociais de produção e consumo, em um nível de resposta sistêmica, como um meio para possibilitar o alcance do desenvolvimento sustentável.

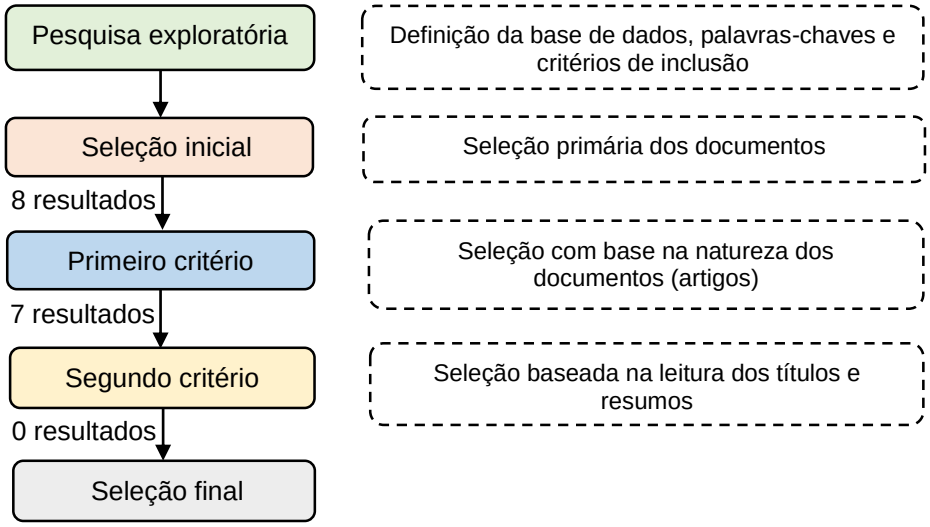
Este resultado corrobora a compreensão do ineditismo do estudo da economia circular frente à necessidade de reconfiguração dos padrões atuais de produção e consumo. Dos oito autores identificados, nenhum apontou para as limitações da economia circular nem debateu a sua insuficiência face ao combate da degradação ambiental.

Portanto, a abordagem da presente tese é considerada inédita por tratar, de forma crítica, as limitações da aplicação da economia circular e apontar para a necessidade de haver uma reconfiguração dos padrões vigentes, uma vez que, na economia de mercado atual (caracterizada por elevados volumes de produção), a economia circular não resolve os problemas ambientais.

Cabe ressaltar que a investigação conduzida por meio desta análise bibliométrica diz respeito à existência de estudos relacionando a economia circular à reconfiguração dos sistemas sociais de produção e consumo, termo empregado na presente tese, mas que não é necessariamente localizado na literatura, como a Figura 12 permitiu verificar. Trata-se, portanto, de um termo novo.

Por outro lado, sabe-se que há autores que, apesar de não utilizarem o termo ora empregado, defendem que não é possível resolver os problemas ambientais nas condições de economia de mercado capitalista. Estes estudiosos, como Harvey (2013), Löwy (2021), Altvater (2010) reconhecem que a produção em grandes volumes não é sustentável e, como solução, defendem o fim do capitalismo.

Figura 12 - Caminho metodológico empregado



Fonte: elaboração própria (2024)

O Quadro 4 apresenta os resultados obtidos a partir da busca demonstrada na Figura 12, abordando os seguintes itens; título do documento; autores; ano da publicação; tipo de documento; tipo de publicação; título da fonte; uma breve análise do abstract; os países dos autores; e as áreas de pesquisa pertinentes.

Quadro 4 - Pesquisa pelos termos "circular economy", production e consumption

Título do Documento	Autores	Ano da publicação	Tipo de documento	Tipo de publicação	Título da Fonte	Análise do Abstract	Paises dos autores	Áreas de pesquisa
Circular economy approach for mealworm industrial production for human consumption	Nava, A. L.; Higareda, T. E.; Barreto, C.; Rodriguez, R.; Marquez, I.; Palacios, M. L.	2020	Meeting	Conferência	International Conference On Sustainable Energy And Green Technology 2019	Apresenta uma proposta de uma abordagem circular do processo de produção industrial de um inseto comestível como fonte de alimento	México	Outros tópicos Tecnologia Científica; Combustíveis Energéticos
Circular economy enables sustainable consumption and production in multi-level supply chain system	Tseng, Ming-Lang; Chiu, Anthony S. F.; Liu, Gang; Jantaralolica, Tatre.	2020	Artigo	Periódico	Resources Conservation And Recycling	Verifica os efeitos da cadeia de suprimentos multinível (incluindo os benefícios econômicos) sobre os efeitos da difusão da economia circular	Dinamarca; Filipinas; Taiwan; Tailândia	Ecologia Ciências Ambientais; Economia de Negócios; Combustíveis Energéticos; Engenharia; Conservação da Biodiversidade
Analyzing critical success factors to adopt sustainable consumption and production linked with circular economy	Goyal, Shivam; Garg, Dixit; Luthra, Sunil.	2022	Artigo	Periódico	Environment Development And Sustainability	Identifica e analisa vinte e sete fatores críticos de sucesso para a adoção do consumo e da produção sustentáveis associados à economia circular. Indica os seguintes efeitos causais principais: controle populacional, por meio do comprometimento governamental, suporte financeiro completo, formação de políticas e atualização tecnológica. E aponta quesitos como melhoria da segurança, confiabilidade, qualidade, reparo-remanufatura, utilização completa dos recursos e manutenção do equilíbrio ecológico-econômico como os principais fatores relacionados à adoção de consumo e produção sustentáveis associados à economia circular	Índia	Ecologia Ciências Ambientais; Outros tópicos Tecnologia Científica; Economia de Negócios; Conservação da Biodiversidade; Biologia Computacional Matemática
The integration of circular economy with sustainable consumption and production tools: Systematic review and future research agenda	Marrucci, Luca; Daddi, Tiberio; Iraldo, Fabio.	2019	Artigo de Revisão	Periódico	Journal Of Cleaner Production	Realiza uma revisão da literatura a respeito da integração entre a economia circular e as ferramentas de consumo e produção sustentáveis, identificando o Sistema de Gestão Ambiental e o Ecodesign como as ferramentas com maior nível de integração com a economia circular	Itália	Ecologia Ciências Ambientais; Outros tópicos Tecnologia Científica; Economia de Negócios; Combustíveis Energéticos; Engenharia; Ciência da Computação
Barriers to sustainable food consumption and production in China: A fuzzy DEMATEL analysis from a circular economy perspective	Liu, Yanping; Wood, Lincoln C.; Venkatesh, V. G.; Zhang, Abraham; Farooque, Muhammad.	2021	Artigo	Periódico	Sustainable Production And Consumption	Analisa as barreiras à implantação em larga escala do consumo e da produção sustentáveis de alimentos na China, destacando, dentre as principais causas, a frágil aplicação da legislação ambiental e a ausência de educação e responsabilização ambiental no país.	Austrália; Inglaterra; França; Nova Zelândia; Paquistão; República Popular da China	Ecologia Ciências Ambientais; Outros tópicos Tecnologia Científica; Combustíveis Energéticos; Engenharia; Geografia
Sustainable Production and Consumption of Food. Mise-en-Place Circular Economy Policies and Waste Management Practices in Tourism Cities	Camilleri, Mark Anthony.	2021	Artigo	Periódico	Sustainability	Aborda estudos de casos de hotéis, restaurantes e cafés localizados em pontos turísticos urbanos, indicando que as empresas desse segmento podem adotar ações preventivas e práticas de reciclagem para minimizar o desperdício de alimentos e a geração de resíduos.	Malta; Escócia	Ecologia Ciências Ambientais Outros tópicos Tecnologia Científica; Economia de Negócios; Geografia; Tecnologia de Ciência de Alimentos; Administração Pública; Outros Tópicos Ciências Sociais
Studies and Investigation about the Attitude towards Sustainable Production, Consumption and Waste Generation in Line with Circular Economy in Romania	Lakatos, Elena Simina; Cioca, Lucian-Ionel; Dan, Viorel; Ciomos, Alina Oana; Crisan, Oana Adriana; Barsan, Ghita.	2018	Artigo	Periódico	Sustainability	Analisa o comportamento dos consumidores da Romênia quanto ao consumo e à produção sustentáveis e a influência das gerações nas atitudes responsáveis dos consumidores em relação aos produtos.	Romênia	Ecologia Ciências Ambientais Outros tópicos Tecnologia Científica; Economia de Negócios; Ciência da Computação; Geografia; Biologia Computacional Matemática
Rethinking packaging production and consumption vis-a-vis circular economy: A case study of compostable cassava starch-based material	Casarejos, Fabricio; Bastos, Claudio R.; Rufin, Carlos; Frota, Mauricio N.	2018	Artigo	Periódico	Journal Of Cleaner Production	Investiga a produção e o consumo de embalagens no âmbito da economia circular, identificando que embalagens à base de fécula de mandioca apresentam resultados sociais e ambientais superiores às embalagens à base de petróleo.	Brasil; Portugal; EUA	Ecologia Ciências Ambientais Outros tópicos Tecnologia Científica; Economia de Negócios; Combustíveis Energéticos; Engenharia; Ciência da Computação; Agricultura; Microbiologia Aplicada à Biotecnologia; Instrumentação de Instrumentos; Ciência de Materiais; Ciências Atmosféricas Meteorologia; Recursos hídricos

Fonte: elaboração própria a partir dos dados de Web of Science (2023)

3 REFERENCIAL TÉORICO

Este capítulo realiza uma retrospectiva histórica da preocupação ambiental no mundo, culminando no desenvolvimento da economia circular no Brasil. Também discorre sobre os conceitos teóricos relacionados aos temas da sustentabilidade, economia verde e economia circular. Compõem esta seção as definições e os princípios da economia circular, bem como as escolas de pensamento que influenciaram a sua origem e os principais elementos que a compõem. Também é apresentado um diagnóstico preliminar dos volumes de produção dos setores analisados, os quais são detalhados em seus respectivos capítulos.

3.1 BASES HISTÓRICAS

A preocupação com a intensificação dos problemas ambientais remonta a algumas décadas. Weetman (2019) relata que o lançamento do livro *Silent Spring* da escritora Rachel Carson no ano de 1962 possibilitou a conscientização da população em relação ao meio ambiente e à destruição da vida silvestre decorrente da utilização de pesticidas agrícolas.

Já em 1966, o economista e teórico de sistemas Kennneth Boulding analisou sistemas abertos e fechados sob a ótica da economia de recursos e defendeu a preservação dos estoques de recursos e a mudança tecnológica para diminuir a produção e o consumo (Weetman, 2019).

No relatório “Nosso Futuro Comum”, conhecido como “Relatório Brundtland”, a Organização das Nações Unidas (ONU) enfatizou a importância de limites na utilização de recursos naturais e desenvolveu a definição de desenvolvimento sustentável como “aquele que satisfaz as necessidades presentes sem comprometer o suprimento das gerações futuras”. Esta iniciativa ratificou as noções concebidas quinze anos antes pelo Clube de Roma na publicação “Os Limites do Crescimento”, que utilizava modelos matemáticos para verificar que, mesmo na ocorrência de avanços na tecnologia, o planeta não conseguiria suportar o crescimento populacional em decorrência da pressão sobre os recursos naturais e do aumento da poluição. Ainda que muitas previsões não tenham se concretizado devido a imprecisões nos

cálculos, a conclusão central continuou válida e passou a orientar uma nova abordagem na relação entre os seres humanos e meio ambiente (Betiol *et a*l., 2012).

A teoria malthusiana, elaborada por Thomas Malthus em 1798, defendia que o crescimento da população ocorria segundo uma progressão geométrica, enquanto o a produção de alimentos crescia a uma progressão aritmética, o que culminaria em um cenário de aumento da fome e pobreza (Malthus, 2017). No entanto, esta teoria não se concretizou, visto que não considerava os avanços científicos e tecnológicos na produção agrícola, que resultaram no aumento da sua eficiência produtiva.

A Conferência de Estocolmo, em 1972, marcou o início do reconhecimento da crise entrelaçada do desenvolvimento humano e planetário, e fundamentou as bases para a ação ambiental que viria produzir atividades política e científica nos anos seguintes. Cinco décadas depois, o ritmo de mudança ainda é lento e a chamada "crise planetária tríplice" (caracterizada pelas mudanças climáticas, perda da natureza e da biodiversidade, e geração de poluição e resíduos) ameaça as condições de paz, prosperidade e equidade previstos na Agenda 2030, compromisso adotado no ano de 2015 estabelecendo os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) (SEI e CEEW, 2022).

Corrobora para esta análise o fato de que, desde 1972, somente cerca de 10% das metas de desenvolvimento sustentável e meio ambiente global acordadas pelos países foram alcançadas ou apresentaram progresso significativo (SEI e CEEW, 2022).

No ano de 1992, a Conferência sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento promovida pela ONU no Rio de Janeiro, conhecida como “Eco-92”, apresentou-se como um divisor de águas na área ambiental, conferindo impulso político e relevância ao tema do desenvolvimento sustentável. Na ocasião foram assinadas convenções sobre diversidade biológica e mudanças climáticas, além da Carta da Terra, que consistiu em uma declaração de princípios éticos fundamentais para a criação de uma sociedade global justa, sustentável e pacífica. Também foi aprovado o relatório conhecido como “Agenda 21”, em que foram identificadas como prioritárias os temas de proteção à saúde humana, o enfrentamento à pobreza e à desertificação, a transferência de tecnologia, a biotecnologia, o comércio, o uso da água e a gestão de resíduos (Betiol *et al*., 2012).

Algumas políticas públicas desenvolvidas no Brasil ao longo dos anos, como a gestão de resíduos, têm origem nas propostas identificadas na Agenda 21. O seu artigo número 21 estabelece a necessidade de diminuição da geração de resíduos e a adoção da reutilização e da reciclagem, enquanto o capítulo 4 relata que, em muitos casos, será necessário reorientar os padrões atuais de produção e consumo (Betiol *et al*., 2012).

Em decorrência das ações propostas na Conferência Eco-92, muitos países passaram a adotar políticas para enfrentar os desafios da degradação ambiental, com destaque para as estratégias e práticas de mercado visando combater padrões insustentáveis de produção e reduzir o impacto aos ecossistemas naturais (Betiol *et al*., 2012).

No ano de 1993, criação da série ISO 14.000 (abordando a qualidade da gestão ambiental) e do *Forest Stewardship Council* (FSC) (definindo os critérios para o manejo florestal) demonstra que as certificações socioambientais e demais “selos verdes” passaram a exercer influência sobre os processos de compra e contratações, com a incorporação de ferramentas de gestão. A agenda produtiva das organizações passou a enfatizar as questões ambientais e sociais, enquanto o poder público deparou-se com o desafio de fornecer as bases necessárias para a adaptação do sistema econômico a esta nova realidade (Betiol *et al*., 2012).

No ano de 2002, a ONU realizou em Johanesburgo, África do Sul, a Conferência Mundial sobre Desenvolvimento Sustentável, conhecida como “Rio+10”. A Conferência em Johanesburgo apresentou avanços mundiais significativos na produção mais limpa (representada pela sigla P+L) orientada pela chamada “ecoeficência”. No entanto, o consumo não acompanhou esta tendência, tornando-se o objeto de atenção da Conferência realizada pelas Nações Unidas no ano de 2012, denominada “Rio+20”, que teve como objetivo discutir os caminhos para uma economia verde e inclusiva (Betiol *et al*., 2012).

No ano de 2012, a economia mundial possuía cinco vezes o tamanho de meio século antes. Este crescimento correspondeu ao intenso declínio da pobreza nos anos anteriores. A conclusão a que se poderia chegar é de que a aceleração do crescimento econômico seria o caminho mais rápido no enfrentamento da pobreza. No entanto, este caminho encontra limites ambientais cada vez mais rigorosos. Neste sentido, a

chamada economia verde[4] (e, em especial, o crescimento verde), orientada para a diminuição significativa da utilização de matéria e energia presentes na produção de bens e serviços, apresenta-se como uma possibilidade para o alcance dos objetivos socioambientais esperado do sistema econômico (Abramovay, 2012) privado, como estudado pela Economia Ambiental, de base neoclássica.

Essa conclusão está contida em muitos documentos internacionais, iniciando pela publicação realizada pelas Nações Unidas no ano de 2011 conhecido como *Green Economy*. Ainda assim, não se sustenta porque, apesar do incremento na eficiência material e energética da economia moderna, a pressão sobre os ecossistemas continua aumentando. Este cenário torna a implantação da inovação nas organizações mais urgente e atrativa, uma vez que possibilita ganhos econômicos baseados na utilização mais eficiente de materiais, energia e da própria biodiversidade. Além disso, promove a reflexão por parte das empresas, da sociedade e do governo acerca do sentido e da utilidade daquilo que é produzido para o processo de desenvolvimento (Abramovay, 2012).

Em dezembro de 2015, a 21ª Conferência das Nações Unidas sobre as Mudanças Climáticas (conhecida como COP 21) reuniu a presença de 195 nações e originou o Acordo de Paris, tratado mundial para promover a redução do aquecimento global. Este compromisso internacional tem como principal objetivo promover a diminuição das emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) (CEBDS, 2019). O Acordo de Paris preconiza manter o aumento da temperatura média global bem abaixo dos 2ºC em comparação ao período pré-industrial e concentrar esforços para limitar o aumento da temperatura a 1,5ºC em relação ao período pré-industrial, como resposta global aos impactos das mudanças climáticas (Nações Unidas Brasil, 2015).

Alexandre Prado, diretor de Economia Verde da organização WWF-Brasil, discorre que as metas estabelecidas no Acordo de Paris somente poderão ser alcançadas se a sociedade adotar um novo padrão de desenvolvimento, de baixo carbono e sustentável nos âmbitos econômico, social e ambiental. Relata, ainda, que para a execução dos projetos, os poderes públicos (federal, estaduais e municipais) precisam assumir uma atuação mais intensa em dois aspectos: valorizando as florestas em pé (por meio do combate ao desmatamento e às queimadas, como

[4] A denominada economia verde é compreendida nesta tese como uma forma de tentar viabilizar a sustentabilidade na economia de mercado, como analisado pela economia neoclássica.

exemplos) e favorecendo a adaptação da indústria e agricultura à chamada “economia do século XXI” (WWF, 2020).

Tal compreensão conduz à visão da economia verde enquanto um conjunto de intervenções que possibilitam a compatibilização do consumo da sociedade com os níveis de produção atuais em meio à economia de mercado.

Havia uma intensa expectativa de que a Conferência do Clima das Nações Unidas realizada em Glasgow, na Escócia (conhecida como COP26), prevista para ocorrer no ano de 2020, mas adiada em vinte meses em virtude da pandemia de Covid-19, pudesse concretizar as metas definidas no Acordo de Paris. Seria a oportunidade para o estabelecimento das ações a fim de conter a ameaça das mudanças climáticas a uma elevação de no máximo 1,5ºC na temperatura média do planeta em comparação aos níveis pré-industriais. No entanto, este objetivo não foi atendido, mas o conhecido Pacto de Glasgow, assinado pelos países participantes, manteve vivo o compromisso de aumento máximo de 1,5ºC na temperatura média da Terra. O documento colocou a meta de 1,5ºC como objeto dos esforços globais, o que representa um progresso em reação ao Acordo de Paris, que menciona “bem abaixo de 2ºC”. Também reconhece que, para alcançar este objetivo, faz-se necessária a redução das emissões globais de carbono em 45% até 2030 em comparação ao nível de 2010, bem como zero emissões líquidas em meados do século, além de reduções significativas de outros GEE (WRI Brasil, 2021).

Em detrimento da meta estipulada, o relatório *Copernicus Global Climate Highlights Report 2024*, publicado em janeiro de 2025, apontou o ano de 2024 como o mais quente já registrado, e o primeiro a exceder 1,5ºC acima dos níveis pré-industriais para a temperatura média global anual (Copernicus, 2025).

No contexto de esgotamento dos recursos naturais e agravamento dos fenômenos de mudanças climáticas, a organização United Nations Environment Programme (UNEP ou, em português, Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente – PNUMA) desenvolveu a Iniciativa de Economia Verde no ano de 2008. No processo de transição da sustentabilidade para uma economia verde, a adoção de modelos baseados na economia circular apresenta-se como um caminho possível.

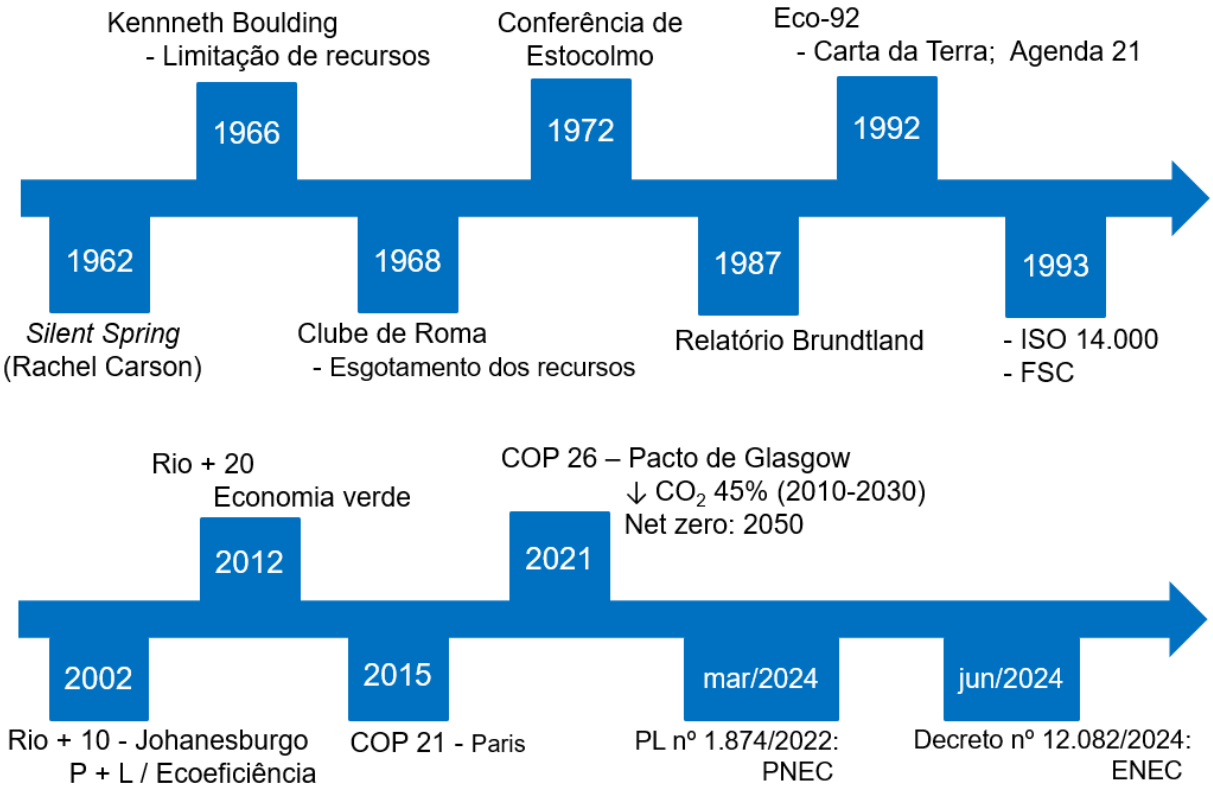
No cenário nacional, um importante arcabouço legal vem sendo construído de forma a possibilitar a criação de um ambiente regulatório favorável ao desenvolvimento e à aplicação de práticas de economia circular.

No mês de março de 2024, o Senado Federal aprovou o Projeto de Lei nº 1.874/2022 que institui a Política Nacional de Economia Circular (PNEC), definindo seus conceitos, objetivos e instrumentos. Após aprovação, o referido projeto foi remetido para análise da Câmara dos Deputados em março do mesmo ano, onde segue em tramitação até o momento desta pesquisa (Senado Federal, 2024).

No mesmo ano, o Decreto nº 12.082, de 27 de junho de 2024, instituiu a Estratégia Nacional de Economia Circular, com o objetivo de possibilitar a transição do modelo produtivo linear para uma estrutura circular, estimulando a utilização eficiente de recursos naturais e de iniciativas sustentáveis ao longo da cadeia de produção. O referido decreto estabelece, também, a criação do Fórum Nacional de Economia Circular, com o objetivo de assessoramento, monitoramento e avaliação da implementação da Estratégia Nacional de Economia Circular (Brasil, 2024).

A Figura 13 resume em uma linha do tempo os marcos ambientais apresentados nesta subsecção.

Figura 13 - Linha do tempo das preocupações ambientais



Fonte: elaboração própria (2025)

3.2 SUSTENTABILIDADE: ORIGENS E APLICAÇÃO DO CONCEITO

O Dicionário Brasileiro da Língua Portuguesa Michaelis conceitua o termo sustentabilidade como “Qualidade, característica ou condição de sustentável” (Michaelis, 2025). Já o Dicionário Online de Português (DICIO) apresenta uma definição mais ampla ao conceituar que sustentabilidade é:

> “Capacidade de criar meios para suprir as necessidades básicas do presente sem que isso afete as gerações futuras, normalmente se relaciona com ações econômicas, sociais, culturais e ambientais. Qualidade ou propriedade do que é sustentável, do que é necessário à conservação da vida” (DICIO, 2025).

A palavra sustentabilidade surgiu a partir da tradução do termo em alemão *Nachhaltigkeit*, cunhado na Alemanha, na Província da Saxônia, em 1560, em decorrência da preocupação com o manejo racional das florestas, a fim de possibilitar a sua regeneração e manutenção permanente. Desde o mundo antigo até a Idade Moderna, a madeira era intensivamente utilizada como matéria-prima para a construção de residências, móveis e barcos, bem como combustível para aquecimento de casas e cozimento de alimentos. Seu consumo era tão elevado que as lideranças marítimas do século XVI, Espanha e Portugal, começaram a presenciar a escassez das suas florestas (Boff, 2012).

Ainda na Saxônia, em 1713, o conceito de sustentabilidade passou a incorporar um caráter estratégico, quando o capitão Hans Carl von Carlowitz escreveu um tratado onde propunha a organização sustentável das florestas. Em um momento histórico em que muitas florestas eram desmatadas para utilização da madeira como carvão vegetal nos fornos de mineração que tinham sido criados em nome do progresso, Carlowitz defendeu o uso sustentável desta matéria-prima. O capitão alertou para o tratamento cuidadoso da madeira, sob pena de término do negócio e extinção dos lucros. Chamou atenção, ainda, para a necessidade de cortar somente a quantidade de madeira que a floresta conseguisse suportar e que permitisse a permanência do seu crescimento (Boff, 2012).

As conclusões obtidas pelo referido capitão em 1713 – as quais permanecem válidas na atualidade – e as definições obtidas nos dicionários consultados permitem inferir que a sustentabilidade consiste na capacidade de um sistema manter-se nas mesmas características iniciais por um determinado período.

A presente tese aborda a sustentabilidade sob este aspecto, isto é, a sustentabilidade humana, ou seja, da vida e dos sistemas naturais do Planeta. Esta abordagem se ocupa em garantir a manutenção da vida humana e das características naturais da Terra por um longo prazo.

Oserva-se, ainda, o alinhamento verificado entre a economia circular e o alcance dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS).

Os ODS constituem um projeto global para promover ações que visam a eliminação da pobreza, a proteção do meio ambiente e do clima, e a garantia da paz e prosperidade para as pessoas de todas as localidades. Dezessete objetivos foram desenvolvidos de modo a contribuir para o alcance da Agenda 2030 (Nações Unidas Brasil, 2022).

A economia circular coopera para o alcance dos ODS, e o seu estudo destaca-se sob a perspectivas de três objetivos: objetivo 9 (Indústria, inovação e infraestrutura), objetivo 12 (Consumo e produção responsáveis) e objetivo 13 (Ação contra a mudança global do clima).

Em relação ao objetivo 9 (Indústria, inovação e infraestrutura), observa-se que a economia circular possui um papel fundamental no desenvolvimento de infraestruturas resilientes, no aumento da industrialização inclusiva e sustentável e no estímulo à inovação. A adoção de modelos circulares pode contribuir para o alcance da meta proposta pelas Nações Unidas de modernização da infraestrutura e reabilitação das indústrias para torná-las sustentáveis até 2030, aumentando a eficiência no uso de recursos e ampliando a utilização de tecnologias limpas.

Sob o ponto de vista do objetivo 12 (Consumo e produção responsáveis), a economia circular pode contribuir para o aumento da sustentabilidade dos níveis de produção e consumo atuais. Apresenta, também, o potencial de auxiliar o alcance das metas definidas pelas Nações Unidas até 2030, como a gestão sustentável e o uso eficiente dos recursos naturais, além da redução da geração de resíduos por meio da prevenção, redução, reciclagem e reúso.

Por fim, ressalta-se a relevância da economia circular no alcance do objetivo 13 (Ação contra a mudança global do clima), que estabelece a necessidade de medidas urgentes no enfrentamento às mudanças climáticas e os seus impactos. A adoção de práticas circulares que promovem a reintegração de bens e materiais à

cadeia produtiva tem como potencial a redução das emissões atmosféricas nos processos de produção e da geração de resíduos sólidos e efluentes líquidos.

3.3 ECONOMIA VERDE: O CAMPO DA ECONOMIA CIRCULAR

A Iniciativa de Economia Verde apresentada pela UNEP no ano de 2008 consistiu em uma pesquisa global e assistência aos países de modo a estimular os formuladores de políticas a apoiar investimentos ambientais na esfera da sustentabilidade. Como decorrência deste trabalho e das atividades de outras agências, a economia verde no contexto do desenvolvimento sustentável e da erradicação da pobreza foi incorporada à agenda da Rio+20 em 2012 e reconhecida como uma ferramenta para o alcance do desenvolvimento sustentável (UNEP, 2025).

A organização UNEP definiu economia verde como sendo um modelo de economia que resulta em melhoria do bem-estar humano e equidade social, ao mesmo tempo em que reduz significativamente os riscos ambientais e a escassez ecológica (UNEP, 2025). As principais características da economia verde estão apoiadas em três pilares, a saber: baixa emissão de carbono, eficiência no uso de recursos e incentivo à inclusão social (Portal da Indústria, s.d.).

O conceito de economia verde foi desenvolvido de modo a retratar que desenvolvimento sustentável e crescimento econômico não são práticas antagônicas, podendo, inclusive, ser complementares. Diante desta abordagem, não somente os países desenvolvidos podem adotar este modelo, como também os países em desenvolvimento, visto que a transição para a economia verde não se apresentaria como um obstáculo ao desenvolvimento destas nações, mas sim como uma contribuição para estimular esse crescimento (Portal da Indústria, s.d.).

Uma coalisão formada por mais de 50 organizações que atuam para acelerar a transformação dos modelos econômicos atuais para economias verdes, *a Green Economy Coalition*, define economia verde como uma economia resiliente e justa, que possibilita maior qualidade de vida para todos e respeita os limites ecológicos do planeta. Neste sentido, observa-se que a economia verde é justa e inclusiva, e estimula a equidade social enquanto promove a conservação do meio ambiente (Portal da Indústria, s.d.).

As seguintes práticas apresentam-se como instrumentos da economia verde: mitigação, adaptação, bioeconomia e serviços ambientais. A mitigação consiste na adoção de medidas que diminuem as emissões de Gases de Efeito Estufa com o objetivo de evitar ou minimizar as mudanças climáticas. Como exemplos, têm-se a utilização de energia renovável nos processos produtivos, e a compensação das emissões mediante ações como o reflorestamento, o qual promove o sequestro de carbono da atmosfera. Já a adaptação compreende um conjunto de ações que podem ser adotadas para se ajustar aos efeitos do clima, com o objetivo de evitar ou minimizar possíveis danos ocasionados pelas mudanças climáticas. As medidas de adaptação têm a possibilidade de influenciar o risco por meio da diminuição da vulnerabilidade e/ou exposição, enquanto as medidas de mitigação reduzem o risco climático por meio da diminuição do perigo (uma vez que, ao reduzir as emissões de GEE, a probabilidade de ocorrência de um evento climático extremo diminui) (Portal da Indústria, s.d.).

A bioeconomia constitui mais um instrumento da economia verde. Caracteriza-se pela substituição dos combustíveis fósseis e a criação de uma nova indústria baseada na inovação e no desenvolvimento de produtos oriundos de recursos biológicos gerando renda e riqueza em variados segmentos da economia, como farmacêutico, têxtil, de cosméticos, químicos e energia. Já os serviços ambientais consistem em atividades que promovem a manutenção, recuperação ou aperfeiçoamento dos serviços ecossistêmicos (Portal da Indústria, s.d.).

Ao longo da última década, muitos países e organizações trataram o conceito de economia verde como uma prioridade estratégica, em uma preparação para o enfrentamento dos principais desafios do século XXI, isto é, da urbanização e escassez de recursos às mudanças climáticas e volatilidade econômica (UNEP, 2025).

Uma nova economia tem a função de demonstrar que os recursos não são infinitos, além de estimular a criatividade para a obtenção de produtos e serviços baseados na utilização cada vez mais inteligente, eficiente e parcimoniosa da matéria, da energia e da própria biodiversidade (Abramavoy, 2012).

Os ganhos esperados com a economia verde passam pela melhoria da qualidade de vida da população, redução das desigualdades sociais, conservação da biodiversidade e dos recursos naturais, além do aumento da produtividade, resultado

da maior eficiência no uso de matérias-primas e otimização do consumo de energia (Portal da Indústria, s.d.).

A partir do conceito introduzido pela UNEP, observou-se uma evolução para uma economia verde inclusiva. Este modelo é caracterizado por apresentar-se como de baixo carbono, eficiente e limpo na produção, além de ser inclusivo no consumo e nos resultados e baseado no compartilhamento, circularidade, colaboração, solidariedade, resiliência, oportunidade e interdependência. A economia verde inclusiva busca expandir as opções e escolhas para as economias nacionais utilizando políticas fiscais e de proteção social. Também reconhece que existem muitos e diversos caminhos para a sustentabilidade ambiental (UNEP, 2025).

Uma economia verde inclusiva apresenta-se como uma alternativa ao modelo econômico atual (baseado na tríade de produção, consumo e descarte), o qual gera riscos ao meio ambiente e à saúde humana, estimula o consumo e o desperdício, agrava a escassez ecológica e de recursos, e resulta em desigualdade social. Esta nova configuração é um caminho possível para o alcance das metas de desenvolvimento sustentável propostas na Agenda 2030, com os objetivos de erradicar a pobreza e preservar os limites ecológicos (UNEP, 2025).

A organização UNEP (2025) relata que uma economia verde inclusiva deve gerar não somente empregos e renda, mas também garantir as condições necessárias à saúde humana, ao meio ambiente e ao futuro dos indivíduos. Ressalta, ainda, que o desafio consiste em desenvolver as condições para uma maior prosperidade e equidade social crescente, nos termos de um planeta finito e que apresenta fragilidades.

Neste sentido, o desafio passa pela capacidade dos sistemas produtivos em associar o aumento de bem-estar econômico e social à diminuição do consumo e da pressão sobre os recursos naturais e ecossistemas (Portal da Indústria, 2012), além de envolver, também, mudança tecnológica e inovação.

Abramovay (2012) relata que o desafio de uma nova economia (orientada para a reconstrução da relação entre sociedade e natureza, economia e ética) é incorporar em cada etapa da produção a distribuição a capacidade de produzir bens úteis e relevantes para as pessoas, as comunidades e os territórios que se relacionam com a organização em questão, demonstrando de forma clara a contabilidade dos fluxos materiais e energéticos envolvidos na produção.

No ano de 2009, autoridades de 34 países assinaram uma Declaração sobre Crescimento Verde com o objetivo de intensificarem os esforços para estratégias na área como parte da resposta à crise econômica global. O crescimento verde[5] consiste em estimular a expansão e o desenvolvimento econômico garantindo, simultaneamente, que as riquezas naturais continuem fornecendo os recursos e os serviços ambientais dos quais o bem-estar humano depende. Os riscos do desenvolvimento estão aumentando à medida que o crescimento continua desgastando o capital natural, resultando em um aumento da escassez hídrica, esgotamento dos recursos, aumento da poluição, mudanças climáticas e uma perda irrecuperável de biodiversidade (OECD, 2011).

Este cenário pode comprometer perspectivas futuras de crescimento porque a substituição do capital físico pelo capital natural torna-se cada vez mais onerosa (por exemplo, conforme a água se torna mais escassa ou poluída, mais infraestrutura para transportá-la ou trata-la é requerida) e porque as mudanças não seguem necessariamente uma trajetória previsível (por exemplo, algumas populações de peixes podem desaparecer subitamente após registrarem somente uma queda lenta ao longo dos anos) (OECD, 2011).

O conceito de economia verde não substitui a noção de desenvolvimento sustentável, mas, reconhece-se cada vez mais a necessidade da adoção de novos paradigmas de economia e de desenvolvimento para se alcançar a sustentabilidade. A economia verde apresenta-se como o caminho para o alcance da sustentabilidade, envolvendo investimentos públicos e privados, inovação e tecnologia, políticas públicas, ações governamentais e práticas de mercado alinhadas com esse propósito (Portal da Indústria, s.d.).

A questão-chave da nova economia reside na emergência de um metabolismo social que garanta a permanência e regeneração dos serviços que os ecossistemas prestam à sociedade. A nova economia está baseada em um metabolismo industrial que diminui significativamente a utilização de carbono na base de matéria e energia da sociedade e, simultaneamente, dispõe de oportunidades para que as necessidades humanas básicas sejam atendidas dentro dos limites das possibilidades dos ecossistemas. Este cenário supõe diminuir substancialmente a desigualdade, além de

[5] A tese compreende que a noção de crescimento verde apresentada na literatura encontra uma limitação de aplicação no caso de países que não dispõem de recursos naturais. Para contornar tal limitação, uma possibilidade é o emprego de inovação e tecnologia.

aumentar a produtividade material e energética dos processos de produção por meio da inovação. Este conceito é incompatível com o modelo econômico atual, para o qual o propósito da economia é estimular o crescimento incessante da produção e do consumo (Abramovay, 2012).

3.3.1 A perspectiva da ética na economia verde

Na análise da interface entre limites e inovação, a relação entre economia e ética é um ponto fundamental. É necessário que a ética esteja no centro das discussões acerca da transição para uma nova economia, ao se tomar decisões quanto à utilização de recursos materiais e energéticos e à organização do trabalho dos indivíduos (Abramovay, 2012).

Sob o entendimento de que não há uma única ética, mas que existem variados sistemas éticos convivendo na sociedade, observa-se que a transição para novos modelos econômicos requer que se desenvolva uma ética que comtemple, de forma relevante, as discussões a respeito da utilização dos recursos naturais não renováveis.

Desta forma, a ética é colocada no centro da vida econômica, de modo a se avaliar as finalidades humanas de produção e utilização da riqueza. A gestão empresarial moderna não pode mais se limitar a avaliar a sua eficiência por meio de balanços contábeis e, cada vez mais, passa a incorporar às suas ferramentas de medição os efeitos imediatos das suas ações nas vidas dos indivíduos, das famílias, dos territórios e dos ecossistemas. Esta prática coloca a atividade econômica como parte de um processo de regeneração do tecido social e ecossistêmico, não se restringindo apenas a minorar possíveis impactos ambientais negativos advindos da existência da empresa (Abramovay, 2012).

Neste contexto em que a iniciativas das organizações extrapolam a chamada responsabilidade socioambiental corporativa, surgem as bases da ferramenta de gestão conhecida como ESG (Environmental, Social and Corporate Governance) ou ASG (Ambiental, Social e Governança Corporativa). Nesta abordagem, ocorre a substituição do fator econômico pela noção de governança corporativa, em um movimento de ampliação do escopo, visto que não considera somente o resultado

comercial, como também a transparência nesta divulgação, os comitês de auditoria, a conduta corporativa e as práticas anticorrupção (Costa e Ferezin, 2021).

Desta forma, a economia verde compreende um conjunto de estratégias de consumo e de gestão empresarial que possibilitam a adequação das práticas do capitalismo à visão de meio ambiente. O emprego destas “medidas verdes” possibilita a mitigação e adaptação do capital às demandas ambientais. As organizações buscam adaptar as suas iniciativas corporativas às necessidades ambientais por meio do emprego de ferramentas de gestão. Estas proposições de adaptação à economia de mercado que incluem as preocupações ambientais podem ser implementadas como modelos de negócio sob a perspectiva da economia verde, possibilitando a manutenção da lógica da economia de mercado na sua essência.

3.3.2 Mudanças climáticas no âmbito da economia verde

Neste cenário em que a economia verde emerge em meio à elevação do consumo de matérias-primas e ao esgotamento dos recursos naturais, além do aumento da geração de resíduos e do agravamento dos fenômenos de mudanças climáticas e da degradação das condições de trabalho, a economia circular apresenta-se como uma alternativa ao atual modelo de produção e consumo e uma oportunidade de mitigação dos impactos ambientais.

Em seu relatório publicado em 2007, Stern já estimava os custos das mudanças climáticas para o mundo. O autor prevê que, na ausência de ações para conter os impactos das alterações climáticas, os custos e danos relacionados às mudanças do clima representam uma perda de, no mínimo, 5% do PIB global por ano, podendo comprometer 20% ou mais. Já, na ocorrência de ações no sentido de diminuir as emissões de GEE, Stern relata a possibilidade de limitar os custos a aproximadamente 1% do PIB global anualmente, demonstrando que os custos econômicos da inação são suplantados pelos benefícios gerados por ações intensivas e precoces no combate aos impactos das alterações climáticas (Stern, 2007).

Stern (2007) observa que a redução das emissões de GEE pode ocorrer por meio do aumento da eficiência energética, por modificações na demanda e por meio da utilização de tecnologias limpas. Parte da solução passa pela diminuição da procura por produtos e serviços intensivos em emissões. Em um cenário em que os

preços passem a refletir todos os custos de produção, abrangendo os custos da externalidade da emissão dos GEE, a reação dos consumidores e das organizações deverá ocorrer no sentido de substituição para alternativas de baixo carbono. A demanda também é influenciada pela maior conscientização da sociedade acerca das mudanças climáticas. Ainda assim, os elementos de demanda não devem conseguir, por si só, possibilitar todas as reduções de emissões necessárias (Stern, 2007).

Segundo o mesmo autor, as mudanças climáticas são a maior falha de mercado[6] observada no mundo, abrangendo externalidades e bens-públicos (Stern, 2007). Estudiosos das ciências econômicas descrevem o clima global como um “bem público”. Bens públicos consistem em um caso específico de externalidades, cujos efeitos independem da identificação dos geradores ou da origem da externalidade (Stern, 2007). Neste contexto, os indivíduos que não pagam pela manutenção das boas condições climáticas, não podem ser excluídos do usufruto dos seus benefícios (Samuelson, 1954, *apud* Stern, 2007).

Em termos econômicos, a emissão de GEE é tida como uma externalidade uma vez que os custos não são pagos pelos geradores de emissões dos poluentes. Ademais, não há obrigação destes geradores compensarem aqueles que são impactados negativamente pelas alterações climáticas. Desta forma, as mudanças do clima motivadas pela ação humana caracterizam-se como uma externalidade, situação em que nem o mercado nem quaisquer instituições aplicam uma “correção”, salvo sob intervenção política. Nesta situação, os geradores das emissões de GEE ocasionam mudanças no clima, mas não arcam com as consequências das suas ações na íntegra, cujos custos acabam incidindo sobre a sociedade e as gerações futuras (Stern, 2007).

Portanto, na falha de mercado motivada pelas externalidades, o preço do bem não contempla totalmente os ganhos ou as perdas decorrentes da sua produção. Observa-se, ainda a distinção entre o custo social e o custo privado. Enquanto o custo social compreende os custos exigidos da sociedade em decorrência da produção de bens, o custo privado corresponde à compensação pelo pagamento realizado (Pauletti, 2007).

[6] Pauletti (2007) descreve que as falhas de mercado são caraterizadas pela alocação ineficiente de recursos na ausência de intervenção do Governo, e podem ser agrupadas em quatro grandes grupos, a saber: bens públicos, externalidades, informação imperfeita e mercados incompletos.

Uma vez que o agente considera somente os seus custos privados, parte do custo social não é considerado, originando uma superprodução de bens causadores de externalidades negativas. Ademais, como o agente leva em conta somente os seus benefícios privados, parte do benefício social também não é considerado, culminando em uma suboferta de bens causadores de externalidades positivas (Pauletti, 2007).

A partir do primeiro Teorema da Economia do Bem-Estar, o preço ótimo de um bem ou serviço será alcançado na ausência de externalidades em um mercado livre, competitivo e orientado por um sistema de preços. Por outro lado, a falha de mercado ocorre quando o mercado não aloca de forma eficiente os recursos a fim de maximizar a satisfação dos consumidores (Pauletti, 2007).

Stern (2007) observa, ainda, que as mudanças climáticas são uma externalidade global, tanto do ponto de vista das suas causas quanto dos seus efeitos. O autor relata que uma resposta global eficaz requer a adoção de três componentes de mitigação, a saber: precificação do carbono (mediante a definição de um preço para o carbono, por meio de impostos, comércio ou regulamentação); política de incentivo ao desenvolvimento e implantação de tecnologias de baixo carbono; e eliminação de barreiras à mudança comportamental de consumidores e organizações (Stern, 2007).

O estudo das externalidades aponta as emissões de GEE não tributadas ou não tarifadas como a fonte do problema econômico em questão. A política de mitigação atua na fixação de um preço que a externalidade requer para as emissões, introduzindo impostos ou preços para a emissão desses poluentes (Stern, 2007).

A fixação do preço do carbono possibilita corrigir a falha de mercado, imputando os custos da poluição aos seus geradores, em um processo de internalização da externalidade produzida.

Pauletti (2007) descreve que a internalização de uma externalidade ocorre ao se garantir que o gerador pague todos os custos ou desfrute de todos os benefícios gerados (no caso de efeitos negativos ou positivo, respectivamente).

O referido mercado de carbono é constituído por sistemas de negociação de certificados de redução de emissões de GEE. Nele, cada tonelada de CO_2 que uma determinada empresa deixa de produzir (ou o seu equivalente em carbono, no caso da emissão de outros GEE) equivale a um crédito de carbono, que pode ser

comercializado no mercado internacional mediante as regras do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) (IPEA, 2012).

O Protocolo de Kyoto, precursor do mercado de carbono, entrou em vigor em 2005, definindo metas de redução de emissões para os países desenvolvidos e aqueles cujas economias encontravam-se em transição para o capitalismo (BRASIL, Ministério do Meio Ambiente, s.d.).

Este tratado, o mais importante acordo climático multilateral, estabeleceu limites para as emissões de GEE pelos países desenvolvidos. Uma vez alcançado estes limites, essas nações poderiam adquirir créditos de carbono de países em desenvolvimento. Além disso, compõem o denominado mercado de carbono outros instrumentos que podem atuar como alternativas de renda para os países em desenvolvimento, como: MDL (Mecanismo de Desenvolvimento Limpo), REDD e REDD + (Redução de Emissões por Desmatamento e Degradação Evitados), NAMA (Ação Nacional Apropriada de mitigação), pagamentos por serviços ambientais, bolsas verdes, entre outros (IPEA, 2012). O Protocolo de Kyoto foi substituído pela adoção do Acordo de Paris, aprovado na COP 21 em 2015.

De forma geral, os críticos à economia verde colocam em questão a premissa de que a proteção ambiental somente se concretizará se houver lucro para as empresas, não incorporando os demais componentes intrínsecos à relação entre a sociedade e os recursos naturais, como aqueles científicos, biológicos, sociais e culturais, dentre outros (IPEA, 2012).

Cada vez mais, as negociações internacionais sobre mudanças do clima vêm adotando uma abordagem mais orientada para o mercado. As tentativas de associar a preservação do meio ambiente a uma lógica de mercado remontam a mais de duas décadas, com discussões em fóruns multilaterais com o objetivo de desenvolver políticas de incentivo econômico para o combate às alterações climáticas. No “ambientalismo de mercado”, mecanismos de compensação, como os créditos de carbono, associam ações de preservação ambiental às movimentações financeiras (IPEA, 2012).

O Brasil vem apresentando avanços no desenvolvimento de mecanismos mais limpos para a redução das emissões de GEE. Em 11 de dezembro de 2024, a Lei nª 15.042 instituiu o Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões de Gases de Efeito

Estufa (SBCE), regulamentando as operações de compra e venda de créditos de carbono no país (Brasil, 2024).

Para organizações e pessoas físicas que emitirem mais de 10 mil toneladas de gás carbônico equivalentes anualmente (tCO_2e), o referido projeto de lei estabelece a obrigatoriedade de monitorar e apresentar suas emissões e reduções anuais de GEE (Agência Senado, 2023). Também determina que aqueles geradores cujas emissões superarem 25 mil tCO_2e devem comprar os créditos de carbono das organizações que efetuarem a redução das suas emissões, sob pena de pagamento de multa, perda de benefícios fiscais e proibição de contratação com os entes públicos (O Globo, 2023).

Estima-se que o mercado de carbono venha a comtemplar 85% do universo corporativo. Restou fora desta regulamentação a segunda maior fonte de emissões de GEE no país, a agropecuária, a qual concentra 25% da geração de GEE, atrás apenas do manejo da terra (que abrange os desmatamentos) com 49% das emissões totais (O Globo, 2023).

3.3.3 Os limites da economia verde em uma sociedade de mercado

Para o sociólogo português Boaventura de Sousa Santos, a crise ambiental não se restringe apenas às questões das mudanças climáticas, mas também apresenta componentes econômico, financeiro, energético e civilizacional (Moreira e Gois, 2007; Martins, 2012).

Em termos do capitalismo verde, o pensador defende que o desenvolvimento de fontes de energia mais limpas é importante, mas não será suficiente se a sociedade não migrar para novos modelos de produção e consumo (Martins, 2012).

Michael Löwy caracteriza a economia verde como uma economia capitalista de mercado que, sob o enfoque da lucratividade e rentabilidade, procura incorporar algumas iniciativas “verdes” muito limitadas. Ademais, Boaventura de Sousa Santos acrescenta que estas definições são “escandalosamente ineficazes e até contraproducentes” (IPEA, 2012).

A partir da compreensão de que a tendência da economia de mercado, (âmbito em que a economia verde está situada) é produzir cada vez mais bens e produtos a fim de maximizar a lucratividade, é possível concluir que, caso as restrições

ambientais sejam mais severas, a produção privada pode entrar em contradição, podendo, até mesmo, tornar-se inviável.

Neste sentido, se os custos das externalidades fossem imputados nos preços de venda dos produtos comercializados, esta internalização das externalidades poderia alcançar custos tão elevados ao ponto de comprometer a sobrevivência de muitas empresas. Portanto, ocorre que os danos advindos das externalidades causadas pelos emissores de GEE acabam sendo pagos não por estas organizações, mas sim, pela sociedade.

Desta forma, a economia verde apresenta-se como o limite das ações ambientais no sistema de produção capitalista. Logo, em princípio, a introdução de estratégias de economia circular poderia contornar a tendência geral das empresas privadas, que necessitam de escalas crescentes de mercadorias. Nesta análise, busca-se investigar se, dentro desse limite, pode haver a convergência para a sustentabilidade ou não.

3.4 ECONOMIA CIRCULAR

Nesta subseção, serão apresentados as definições e os princípios relacionados à economia circular, além da evolução histórica das escolas de pensamento que influenciaram o desenvolvimento da economia circular e os componentes básicos que a caracterizam. O subtópico é encerrado com a apresentação de um diagnóstico preliminar dos volumes de produção e consumo nos segmentos de têxteis e vestuário, e de eletroeletrônicos.

3.4.1 Definições e princípios

Ainda que a base econômica atual centrada no tripé “extrair, transformar, descartar” tenha sido fundamental para o desenvolvimento industrial, o aumento da volatilidade dos preços, os riscos da cadeia de suprimentos e a intensa pressão sobre o consumo dos recursos naturais têm conduzido as organizações e os formuladores de políticas para a necessidade de rever a utilização de materiais e energia. A economia circular apresenta-se como uma possível resposta aos desafios relativos ao

uso de recursos e tem o potencial de geração de empregos e redução dos impactos ambientais, incluindo as emissões de carbono (Ellen MacArthur Foundation, 2015).

Analisada como uma possível alternativa, a economia circular possibilitaria a migração de bens que estão em fim de vida útil em recursos para outros, operando por meio de ciclos fechados (Stahel, 2016).

Geng, Sarkis e Bleischwitz (2019) relatam que são necessários quatro níveis para a economia circular operar, sendo eles: produtos (os quais devem ser projetados para propiciar a reciclagem e reutilização, baseados em cadeias de suprimentos e métodos de fabricação mais limpos e sustentáveis), empresas (as quais necessitam de modelos de negócios criadores de valor público e privado), redes (de empresas e clientes produzindo e consumindo produtos essências de forma interligada) e políticas (que apoiem o mercado).

A organização UNEP apresenta diferentes práticas de economia circular, distinguindo os conceitos de reciclagem, reforma, remanufatura, reparo e reúso (IRP, 2018).

A reciclagem refere-se às operações especificadas no Anexo IV B7 da Convenção de Basileia. As operações de reciclagem abrangem, usualmente, o reprocessamento de resíduos em produtos, materiais ou substâncias, ainda que não necessariamente para a finalidade original. Operações que recuperam energia a partir de resíduos não estão englobadas na reciclagem (IRP, 2018). Portanto, a reciclagem consiste em processos de recuperação de materiais para serem utilizados para o fim original ou outros propósitos que não seja a recuperação de energia (Ellen MacArthur Foundation, 2013).

O "*refurbishment*" ou reforma (ou ainda, renovação) trata da modificação de um resíduo ou produto mediante a manutenção ou operações intermediárias de manutenção com vistas a aumentar ou restaurar o desempenho e/ou a funcionalidade

[7] O Anexo IV B da Convenção de Basileia descreve as seguintes operações: R1 – uso como combustível (exceto na incineração direta) ou outros meios para gerar energia; R2 – regeneração/recuperação de solvente; R3 – reciclagem/recuperação de substâncias orgânicas que não são utilizadas como solventes; R4 – reciclagem/recuperação de metais e compostos metálicos; R5 – reciclagem/recuperação de outros materiais inorgânicos; R6 – regeneração de ácidos ou bases; R7 – recuperação de componentes utilizados para redução da poluição; R8 – recuperação de componentes de catalisadores; R9 – rerrefino de óleo usado ou outras reutilizações de óleo usado anteriormente; R10 – tratamento de terra resultando em benefícios para a agricultura ou melhoria ecológica; R11 – utilizações de materiais residuais obtidos de que qualquer uma das operações numeradas de R1 a R10; R12 – troca de resíduos para submissão a qualquer uma das operação numeradas de R1 a R11; R13 – acúmulo de material destinado a qualquer operação na Seção B (UNEP, 2020).

do objeto, ou ainda para atender às especificações técnicas aplicáveis ou requisitos regulatórios. Como resultado, obtém-se um produto totalmente funcional a ser reutilizado para uma finalidade que é, ao menos, aquela para a qual foi originalmente concebida. A restauração da funcionalidade, mas não do valor, possibilita uma nova vida útil para o produto (IRP, 2018).

Também chamada de recondicionamento, na estratégia de "*refurbishment*", ocorre a substituição ou o reparo de componentes principais que apresentam defeito ou estão na iminência para tal, e são realizadas mudanças na aparência do produto, por meio, por exemplo, de limpeza ou pintura, de forma a possibilitar o retorno do produto à condição de funcionamento (Ellen MacArthur Foundation, 2013 e 2021). Portanto, o produto retorna a uma condição funcional, mas não superior à da especificação original.

A remanufatura compreende um processo industrial padronizado em que os núcleos dos produtos são restaurados pelo menos às especificações originais, isto é, em condições e desempenhos como novos ou ainda melhores (IRP, 2018).

A remanufatura consiste na restauração completa de um produto, por meio da qual ele é submetido sistematicamente aos processos de desmontagem, limpeza e inspeção para verificação de desgaste e degradação. Há a substituição de componentes que estejam fora do padrão ou degradados, além da incorporação de possíveis atualizações. O produto é, então, remontado, e são realizados testes de qualidade para assegurar que o desempenho encontra-se em conformidade com as especificações originais. O produto remanufaturado apresenta funcionalidade equivalente ao produto recém-fabricado e, usualmente, dispõe da mesma garantia de do produto novo (Nars, 2016).

No processo de remanufatura o produto é submetido à limpeza, inspeção e desmontagem. As peças que apresentam defeito são substituídas e o produto é montado e encaminhado novamente para testes e inspeção a fim de assegurar que os padrões de qualidade de um produto recém-fabricado sejam atendidos ou superados. A ordem das etapas da remanufatura pode ser modificada ou etapas podem ser suprimidas em função do tipo e do volume de produto a ser remanufaturado (Sundin, Jacobsson e Björkman, 2000).

A remanufatura difere da reciclagem pois, enquanto esta reduz os produtos a matérias-primas que podem ser utilizadas novamente, a remanufatura mantém a

forma geométrica do produto, sendo possível capturar tantos os materiais quanto o valor agregado (como trabalho, energia e processos de produção) que o produto original incorporou durante a sua fabricação inicial (Nars, 2016).

O reparo diz respeito à correção de uma falha específica em um resíduo ou produto, e/ou à substituição de componentes com defeito, de modo a possibilitar que o objeto em questão retorne a uma condição totalmente funcional para ser utilizado com a finalidade concebida originalmente (IRP, 2018).

O reúso corresponde à reutilização de produto, substância ou objeto que não seja um resíduo, para a mesma finalidade para a qual foi originalmente pretendida (IRP, 2018). Quando ocorre sem a necessidade de reparo ou reforma, é conhecido como reúso direto. Já, quando estas operações estão presentes, configura-se como reúso (UNEP, 2017).

O Parlamento Europeu e o Conselho da União Europeia, em sua Diretiva 2008/98/CE, que trata da gestão de resíduos, difere os conceitos de reúso e de preparação para reúso. O reúso é conceituado como qualquer operação pela qual produtos ou componentes que não são resíduos são utilizados novamente para o mesmo fim para o qual foram projetados. Já a preparação para reúso consiste em operações de verificação, limpeza ou recuperação por reparo, por meio das quais os produtos ou seus componentes que se tornaram resíduos são preparados para que possam ser reutilizados sem qualquer outro processamento prévio (European Union, 2008).

Portanto, a definição de preparação para reúso é empregada no caso que o item tenha sido descartado como resíduo, isto é, não se enquadram nesta categoria atividades de reparos ou limpezas de itens que nunca se tornaram resíduos (Eurostat, 2023).

Esta prática de gestão de resíduos ocupa a segunda posição na hierarquia de resíduos descrita pelo Parlamento Europeu e o Conselho de União Europeia, a qual é regida pela seguinte ordem de prioridade: prevenção; preparação para reúso; reciclagem; outro processo de recuperação (como a recuperação de energia, por exemplo); e disposição de resíduos (European Union, 2008).

Uma economia circular é caracterizada por ser restaurativa e regenerativa por princípio, e tem como objetivo a manutenção de produtos, componentes e materiais

em seu mais alto nível de utilidade e valor todo o tempo em ciclos de materiais técnicos e biológicos (CE100 Brasil, 2017).

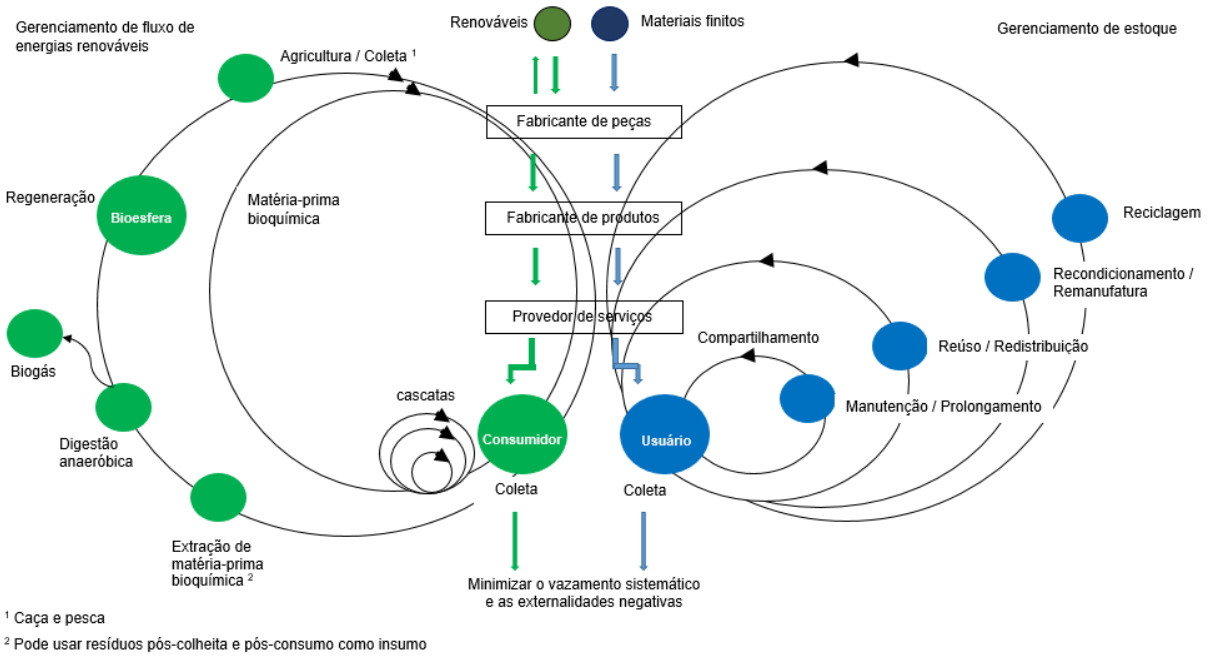
Desta forma, este modelo busca assegurar o fluxo de materiais e produtos em uma estrutura circular, onde eles não se tornem resíduos, mantendo o seu valor de mercado e de uso pelo máximo tempo possível (Modefica, FGVces e Regenerate, 2020).

Weetman (2019) relata que cada vez mais a economia circular vem se tornando sinônimo da organização Ellen MacArthur Foundation. Esta estrutura consiste em uma instituição filantrópica que trabalha com empresas, governos e academia para acelerar a transição para a economia circular. No ano de 2012, publicou o primeiro relatório da série *Towards The Circular Economy*, em que explorou um novo campo, analisando as oportunidades econômicas e de negócios deste novo modelo (Weetman, 2019).

A economia circular prevê a reconstrução do capital (físico, manufaturado, humano, social ou natural), garantindo o aperfeiçoamento dos fluxos de bens e serviços. A organização Ellen MacArthur Foundation propõe um diagrama[8] sistêmico para representar os fluxos contínuos de materiais técnicos e biológicos, demonstrado na Figura 14 (Ellen MacArthur Foundation, 2017b).

[8] O lado esquerdo do diagrama representa o ciclo biológico, o qual compreende os materiais que podem ser biodegradados e retornarem ao planeta com segurança. Trata dos processos que promovem a devolução de nutrientes para o solo e contribuem para a regeneração da natureza. Esse ciclo refere-se, principalmente aos produtos consumidos, como os alimentos. Ainda assim, alguns outros materiais, como algodão e madeira, se degradados de tal modo que impossibilita sua utilização para a fabricação de novos produtos, podem passar do ciclo técnico para o ciclo biológico. Já o lado direito do diagrama representa o ciclo técnico, tratando dos produtos que são utilizados em vez de consumidos. Cada etapa desse ciclo possibilita a permanência dos materiais em uso, em detrimento de se tornarem resíduos (Ellen MacArthur Foundation, 2021).

Figura 14 - Diagrama de borboleta da Economia Circular



Fonte: adaptado de Ellen MacArthur Foundation (2021)

Por meio da análise deste diagrama, é possível verificar que a economia circular é orientada segundo três princípios. No primeiro princípio, objetiva-se a preservação e o aprimoramento do capital natural, mediante o controle de estoques finitos e o equilíbrio dos fluxos de recursos renováveis. Isto incluiu a desmaterialização dos produtos e serviços e a virtualização das entregas. Quando há a necessidade da presença de recursos, busca-se a seleção de tecnologias e processos que façam uso de recursos renováveis ou que apresentem melhor desempenho. No aprimoramento do capital natural, uma economia circular incentiva os fluxos de nutrientes dentro do sistema e gera as condições necessárias para a regeneração do recurso natural (Ellen MacArthur Foundation, 2015).

O segundo princípio da economia circular tem como propósito a otimização do rendimento dos recursos, de modo que o fluxo de produtos, componentes e materiais ocorra nos ciclos técnico e biológico no mais alto nível de utilidade todo o tempo. Sob o ponto de vista dos materiais técnicos, essa diretriz orienta os projetos para as tecnologias de reciclagem e remanufatura, além de estimular a reutilização, a manutenção (isto é, o prolongamento da vida útil) e o compartilhamento de bens, a fim de que os componentes e materiais técnicos permaneçam em circulação. Sempre que possível, os sistemas circulares têm preferência pelo uso de círculos mais internos

no diagrama, pois preservam mais energia e outros tipos de valor intrínsecos aos materiais e componentes. Os sistemas também maximizam a quantidade de ciclos consecutivos e/ou o tempo atribuído a cada ciclo, de modo a ampliar a vida útil dos produtos e aumentar a sua reutilização. Do ponto de vista dos materiais biológicos, os sistemas circulares incentivam a reinserção de nutrientes biológicos na bioesfera como insumos para um novo ciclo. No ciclo biológico, os produtos são projetados com o objetivo de serem consumidos ou metabolizados pela economia e regeneram o valor do novo recurso. Desta forma, o aproveitamento em cascata de produtos e materiais biológicos em outras aplicações estimula a geração de valor desses materiais (Ellen MacArthur Foundation, 2015).

O terceiro princípio da economia circular tem como objetivo incentivar a efetividade do sistema ao revelar e excluir as externalidades ao longo de todo o processo produtivo. Essa diretriz propõe reduzir os danos aos sistemas e a áreas como alimentos, mobilidade, habitação, educação, saúde e entretenimento, além de realizar o gerenciamento das externalidades, como a utilização de recursos (solo, ar e água), poluição sonora e a liberação de substâncias tóxicas (Ellen MacArthur Foundation, 2015).

A Confederação Nacional da Indústria (CNI, 2018) propõe, ainda, os seguintes modelos de economia circular: produto como serviço, compartilhamento, insumos circulares, recuperação de recursos, extensão da vida do produto e virtualização.

No sistema de produto-serviço, o valor ofertado ao cliente consiste na função e nos serviços advindos do uso do produto. Os serviços podem ser oferecidos juntamente com o produto por meio de contrato de locação ou oferta de soluções (CNI, 2018).

No modelo de compartilhamento, as organizações objetivam ampliar a eficiência do uso de recursos já empregados na produção de um bem pelo aumento da sua utilização. Para isto, recorrem ao compartilhamento do uso, acesso e propriedade (CNI, 2018). Este modelo de negócios permite o compartilhamento de produtos e serviços por meio de um intermediário sem que ocorra a transferência da sua propriedade (Schlagwein, Schoder e Spindeldreher, 2020).

O modelo de negócios de insumos circulares consiste na utilização de matérias-primas passíveis de restauração, isto é, materiais reciclados, recondicionados, remanufaturados ou não contaminados ou, ainda, renováveis (CNI, 2018).

Já no modelo de recuperação de recursos, as organizações buscam recuperar valor e função dos produtos, componentes e materiais, reduzindo o consumo de capital natural e o desperdício de recursos. Abrange os processos de ciclo reverso como remanufatura e reciclagem. No modelo de extensão da vida do produto, o objetivo é ampliar a vida útil do bem, gerando maior valor do uso de recursos e materiais. Por sua vez, o modelo de virtualização tem como proposta a substituição da infraestrutura e ativos físicos por serviços digitais em um processo de desmaterialização dos produtos, reduzindo, desta forma, o consumo de recursos naturais (CNI, 2018).

Com o objetivo de reter recursos valiosos, regenerar ou ao menos não causar danos aos sistemas vivos, e ainda equilibrar as necessidades humanas com as limitações do Planeta, organizações progressistas têm adotado abordagens circulares em suas práticas empresariais. O Fórum Econômico Mundial (FEM), a União Europeia e a China estão pesquisando e impulsionando a economia circular no mundo (Weetman, 2019).

No ano de 2014, o Fórum Econômico Mundial, apoiado pelas pesquisas da organização Ellen MacArthur Foundation e da empresa de consultoria em gestão McKinsey, lançaram uma iniciativa conhecida como “Projeto MainStream” para promoção da economia circular. O projeto contou com a liderança de presidentes de nove empresa globais e tinha como objetivos analisar os impasses sistêmicos em fluxos de materiais globais grandes ou complexos demais para erem transpostos isoladamente por organizações, cidades ou governos, além de verificar os capacitadores da economia circular, como as tecnologias digitais (Weetman, 2019).

Em dezembro de 2015, a União Europeia lançou um plano de ação de economia circular conhecido como “Fechando o Loop”, defendendo a transição para uma economia mais circular como fator fundamental para uma economia sustentável, de baixo carbono e eficiente em recursos (Weetman, 2019).

Dentre os países que pesquisam o tema, Weetman (2019) destaca a China, e relata que a promoção da economia circular no país consiste em distinguir o crescimento econômico do consumo de recursos e da emissão de poluentes. A primeira fase da economia circular da China iniciou no ano de 1998 mediante a publicação de estudos acadêmicos de referência. A segunda fase incluiu investimentos em produção limpa e parques ecoindustriais com o suporte de um órgão

público de proteção ambiental em crescimento. A terceira fase teve início no ano de 2006 com o reconhecimento da economia circular como modelo de desenvolvimento alternativo (Weetman, 2019).

3.4.2 Evolução da economia circular: escolas de pensamento

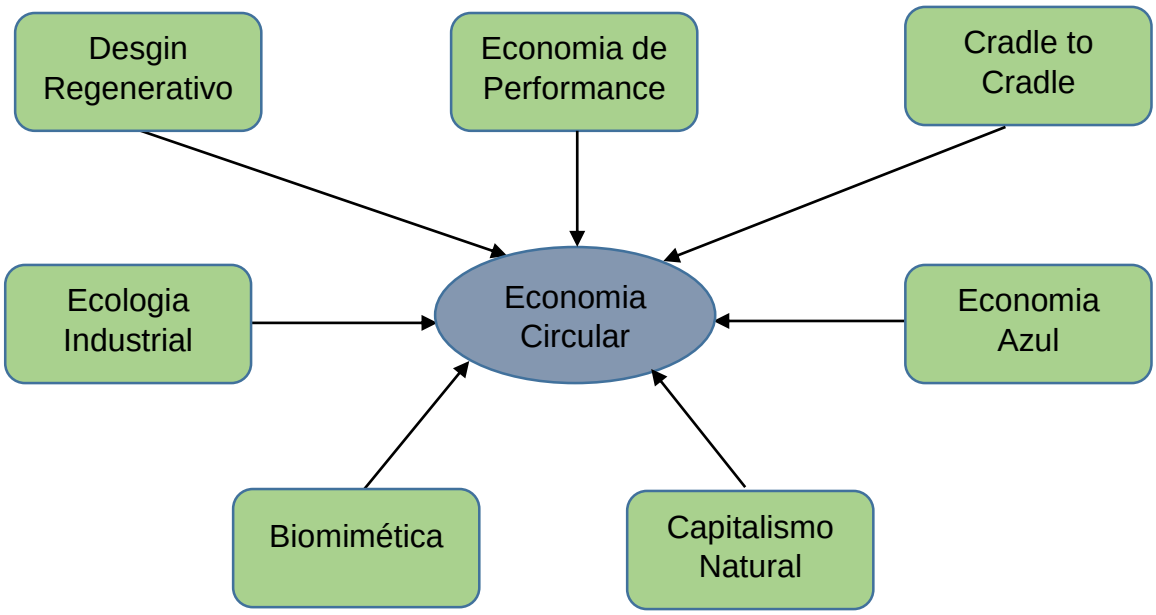
A economia circular não tem como origem apenas uma data ou autor. Ainda assim, observa-se que a partir do final da década de 1970, suas aplicações para os sistemas econômicos e processos industriais receberam uma nova dinâmica com a liderança de um pequeno grupo de pesquisadores, intelectuais e organizações (Ellen MacArthur Foundation, 2017b).

No final do século XX, novos conceitos passaram a ser desenvolvidos com o objetivo de geração de modelos de negócios sustentáveis (Weetman, 2019) e, ao longo dos anos, o conceito de economia circular vem sendo aprimorado por diversas escolas de pensamento (Ellen MacArthur Foundation, 2017b).

Dentre as principais influências, destacam-se o Design Regenerativo de John T. Lyle, a Economia de Performance de Walter Stahel, a filosofia Cradle to Cradle (C2C – ou, do berço ao berço, na língua portuguesa), de William McDonough e Michael Braungart, a Ecologia Industrial de Reid Lifset e Thomas Graedel, a abordagem da Biomimética de Janine M. Benyus, o Capitalismo Natural de Amory e Hunter Lovins e Paul Hawken, além da filosofia da Economia Azul de Gunter Pauli.

A Figura 15 apresenta uma síntese das influências e bases que contribuíram para o desenvolvimento da Economia Circular.

Figura 15 - Influências históricas e bases para a economia circular



Fonte: elaboração própria (2022)

a) Design Regenerativo

John T. Lyle iniciou nos Estados Unidos o desenvolvimento de ideias de design regenerativo aplicados a todos os sistemas, o que superava o conceito de regeneração que havia sido concebido até então (isto é, aplicável apenas à agricultura). Seu trabalho definiu as bases da economia circular, as quais foram desenvolvidas e se tornaram notórias por meio das atuações de William McDonough, Michael Braungart e Walter Stahel (Ellen MacArthur Foundation, 2023).

Para o design regenerativo, os ecossistemas naturais atuam como inspiração para o funcionamento das infraestruturas e sistemas humanos (Zalewska, 2021).

b) Economia de Performance (Economia do Desempenho ou Economia de Serviços).

Weetman (2019) relata que o objetivo da filosofia da Escola de Performance é alcançado a partir da união de design sistêmico, inovação técnica e comercial, especialmente na esfera de economias regionais, tendo como base a criação de modelos de negócios de recomercialização de produtos (isto é, reutilização) e ampliação do ciclo de vida de produtos e componentes (por exemplo, por meio da remanufatura e atualização).

Em seu relatório para a Comissão Europeia “O potencial de substituir mão-de-obra por energia” (em tradução livre do inglês), no ano de 1976, o arquiteto e economista Walter Stahel apresentou, em coautoria com Genevieve Reday, o conceito de uma economia em ciclos e o seu impacto na geração de empregos, competitividade econômica e prevenção de desperdícios. O pesquisador, conhecido por ter criado o termo “Cradle to Cradle” no final de 1970, desenvolveu uma abordagem de “ciclo fechado” para processos produtivos e fundou o *Product Life Institute* em Genebra. Esta instituição busca desenvolver a extensão da vida dos produtos, promover atividades de recondicionamento e prevenir desperdícios, além de defender a venda de serviços e não de produtos, em uma abordagem conhecida como “economia de serviço funcional” atualmente inserida no conceito de “economia de performance” (Ellen MacArthur Foundation, 2023).

Stahel analisa a economia circular como um “framework”, isto é, um conceito genérico baseado em diversas abordagens mais específicas que orbitam ao redor de uma rede de princípios básicos (Ellen MacArthur Foundation, 2023).

c) Cradle to Cradle (Do berço a berço)

O conceito Cradle to Cradle continuou sendo desenvolvido pelo químico alemão Michael Braungart e o arquiteto americano William McDonough. Nesta abordagem, os materiais envolvidos nos processos industriais e comerciais são analisados como nutrientes, os quais podem ser de dois tipos, a saber: técnicos e biológicos. Os processos produtivos do “metabolismo biológico” da natureza são analisados como um modelo para a elaboração de um fluxo de “metabolismo técnico” dos materiais industriais (Ellen MacArthur Foundation, 2017b).

Esta filosofia prevê que o design dos componentes de um produto pode ser desenvolvido de modo a proporcionar a recuperação continua e reutilização dos nutrientes biológicos e técnicos nestes metabolismos. Desta forma, o conceito de resíduo é eliminado, uma vez que que os produtos e materiais são projetados com ciclos de vida seguros à saúde humana e ao meio ambiente, sendo possível a sua reutilização constante por meio de metabolismos biológicos e técnicos (Ellen MacArthur Foundation, 2017b).

d) Ecologia industrial

A abordagem da ecologia industrial propõe o desenvolvimento de processos de ciclo fechado nos quais os resíduos de um processo atuam como insumos para outro, em uma configuração de ecossistema industrial que elimina o conceito de subprodutos indesejáveis. Neste *framework*, os processos produtivos são projetados de modo a se assemelharem ao máximo aos sistemas vivos, respeitando as restrições ecológicas locais e verificando o seu impacto global desde o início. Devido ao seu caráter interdisciplinar, esta filosofia é usualmente conhecida como a "ciência da sustentabilidade" e possui a restauração do capital natural e a promoção do bem-estar social como importantes características, podendo ser aplicada também ao setor de serviços (Ellen MacArthur Foundation, 2023).

A ecologia industrial se ocupa do design de produtos e dos processos de produção mediante a compreensão das limitações relacionadas à capacidade de suporte do planeta e à resiliência ecológica. Por meio desta abordagem, os processos ambientais e de tomada de decisão são analisados sob uma perspectiva sistêmica. Neste contexto, os sistemas económicos são analisados em conjunto com o seu entorno, e não isoladamente (Lifset e Graedel, 2002).

Em uma analogia com as cadeias alimentares de origem natural, em que uma espécie se alimenta de resíduos ou organismos de outra espécie, nos sistemas industriais é possível conceber a valorização dos resíduos entre empresas ou entes econômicos, consistindo em uma estrutura em que os resíduos e subprodutos de um podem ser recuperados e utilizados como recursos por outro (Erkman, 2001).

e) Biomimética

A biomimética, introduzida por Janine Benuys, utiliza a natureza como fonte de inovação. Nesta filosofia, a natureza é compreendida como modelo de solução dos problemas dos seres humanos. Também é analisada como medida, uma vez que padrões ecológicos são utilizados para avaliar a sustentabilidade das inovações. A natureza possui ainda a característica de mentora, visto que pode ser compreendida com base nos ensinamentos que pode agregar aos humanos, e não no potencial que estes podem retirar de recursos naturais (Ellen MacArthur Foundation, 2017b).

f) Capitalismo Natural

No livro Natural *Capitalism: Creating the next Industrial Revolution*, publicado no ano de 1999, seus autores, Paul Hawken, Amory B. Lovins e L. Hunter Lovins, ilustram uma nova revolução industrial em que as organizações conciliam a otimização dos lucros e o enfrentamento dos problemas ambientais. O capital natural engloba os recursos naturais e os sistemas ecológicos, desenvolvendo serviços essenciais de suporte à vida e aos seres vivos que dificilmente poderiam ser substituídos, como os serviços de polinização realizados por abelhas e borboletas (Weetman, 2019).

g) Blue Economy (Economia Azul)

A filosofia da Economia Azul teve como origem um movimento *open source* que convergiu uma série de estudos de casos que foram entregues ao Clube de Roma em um relatório homônimo (Ellen MacArthur Foundation, 2017b).

Em seu livro, *Blue Eco*nomy, publicado no ano de 2015, Gunter Pauli propõe soluções baseadas nos conceitos da física, por meio da utilização de sistemas naturais de nutrientes, matéria e energia como modelo ideal, nos quais não há geração de resíduos e qualquer subproduto pode ser fonte para um novo produto (Weetman, 2019).

3.4.3 Componentes básicos da economia circular

Ellen MacArthur Foundation (2017b) define quatro eixos fundamentais na construção da economia circular descritos a seguir: design de economia circular; novos modelos de negócios; ciclos reversos; e condições viabilizadoras e condições sistêmicas favoráveis.

a) Design de economia circular

No projeto de seus produtos e processos, é fundamental que as organizações desenvolvam competências de design circular com vistas a favorecer o reúso, a reciclagem e o aproveitamento de produtos em diversos ciclos. Para isto, é importante que a empresa enfatize áreas fundamentais para o design circular, como: a seleção de materiais; a padronização dos componentes; um projeto que promova a

durabilidade dos produtos; um design que propicie a separação ou o reúso de produto e materiais; e critérios de produção que contemplem possíveis aplicações de coprodutos e resíduos (Ellen MacArthur Foundation, 2017b).

b) Novos modelos de negócios

Na transição para uma economia circular, são necessários novos modelos de negócios para substituírem os anteriores ou auxiliarem no aproveitamento de novas oportunidades. Organizações com elevada participação no mercado ou com presença em variadas etapas verticais da cadeia de valor linear podem ser importantes na promoção da circularidade devido à escala e integração vertical que apresentam. (Ellen MacArthur Foundation, 2017b).

c) Ciclos reversos

Para possibilitar o aproveitamento em múltiplos ciclos e o retorno de materiais ao solo ou ao processo industrial, a gestão da cadeia logística é fundamental, o que inclui as fases de separação e armazenamento, e, também, operações de gestão de risco e geração de energia, além da compreensão de biologia molecular e química orgânica de polímeros (Ellen MacArthur Foundation, 2017b).

d) Condições viabilizadoras e condições sistêmicas favoráveis

Abordagens como *Design for Recycling* and *Design for Remanufacturing* favorecem o fechamento de ciclos de materiais. Masanet and Horvat (2007) descrevem que o *Design for Recycling* tem como objetivo selecionar os atributos de projeto que permitem que o produto seja reciclado de maneira econômica. Hatcher, Ijomah e Windmill (2011) relatam que a abordagem de *Design for Remanufacturing* pode aumentar a eficiência do processo de remanufatura ampliando sua viabilidade e lucratividade.

Para incentivar o reúso de materiais e o aumento da produtividade de recursos, é fundamental a atuação dos instrumentos de mercado, com o suporte de políticas públicas, academias e formadores de opinião. As seguintes condições são necessárias para viabilizar este cenário: colaboração; revisão de incentivos; desenvolvimento de regras ambientais internacionais apropriadas; liderança por

exemplo enfatizando escala e agilidade; e disponibilidade de financiamento (Ellen MacArthur Foundation, 2017b).

O aumento do rigor da legislação ambiental também se apresenta como um importante impulsionador das condições necessárias ao desenvolvimento das práticas de economia circular.

Como exemplo, observa-se que a Diretiva (UE) 2018/851 publicada em 30 de maio de 2018 pelo Parlamento Europeu e o Conselho da União Europeia destacou que a gestão de resíduos deve ser aperfeiçoada e transformada em gestão sustentável dos materiais (European Union, 2018), em uma abordagem de atuação mais alinhada ao enfrentamento das demandas sociais e ambientais da atualidade.

Por meio deste novo entendimento, a Diretiva busca possibilitar a proteção, preservação e melhoria da qualidade do ambiente, a proteção da saúde humana, a garantia da utilização eficiente e racional dos recursos naturais, a promoção dos princípios da economia circular, o incentivo à utilização de energia renovável, o aumento da eficiência energética, a redução da dependência de recursos importados, a possibilidade de novas oportunidades econômicas e a contribuição para a competividade a longo prazo (European Union, 2018),

A Diretiva incentiva, ainda, a melhoria da eficiência da utilização dos recursos e a garantia de reconhecimento dos resíduos como recursos que podem contribuir para a redução da dependência dos países da importação de insumos e para a transição para uma gestão de materiais mais sustentável e para um modelo de economia circular.

Neste contexto, o referido documento estimula o fomento a modelos de produção e consumo sustentáveis. Também incentiva o design, a produção e o uso de produtos que utilizem recursos de forma mais eficiente e tenham maior durabilidade (em relação ao tempo de vida útil e na ausência de obsolescência programada), além de serem reparáveis, realizáveis e atualizáveis (European Union, 2018).

Ainda sob a perspectiva da prevenção de resíduos, a Diretiva preconiza o incentivo à reutilização de produtos e ao desenvolvimento de sistemas de reparação e reutilização, principalmente de equipamentos eletroeletrônicos, têxteis e mobiliários, além de embalagens e produtos e materiais de construção, No âmbito dos têxteis, a Diretiva determinou que os Estados-Membros estabeleçam a coleta seletiva destes

materiais até a data de 01 de janeiro de 2025, de forma a promover a sua reutilização e reciclagem (European Union, 2018).

Em meio à busca por modelos mais sustentáveis de produção e consumo, é importante observar que as estratégias de economia circular possuem limites que as tornam restritivas e aplicáveis a determinadas condições. No caso das estratégias de reciclagem, por exemplo, não é possível proceder a coleta de todos os materiais descartados, por motivos como deficiência nas estruturas físicas de logística reversa de resíduos ou inviabilidade econômica para o seu recolhimento.

Além da impossibilidade de coletar e reunir todos os materiais descartados, nem todos aqueles coletados são recicláveis e, portanto, não é possível reciclar todos os materiais descartados. Do ponto de vista econômico, os custos tendem a ser crescentes à medida que o volume de reciclagem aumenta. Além disso, a cada ciclo de processamento, a eficiência de reciclagem diminui, uma vez que o estoque de matéria vai sendo consumido e a demanda por energia vai aumentando.

Observa-se, ainda, que a reciclagem possibilita o prolongamento da vida útil dos materiais que compões os produtos, mas não impede o seu descarte em algum momento, e consequentemente, não evita o consumo dos recursos naturais necessários à sua produção.

Essa compreensão das limitações intrínsecas aos modelos circulares estende-se às demais estratégias de economia circular. A remanufatura, por exemplo, trata de um alongamento da vida útil do produto, o qual será descartado em algum momento. Na estratégia de reúso, também, a vida útil do produto se finda e o mesmo segue para descarte. O reaproveitamento de resíduos como matéria-prima para novos ciclos de produção também não se dá na sua totalidade, gerando materiais para descarte.

Desta forma, é possível verificar que as estratégias de economia circular são benéficas, mas tendem a não ser suficientes, uma vez que os recursos naturais ainda serão consumidos, dada às elevadas escalas de produção, consumo e descarte.

3.5 DIAGNÓSTICO INICIAL DOS VOLUMES DE PRODUÇÃO NOS SEGMENTOS ANALISADOS

O Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2021 emitido pela Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE) aponta para o aumento da geração de resíduos sólidos urbanos (RSU) no país no ano de 2020 motivado pelas novas dinâmicas sociais que se estabeleceram durante a pandemia da Covid-19. A geração de RSU alcançou um total de aproximadamente 82,5 milhões de toneladas geradas ou 225.965 toneladas/dia, o que representa a geração média de 1,07 kg/dia de resíduos por brasileiro (ABRELPE, 2021).

Já em seu Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2023, a referida associação, agora denominada Associação Brasileira de Resíduos e Meio Ambiente (ABREMA) apresenta a estimativa de geração aproximada de 77,1 milhões de toneladas de RSU no Brasil em 2022, o equivalente a, aproximadamente, 380 kg/habitante/ano ou 1,04 kg de resíduos por brasileiro (ABREMA, 2023).

Desta forma, a geração de RSU em 2022 apresentou um recuo de 2% em relação ao ano de 2021, que pode ser ter sido motivado pela diminuição do poder de compra dos indivíduos e pela mudança dos hábitos de compra ao fim do isolamento social motivado pela pandemia de Covid-19 (quando ocorreu a migração de parte do consumo de alimentos em domicílio para as ruas, diminuindo a demanda por embalagens e a geração de resíduos domiciliares, objeto das projeções da associação em questão) (ABREMA, 2023).

Do total de RSU gerados em 2022, estima-se que 93% tenham sido coletados de modo adequado. Em termos de coleta seletiva porta a porta, a média populacional urbana atendida, por município, alcançou somente 14,7% dos habitantes (ABREMA, 2023).

Quando se fala na expressiva geração de resíduos, as indústrias têxtil e de vestuário, assim como a de equipamentos eletroeletrônicos apresentam uma intensa participação. Estes segmentos da economia reproduzem o modelo linear baseado em produção, consumo e descarte, contribuindo para o agravamento dos impactos gerados ao meio ambiente.

Dados da organização United Nations (2019) descrevem que a indústria da moda é a segunda maior poluente do mundo, e que o seu quantitativo de emissões de carbono é superior à soma de todos os voos internacionais e embarques marítimos.

Somente no Brasil foram produzidas aproximadamente 9 bilhões de peças têxteis no ano de 2018, o equivalente a 40 peças por habitante. A produção brasileira de fibras têxteis aumentou cerca de aproximadamente 33% em uma década, passando de aproximadamente 2,260 milhões de toneladas de fibras têxteis no ano de 2008 para cerca de 3,014 milhões de toneladas no ano de 2018. O algodão pluma e o poliéster foram as principais fibras produzidas em 2018, com volumes aproximados de produção de 2,778 milhões de toneladas e 159 mil toneladas (Modefica, FGVces e Regenerate, 2020).

Dados preliminares de um levantamento realizado pela ABRELPE indicam que roupas velhas, retalhos de tecidos e peças de couro constituem o montante de mais de 4 milhões de toneladas de resíduos têxteis descartados anualmente no Brasil. Este volume corresponde a aproximadamente 5% do total de resíduos gerados no país (CNN, 2022).

Além da indústria têxtil, o segmento de produtos eletroeletrônicos apresenta-se como mais um exemplo dos excessivos níveis de produção e consumo de bens na sociedade moderna.

O Brasil é a nação com a maior geração de resíduos eletrônicos na América Latina, apresentando um montante de 2,143 milhões de toneladas no ano de 2019, o que representa uma geração de 10,2 kg por habitante. O país é o quinto maior produtor mundial de resíduos eletrônicos, atrás apenas da China (10,129 milhões de toneladas), EUA (6,918 milhões de toneladas), Índia (3,230 milhões de toneladas) e Japão (2,569 milhões de toneladas) (Forti *et al*., 2020).

A China, que durante décadas foi o maior receptor de resíduos para tratamento no mundo, fechou suas fronteiras de forma definitiva ao recebimento de resíduos no início de 2021, com vistas à proteção da saúde e do meio ambiente (Liy, 2020).

Informações reunidas pelas Nações Unidas no relatório *The Global E-waste Monitor 2020: Quantities, flows and the circular economy potential* apresentam que 53,6 milhões de toneladas de resíduos eletrônicos foram gerados em todo o planeta no ano de 2019, o que representa uma média de 7,3 Kg por habitante. Deste

montante, somente 17,4% (9,3 milhões de toneladas) foram oficialmente notificados como devidamente coletados e reciclados (Forti *et al*., 2020).

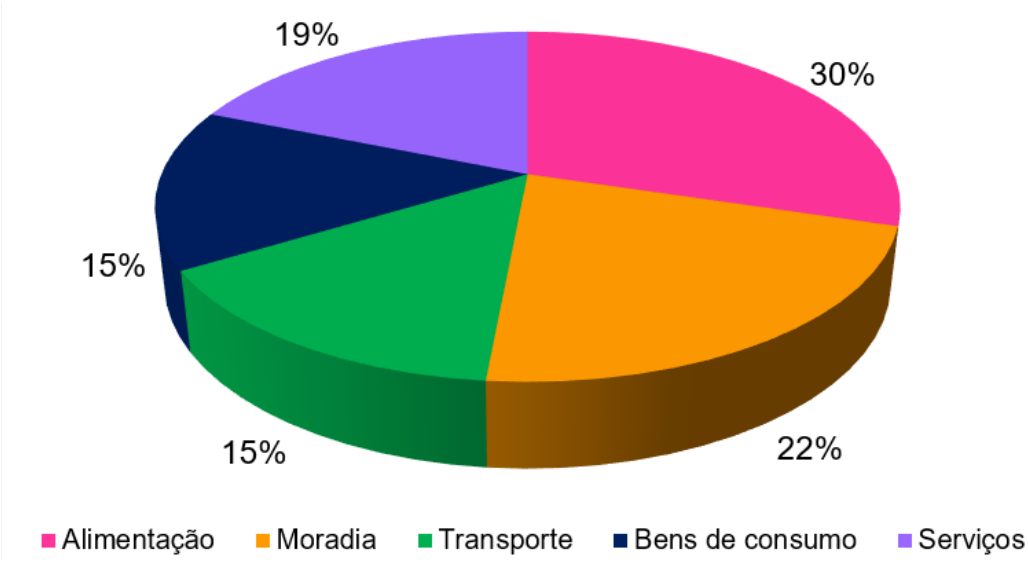
A geração global de resíduos eletrônicos apresentou um crescimento de 9,2 milhões de toneladas desde 2014 e há projeções de alcance de 74,7 milhões de toneladas até 2030, quase duplicando a geração em dezesseis anos. Por outro lado, a quantidade de resíduos eletrônicos reciclados neste mesmo período expressou um aumento de 1,8 milhão de toneladas, demonstrando que as atividades de reciclagem não estão acompanhando o crescimento global dos resíduos eletrônicos (Forti *et al*., 2020).

Os baixos volumes de reciclagem de resíduos equipamentos eletrônicos apresentam potenciais riscos à saúde humana e ao meio ambiente. A presença de diversos elementos químicos perigosos, principalmente metais pesados, pode ocasionar a contaminação de recursos hídricos e do solo.

A categoria de bens de consumo, à qual pertencem os produtos têxteis (sendo estes, bens de consumo não duráveis) e os equipamentos eletroeletrônicos (os quais são bens de consumo duráveis), concentra 15% da pegada ecológica total, de acordo com a Figura 16, representando uma elevada contribuição no cenário global.

As demais atividades que totalizam a pegada ecológica da humanidade estão distribuídas entre as categorias de alimentação, moradia (que corresponde ao ambiente construído), transporte e serviços prestados.

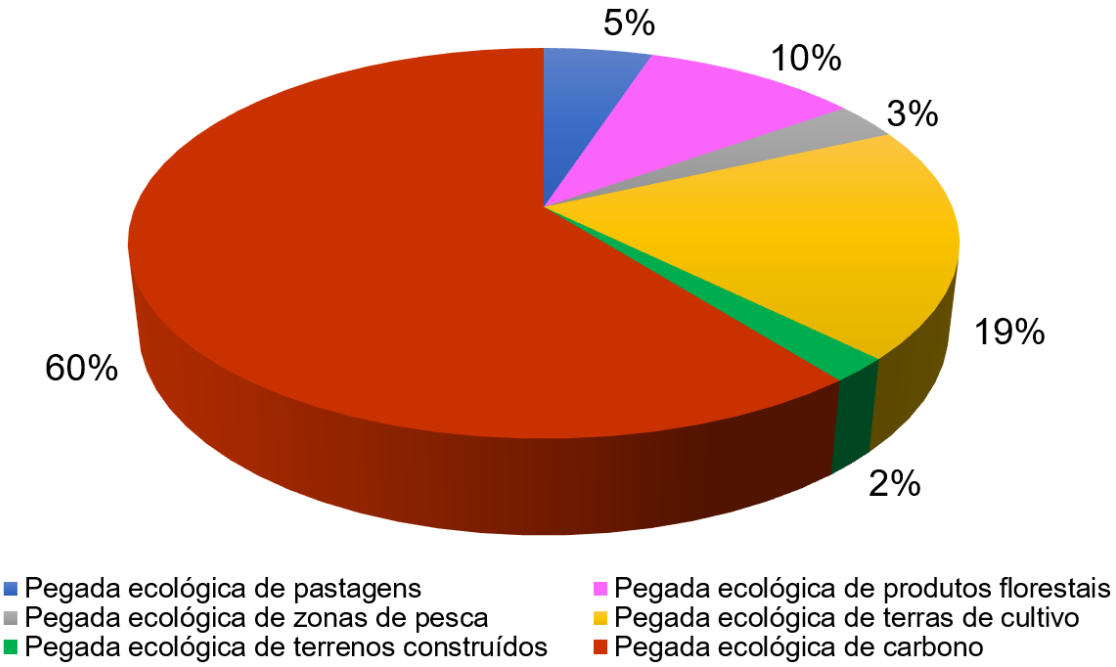
Figura 16 - Pegada ecológica da humanidade por atividades



Fonte: Adaptado de WWF (2022)

Já a Figura 17 apresenta a pegada ecológica de uso da terra da população global. É possível verificar que a maior contribuição da pegada ecológica mundial (isto é, 60%) é proveniente das emissões de carbono, demonstrando a relevância do estudo de alternativas ao modelo atual de produção e consumo.

Figura 17 - Pegada ecológica de uso da terra da população global



Fonte: Adaptado de WWF (2022)

A pegada de terra de pastagem calcula a demanda por áreas de pastagem para a criação de gado para fins de produção de carne, laticínios, couro e artigos de lã. A pegada de produtos florestais representa a demanda por florestas para o fornecimento de madeira combustível, celulose e subprodutos da madeira. A pegada dos produtos pesqueiros estima a demanda de ecossistemas marinhos e de águas interiores que são necessários a fim de recompor os frutos do mar extraídos e estimular a aquicultura. A pegada de terras agrícolas mede a demanda por terras para alimentos, fibras, ração para gado, oleaginosas e borracha. A ocupação de áreas construídas avalia a demanda por terrenos que apresentem produtividade biológica e infraestrutura, abrangendo estradas, habitação e instalações industriais. Por fim, a pegada de carbono calcula as emissões de carbono provenientes da combustão de materiais fósseis e da fabricação de cimento. Tais emissões são medidas em termos de áreas florestais necessárias para a captura das emissões não absorvidas pelos oceanos (WWF, 2022).

4 TÊXTEIS E VESTUÁRIO

Nesta seção é realizada uma caracterização do setor têxtil e de vestuário, abordando dados econômicos e de mercado. Também é apresentado um panorama acerca dos artigos publicados no tema. Ademais, são analisados dados relativos à produção e ao consumo de produtos têxteis e de vestuário, bem como à geração de seus resíduos, além das taxas de reciclagem de fibras têxteis. Por fim, são discutidos os desenvolvimentos da economia circular identificados na indústria em questão.

4.1 VISÃO GERAL E ESTRUTURA DO SETOR

Os materiais têxteis ou vestuários apresentam um relevante papel na vida humana e no processo civilizatório, desde a era pré-histórica até a idade moderna. Antes restrita a funções básicas e estéticas, a roupa assume papéis de proteção do corpo humano contra efeitos nocivos, além de sinalizar identidades humanas, profissões, riqueza e poder (Bennie *et al*., 2010; Farhana *et al*., 2015; Tandon e Reddy, 2003 *apud* Farhana *et al*., 2022).

O segmento de roupas apresenta-se como uma indústria global de US$ 1,3 trilhão que emprega mais de 300 milhões de pessoas, segundo dados da empresa de pesquisa de mercado *Euromonitor International Apparel & Footwear*, edição 2016, divulgados por Ellen MacArthur Foundation (2017a). No entanto, o sistema de produção e utilização de peças predominantemente linear em que se baseia gera impactos não somente ambientais como, também econômicos. A subutilização de roupas e a ausência de reciclagem resultam na perda de mais de US$ 500 bilhões anualmente (Ellen MacArthur Foundation, 2017a).

A indústria têxtil e de vestuário contribui de forma significativa para o agravamento dos problemas ambientais que a humanidade vem vivenciando. As ondas de tendências de moda cada vez mais curtas associadas, muitas vezes, a estratégias de venda baseadas em produtos de qualidade inferior a preços mais baixos, resultam no aumento do volume de roupas consumidas em todo o planeta.

O modelo de negócios que predomina no segmento é aquele conhecido como “fast fashion”, em que os consumidores adquirem a preços baixos coleções que são substituídas continuamente e são estimulados a comprar e descartar as peças com

frequência. Para muitos especialistas, incluindo a Organização das Nações Unidas (ONU), esta tendência é responsável pela geração de diversos impactos negativos sociais, econômicos e ambientais, sendo, portanto, fundamental assegurar a produção ética e sustentável das peças de roupas (United Nations, 2019).

A quantidade de roupas produzidas anualmente ultrapassou 100 bilhões pela primeira vez em 2014, o que corresponde a aproximadamente 14 peças por habitante na Terra (McKinsey, 2016).

Dez países concentram o mercado de compras no varejo, a saber: China (com 40 bilhões de unidades), EUA (17 bilhões de unidades), Índia (6 bilhões de unidades), Japão (3,3 bilhões de unidades), Brasil (2,3 bilhões de unidades), Alemanha (2,2 bilhões de unidades), Reino Unido (2,1 bilhões de unidades), Rússia (2 bilhões de unidades), França (1,5 bilhão de unidades), Itália (1,3 bilhão de unidades), enquanto o restante do mundo consumiu 26 bilhões de unidades de vestuário no ano de 2017 (Euromonitor International *apud* Common Objective Co Data, 2018).

Ainda que a China figure como o país com a maior quantidade de roupas vendidas em virtude da sua grande população, um consumidor médio no país gasta pouco menos de um quarto do valor gasto por um consumidor médio nos EUA, e compra 23 unidades a menos por ano (Common Objective Co Data, 2018).

Com a economia mundial recuperando-se da pandemia de Covid-19, as exportações mundiais de roupas no ano de 2021 retornaram ao patamar anterior à crise sanitária, ultrapassando US$ 548,8 bilhões, o que representa um acréscimo de 21,9% em relação ano de 2020. Já as exportações mundiais de têxteis cresceram 7,8% em 2021, alcançando US$ 354,2 bilhões. Comparado ao aumento de 26,5% no comércio mundial de mercadorias em 2021 (o crescimento mais rápido em décadas), o acréscimo mais lento das exportações têxteis é esperado, visto que esse comércio manteve-se em um alto nível em 2020 devido à elevada demanda por equipamentos de proteção individual durante a pandemia (Lu, 2022).

No ano de 2020, indústria têxtil e de confecção brasileira apresentou um faturamento de R$ 161 bilhões e um volume de produção de 1,9 milhão de toneladas. Neste mesmo ano a produção da confecção totalizou 7,93 bilhões de peças (ABIT, 2022; IEMI, 2021).

O Brasil é o quarto maior produtor mundial de denim[9] e malhas, além do quarto maior consumidor mundial de denim. O segmento têxtil brasileiro apresenta a rede produtiva mais completa do ocidente, englobando desde a produção das fibras (com o cultivo de algodão) passando pela fiação, tecelagem, beneficiamento, confecção, varejo e desfiles de moda (Modefica, FGVces e Regenerate, 2020).

A indústria têxtil e de confecção é composta por diversas etapas de produção inter-relacionadas, das quais destacam-se as quatro descritas a seguir, segundo Hiratuka *et al.,* 2008:

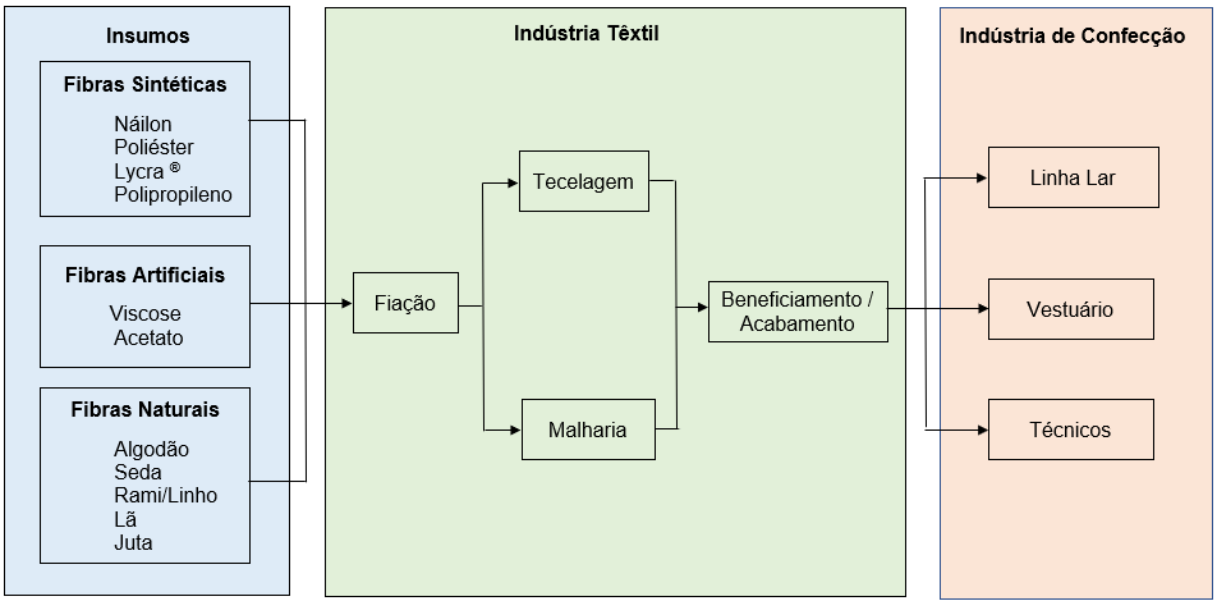
a) fiação: consiste na produção de fios ou filamentos;
b) tecelagem/malharia: refere-se à produção de tecidos planos ou tecidos de malha (malharia) e de tecnologia de não tecidos[10];
c) acabamento/beneficiamento: envolve as operações que proporcionam conforto, durabilidade e propriedades específicas ao produto;
d) confecção: abrange as atividades de desenho, elaboração de moldes, gradeamento, encaixe, corte e costura.

A Figura 18 apresenta a estrutura da cadeia de produção têxtil e de confecção. O processo é iniciado quando as fibras têxteis (sintéticas, artificiais ou naturais) são submetidas ao processo de fiação e, em seguida, encaminhadas à tecelagem ou malharia. Na etapa seguinte, os materiais seguem para o beneficiamento e, por fim, são direcionados à confecção. Nesta fase, os produtos podem ser distribuídos na forma de artigos para o lar (como itens para cama, mesa, banho, decoração e limpeza), vestuário ou para a indústria (como filtros de algodão, componentes para o interior de veículos, embalagens, entre outros) (Hiratuka *et al.,* 2008).

[9] Denim é o nome do tecido fabricado a partir do algodão antes de ser submetido a um processo de tingimento que dará origem à sarja ou ao jeans (Febratex Group, 2019).

[10] O tecido não tecido (conhecido pela sigla TNT) é produzido a partir do polipropileno (gerado a partir do propileno, o qual é obtido no refino do petróleo). Suas fibras são fixadas pela ação do calor, não sendo submetidas aos processos tradicionais de fiação e tecelagem. Encontra aplicação na fabricação de produtos hospitalares, como máscaras e aventais (Linhares, 2023).

Figura 18 - Cadeia Produtiva Têxtil e de Confecção



Fonte: adaptado de Costa e Rocha (2009) e Junior (2021)

Em cada fase da produção da indústria têxtil, aditivos têxteis podem ser adicionados para aprimorar as propriedades físicas, químicas e mecânicas dos tecidos. Os aditivos conferem características como maciez, durabilidade, resistência ao fogo, repelência à água, proteção contra raios ultravioletas, resistência a manchas, entre outras. Incluem amaciantes, agentes antichamas, biocidas, agentes antiestéticos, entre outros materiais (DVG Têxtil, 2024).

Com vistas à adoção de tecnologias mais sustentáveis que contribuam para a redução dos impactos ambientais na indústria têxtil, o mercado de aditivos têxteis vem investindo no desenvolvimento de materiais biodegradáveis e isentos de componentes prejudiciais à saúde e ao meio ambiente (DVG Têxtil, 2024). Como exemplo, tem-se a substituição de retardantes de chama bromados por alternativas mais ecológicas não-bromadas.

A partir da definição de desenvolvimento sustentável, Roos *et al* (2017) observam que o conceito de uma indústria da moda sustentável pode soar como um paradoxo, uma vez que incita ao questionamento acerca de como um segmento orientado para a satisfação de desejos pode atender as necessidades humanas a longo prazo.

Na indústria da moda, o aprimoramento da sustentabilidade passa pela mudança dos hábitos de consumo da população, uma vez que, mesmo indivíduos que

não possuem um determinado bem, passam a almejar a sua posse, estimulados pelo incentivo à compra de produtos novos.

O uso da roupa cumpre funções de variadas necessidades, sendo possível categorizá-las em, pelo menos três níveis. O primeiro nível de necessidade está relacionado à proteção contra elementos climáticos, como o sol e o frio, e também contra ferimentos e escoriações. Em um segundo nível de necessidade, encontra-se a função social da roupa, isto é, a cobertura do corpo. Esconder o corpo é uma necessidade da sociedade, em que cada um escolhe as partes do corpo que deseja mostrar. No terceiro nível, a roupa tem a função de atender aos padrões estéticos vigentes (influenciado, muitas vezes, pelas demandas sociais), além da sua adequação ao uso, isto é, ao tipo de situação. Neste caso o indivíduo espera utilizar a roupa adequada para determinada situação, face aos padrões estéticos estabelecidos. Há, ainda, uma demanda antropológica para a utilização de roupas, representada pelos símbolos que aquela vestimenta expressa.

Roos, *et al*., 2017 corrobora a necessidade do uso da roupa para proteção contra os elementos climáticos, acrescentando que a peça expressa, ainda, uma necessidade humana de comunicação pessoal. Tal necessidade está presente ao longo da história humana, antecedendo o surgimento das atuais preocupações com os impactos ambientais negativos advindos desta indústria. Questões como a utilização excessiva de recursos limitados, a liberação de poluentes e as condições de trabalho desta indústria originam-se a partir das escalas modernas de produção e dos métodos empregados neste setor (Roos, *et al*., 2017).

Roos *et al* (2017) descrevem que a limitação de recursos constitui-se como um desafio para a sustentabilidade da indústria têxtil e de vestuário. Os referidos autores observam que o algodão apresenta-se como um produto altamente intensivo na utilização de água, e citam a estimativa de Pfister, Koehler e Hellweg (2009) de que a produção de 1 quilograma de tecido de algodão requer o consumo de aproximadamente 8,5 toneladas de água.

Desta forma, a produção de algodão encontra uma limitação na disponibilidade de água para irrigação nos países produtores, em uma competição com as plantações para alimentos e forragens (Roos *et al* (2017). A concorrência do cultivo de algodão com a agricultura ocorre não somente pelo uso da água, como também pela utilização

da terra, isto é, áreas disponíveis para plantação. Trata-se, portanto, de um ponto de atenção crítico sob a perspectiva da garantia das seguranças hídrica e alimentar.

Neste sentido, a principal alternativa para atender à demanda por fibras face ao cenário de recursos naturais limitados é a utilização de poliéster fabricado a partir de hidrocarbonetos fósseis (Peter *et al*., 2014 *apud* Roos *et al*., 2017).

Por outro lado, a utilização destas fibras sintéticas conduz a preocupações quanto às emissões de gases de eleito estufa ao longo da cadeia de suprimentos e na situação de queima dos resíduos têxteis gerados, além de preocupações acerca da liberação de microplásticos para o meio ambiente (Eerkes-Medrano *et al*. 2015 *apud* Roos *et al*., 2017).

A etapa de produção dos tecidos também gera relevantes impactos ambientais, devido ao consumo de água, energia e produtos químicos como corantes, alvejante e detergente, e as consequentes emissões para o ar e a água. Há, ainda, emissões para o solo, em função das perdas de materiais ao longo das etapas de produção das roupas, sendo a fase de corte e costura a mais crítica, correspondendo a 25% do total de perdas de fabricação (Modefica, FGVces e Regenerate, 2020).

As condições de trabalho também constituem um desafio para o alcance da sustentabilidade na indústria têxtil e de vestuário. Preocupações com o excesso de jornada, a discriminação de gênero, o trabalho infantil e condições inseguras de trabalho tornaram-se sistêmicas na atualidade, diante da globalização e complexidade das cadeias de suprimentos, o que faz com que as empresas varejistas de vestuário possam ter dificuldade para conhecer com precisão onde são produzidas as peças que comercializam (Roos *et al*., 2017).

4.2 ESFORÇOS DE PESQUISA ACADÊMICA NO DOMÍNIO DA ECONOMIA CIRCULAR

Uma pesquisa foi realizada na base de dados Web of Science com o objetivo de identificar a bibliografia relevante acerca da aplicação da economia circular na indústria têxtil. Os limites de busca utilizados encontram-se descritos no Quadro 5. Ressalta-se que, por observação dos resultados gerados na pesquisa, verificou-se que estes retornaram o termo *textile* tanto no singular quanto no plural (isto é, *textiles*), abrangendo publicações contendo estas variações.

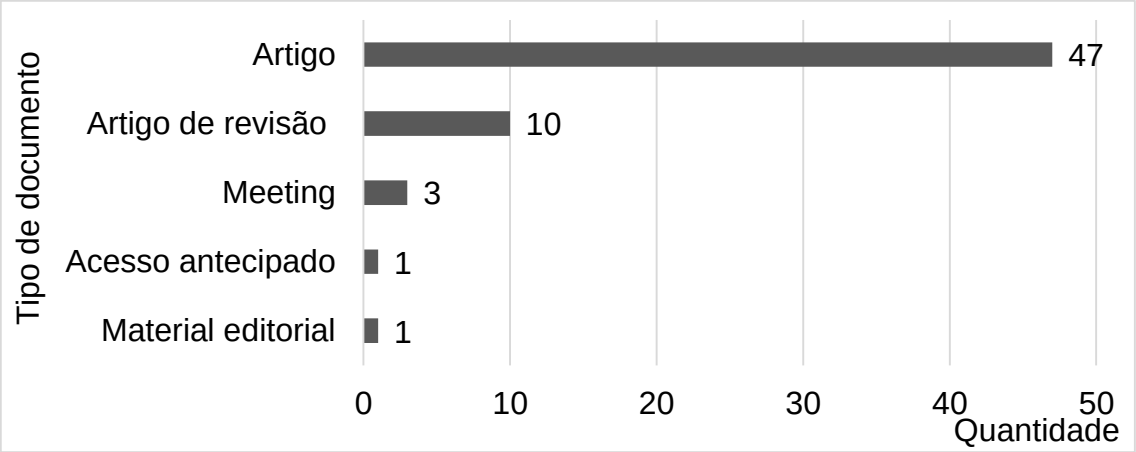
Quadro 5 - Filtros de pesquisa na base Web of Science

Pesquisar em:	All data bases
Coleções:	All
Título:	“circular economy” and textile
Data de publicação:	2018-01-01 até 2022-12-31

Fonte: elaboração própria (2023)

Esta pesquisa retornou 55 resultados, compostos pelos seguintes documentos apresentados na Figura 19.

Figura 19 - Tipos de documentos no período analisado



Fonte: elaboração própria (2023)

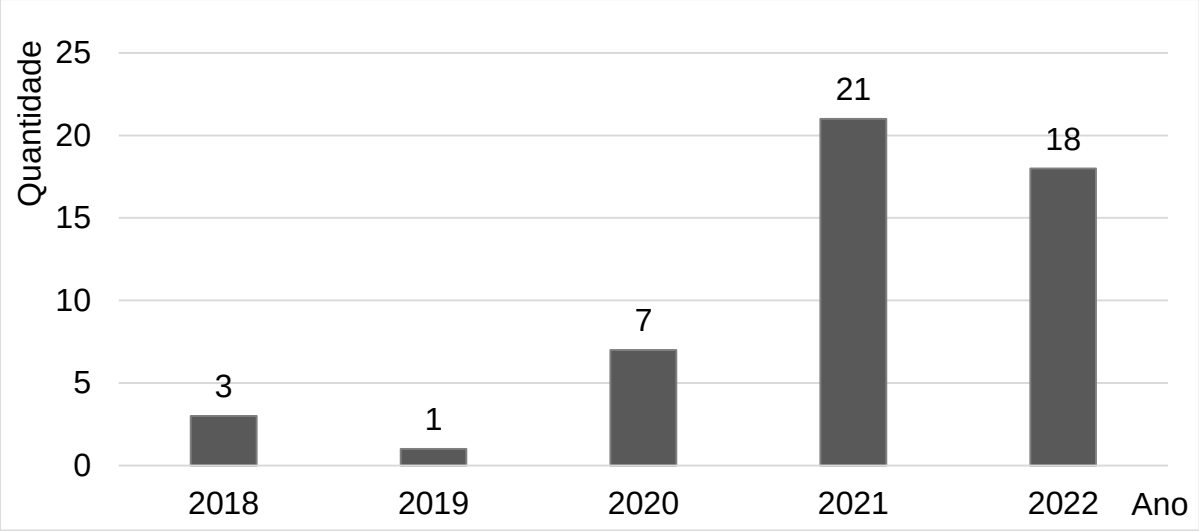
Ao refinar a amostra obtida por tipo de documento, foram selecionados apenas os artigos e artigos de revisão. Desta forma, a pesquisa retornou 50 resultados, dos quais 47 encontram-se na Coleção principal da Web of Science, 2 apresentam-se na SciElo Citation Index, enquanto 1 está alocada na KCI, base de dados de periódicos coreanos.

Uma pesquisa semelhante foi realizada na base de dados Periódicos Capes, retornando 77 artigos publicados no período de 01/01/2018 a 31/12/2022 contendo no título as expressões “circular economy” e textile.

Desta forma, nas condições analisadas, a quantidade de artigos publicados na base Web of Science (isto é, 50 resultados) representa cerca de 64,93 % do total de publicações de artigos totais no Portal Periódicos CAPES (ou seja, 77 resultados), ratificando a ampla abrangência da base de dados selecionada e validando a representatividade da amostra obtida.

A Figura 20 apresenta a distribuição dos 50 artigos publicados ao longo dos cinco anos relacionados à “circular economy” e textile. É possível verificar que o ano de 2021 foi aquele que apresentou maior quantidade de artigos publicados no período (contando com 21 artigos). O ano 2022 apresentou um decréscimo na quantidade de artigos publicados comparados ao ano anterior, possivelmente em virtude dos efeitos negativos produzidos pela pandemia de Covid-19 na sociedade e academia nesse período.

Figura 20 - Quantidade de artigos publicados por ano

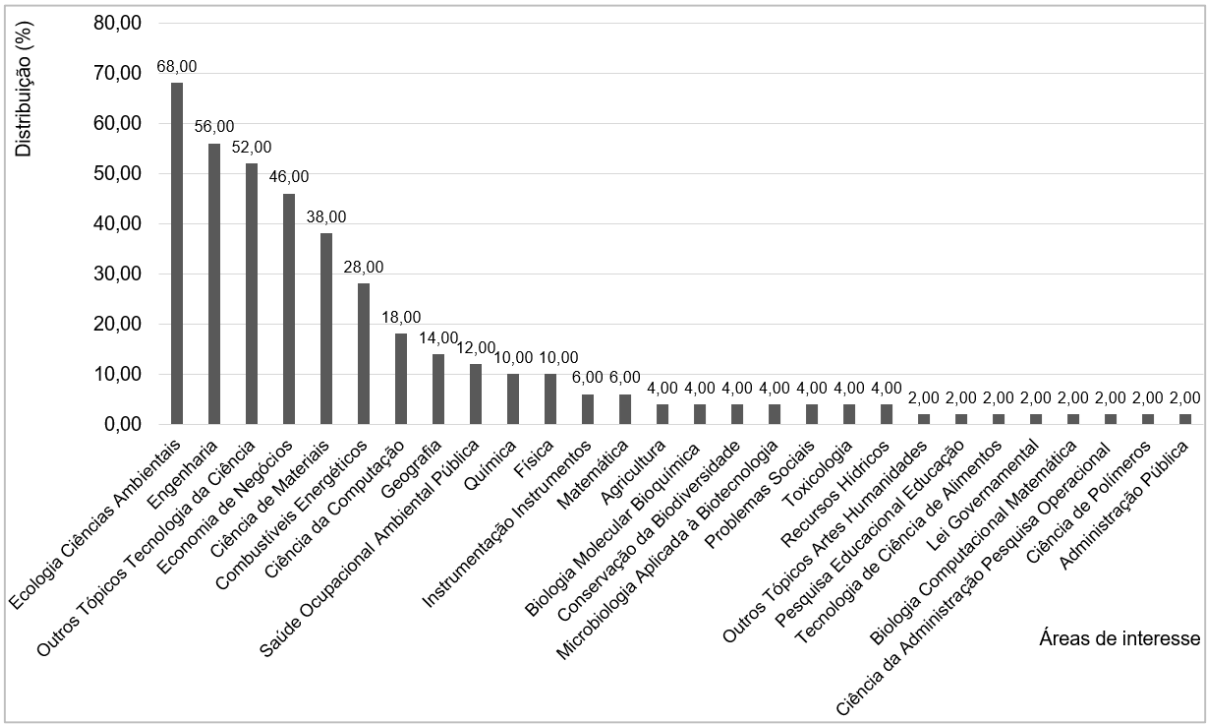


Fonte: elaboração própria (2023)

Corroborando a baixa quantidade de publicações acerca da economia circular identificada na amostra analisada, Majumdar e Sinha (2018) relatam que a indústria de roupas é uma das menos abordadas sob a perspectiva do gerenciamento das cadeias de suprimento verdes.

Ao observar a distribuição dos artigos identificados por área de interesse, por meio da Figura 21, é possível verificar que as áreas que concentram as maiores quantidades de pesquisas sobre economia circular no tema dos têxteis são as seguintes: ecologia / ciências ambientais (68,0% das publicações), engenharia (56,0% das publicações), outros tópicos de tecnologia da ciência (52,0% das publicações), economia de negócios (46,0% das publicações), ciência dos materiais (38,0%), combustíveis energéticos (28,0%), ciência da computação (18,0%), geografia (14,0%), saúde ocupacional ambiental pública (12,0%), química (10,0%) e física (10,0%).

Figura 21 - Distribuição percentual dos artigos publicados por área de interesse

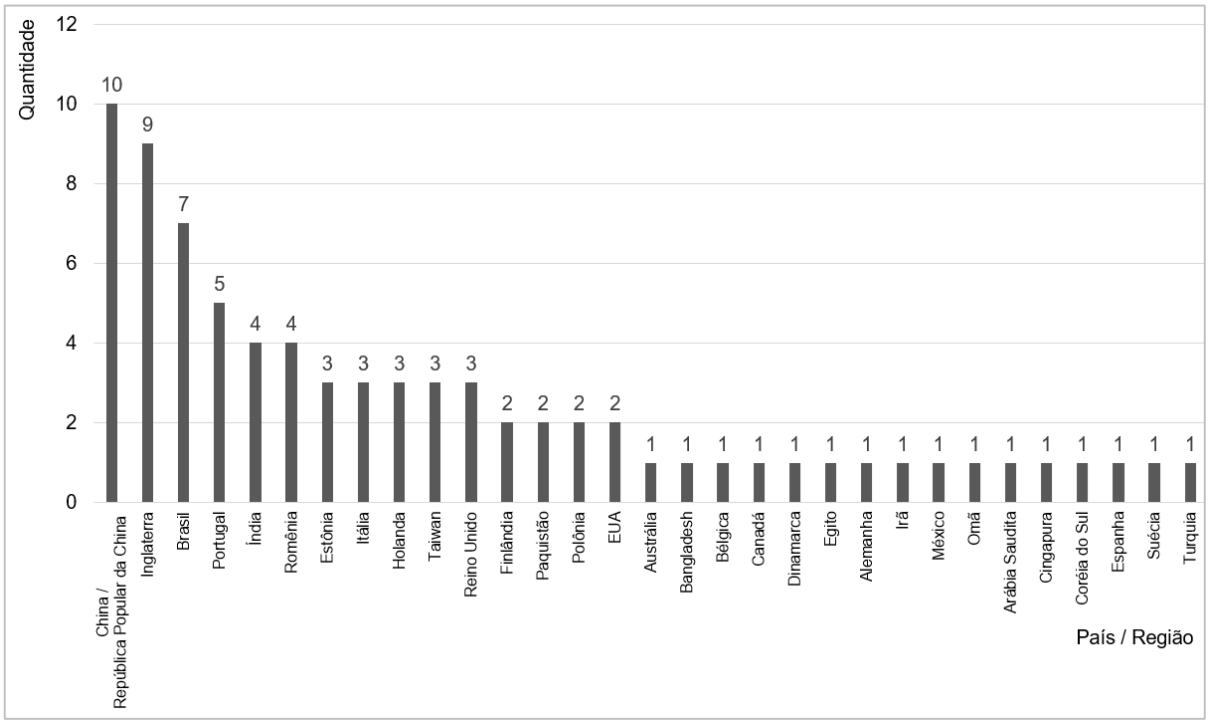


Fonte: elaboração própria (2023)

A Figura 22 apresenta a distribuição dos artigos publicados por país ou região. É possível observar que o Brasil encontra-se na terceira posição dentre os países com artigos publicados na área (contando com 7 artigos), atrás apenas da Inglaterra (com 9 artigos) e da China / República Popular da China (com 10 artigos).

A posição de destaque do Brasil em quantidades de publicações pode ter como possível explicação a magnitude da indústria têxtil e de vestuário nacional, tendo em vista os dados de ABIT (2022) e IEMI (2021) que relatam faturamento de R$ 161 bilhões, volume de produção de 1,9 milhão de toneladas e 7,93 bilhões de peças confeccionadas no ano de 2020.

Figura 22 - Distribuição dos artigos publicados por países / regiões



Fonte: elaboração própria (2023)

Os critérios de busca utilizados na pesquisa em questão foram considerados suficientes, por abrangerem publicações restritas a uma limitação temporal recente (e, portanto, com informações mais atualizadas) e concentradas nos seus títulos (isto é, aumentando a convergência com o estudo proposto).

Para além dos limites de busca utilizados (quais sejam, o recorte temporal de cinco anos e a pesquisa somente no título das publicações), também foi realizada uma pesquisa livre com os termos “circular economy” AND textile, em todos os campos e sem limitação de data de publicação. Esta pesquisa conduziu a 1.035 publicações, com datas que iniciam no ano de 2009 (com 1 ocorrência) a janeiro de 2025 (com 14 ocorrências). Este cenário permite inferir que o estudo acadêmico da economia circular aplicada aos materiais têxteis é relativamente recente.

4.3 PRODUÇÃO E CONSUMO DE PRODUTOS TÊXTEIS E DE VESTUÁRIO

A Tabela 1 fornece informações sobre a produção brasileira de materiais têxteis e confeccionados no período de 2016 a 2020. Os dados referem-se aos elos produtivos mais relevantes na cadeia têxtil, a saber: produção de fibras e filamentos químicos; produção de têxteis básicos (que abrangem fios têxteis, tecidos planos,

tecidos de malha e não-tecidos); e a produção de artigos confeccionados (que incluem vestuários, produtos da linha lar e produtos técnicos) (IEMI, 2021).

Tabela 1 - Produção de artigos têxteis e de confecção por segmento no Brasil

Segmentos	Produção (toneladas)				
	2016	2017	2018	2019	2020
Fibras e filamentos	231.959	233.507	235.198	237.539	225.449
Têxtil (1)	1.901.103	2.011.254	2.031.334	2.047.600	1.905.400
Fios	1.170.216	1.211.834	1.220.386	1.222.920	1.161.812
Tecidos	1.241.037	1.269.416	1.267.040	1.264.871	1.162.157
Malhas	471.646	477.806	487.381	510.067	481.064
Não tecidos	271.682	288.205	294.681	307.846	318.709
Confeccionados (2)	1.588.834	1.605.716	1.599.678	1.630.452	1.444.666
Vestuário	1.010.877	1.035.868	1.031.003	1.051.839	879.253
Meias e acessórios	23.383	24.468	24.507	24.665	21.327
Linha lar	309.049	296.984	289.747	293.853	305.028
Outros	245.526	248.397	254.421	260.095	239.058

Fonte: Modificado de IEMI (2021) a partir de IEMI/ABRAFAS

Notas:
(1) A produção têxtil total é mensurada pelo consumo aparente de fibras adicionado ao consumo interno de filamentos, mais a importação de fios e de tecidos planos em cru. Abrange polipropileno (filamento e ráfia).
(2) Medido a partir do consumo de suas matérias-primas básicas (tecidos planos, malhas, entre outras).

A Tabela 1 permite verificar que, ainda que tenham apresentado retrações nos volumes de produção no ano de 2020 em comparação ao ano anterior, os segmentos têxtil e de confecção apresentaram os maiores volumes produzidos no ano, com destaque para o vestuário.

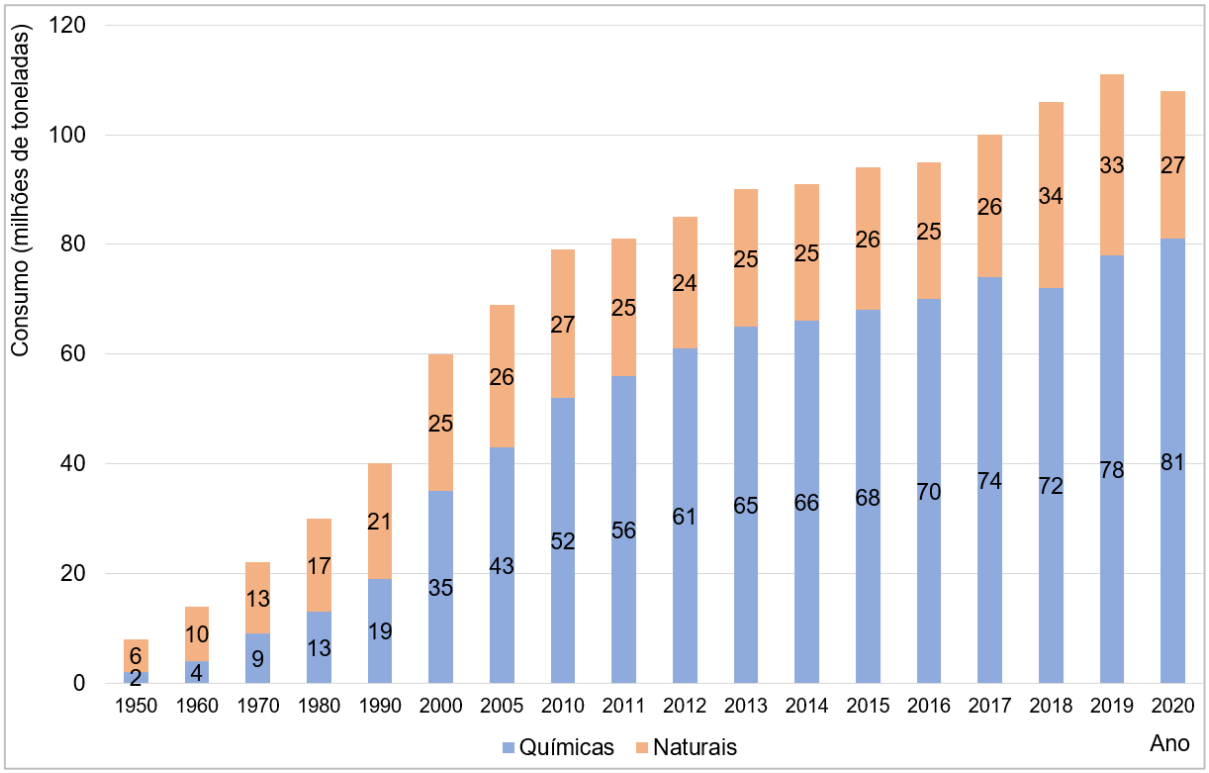
Se por um lado o isolamento social imposto pela pandemia de Covid-19 pode ter influenciado a queda da produção de têxteis e artigos de confecção em 2020, pode, também, justificar o aumento de aproximadamente 3,8% do volume de produção de produtos da linha lar em comparação ao ano de 2019, um crescimento superior ao aumento de cerca de 1,4% verificado no período de 2019 em relação a 2018. Os materiais do tipo não tecidos também apresentaram um aumento em 2020 em relação

ao ano anterior (aproximadamente 3,5%), um crescimento inferior ao registrado no ano de 2019 em relação a 2018, de cerca de 4,5%.

Diante deste novo cenário, além dos elevados volumes produzidos de artigos têxteis e de vestuário verificados ao longo dos últimos anos, o crescimento dos volumes de produção de produtos da linha lar e não tecidos impõe novos desafios à destinação ambientalmente correta dos resíduos gerados ao fim da via útil dos materiais.

A Figura 23 apresenta a evolução do consumo da indústria têxtil mundial no período de 1950 a 2020. É possível observar que, até o ano de 1990, a demanda por fibras naturais era superior à procura por fibras químicas (isto é, sintéticas e artificiais). Este cenário começou a ser modificado na década seguinte, quando, no período de 2000 a 2020, o consumo de fibras químicas apresentou um crescimento de aproximadamente 131,43%, enquanto o consumo de fibras naturais registrou 8% de crescimento no nível de consumo. Uma possível explicação para o expressivo aumento da produção de fibras sintéticas reside na produção em grande escala de roupas populares pela China e comercializadas para o mundo neste mesmo período.

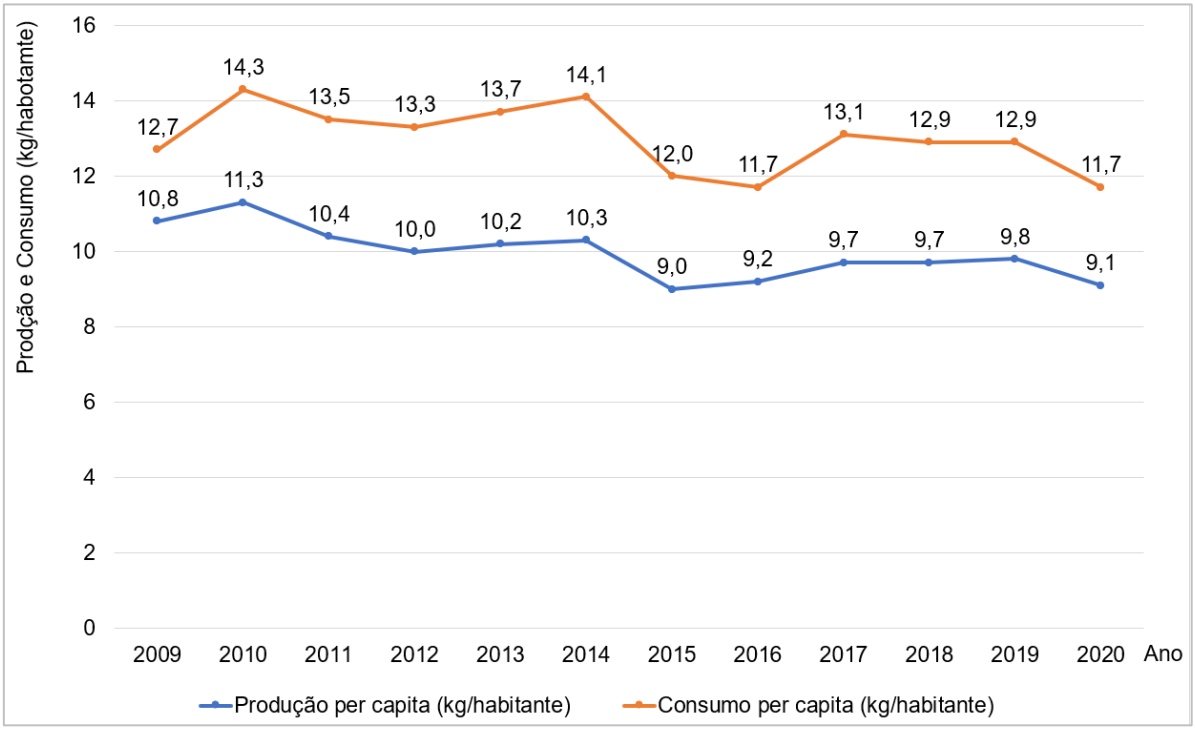
Figura 23 - Consumo mundial de fibras têxteis



Fonte: Adaptado de IEMI (2021) a partir de dados de IEMI/ICAC/Fiber Organon

A Figura 24 apresenta a evolução nos níveis per capita de produção e consumo de têxteis no período de 2009 a 2020. É possível verificar que a produção brasileira de têxteis foi estimada em 9,1 kg/habitante no ano de 2020, representando uma redução de aproximadamente 7,14% em relação ao ano anterior. Neste mesmo período, o consumo brasileiro foi de 11,7 kg/habitante, o que significa uma diminuição de cerca de 9,3% em relação ao ano anterior. A diferença observada entre os volumes de produção e consumo indicam que uma parte do mercado interno foi atendida por meio de importações (IEMI, 2021).

Figura 24 - Produção e consumo por habitante de têxteis no Brasil



Fonte: Adaptado de IEMI (2021) a partir de dados de IEMI, IBGE e Banco Central do Brasil

Observa-se que as reduções registradas nos volumes produzidos e consumidos de têxteis no ano de 2020 em relação ao ano anterior podem ser consequências das restrições nas jornadas de trabalho nas fábricas e na diminuição da circulação das pessoas nas ruas em virtude da pandemia de Covid-19. Desta forma, é possível que haja uma retomada no crescimento dos níveis de produção e consumo de têxteis à medida que os efeitos da pandemia são minimizados.

Portanto, a desaceleração do consumo e a instabilidade econômica observadas durante a pandemia da Covid-19 podem ser uma justificativa para a redução da

demanda por têxteis no ano de 2020. Desta forma, esta diminuição do consumo pode apresentar um caráter pontual e transitório, sendo necessária a adoção de medidas que visem a redução dos volumes de produção e consumo de forma sistêmica.

Do ponto de vista do comportamento de compra dos consumidores de vestuário no país, 68% relataram que compram roupas pelo menos a cada trimestre e 24% deles compram todos os meses (IEMI, 2021).

A utilização de roupas é intensamente subutilizada em muitas regiões do mundo. Exemplos incluem os EUA, onde as peças de vestuário são utilizadas apenas por cerca de um quarto da média mundial, e a China, onde a utilização das roupas diminuiu 70% em quinze anos, de acordo com a organização Ellen MacArthur Foundation (2017a) com base nos dados da empresa de pesquisa *Euromonitor International Apparel & Footwear*, edição 2016. Estes quantitativos incluem todas as utilizações até o descarte da roupa, abrangendo a reutilização após a coleta e revenda (Ellen MacArthur Foundation, 2017a).

A Tabela 2 apresenta o histórico da produção brasileira de fibras têxteis no período de 2008 a 2018, reunidos por Modefica, FGVces e Regenerate (2020) a partir de dados da Associação Brasileira de Produtores de Fibras Artificiais e Sintéticas (ABRAFAS) e da Associação Brasileira dos Produtores de Algodão (ABRAPA). O relatório aponta que a fibra de algodão lidera a produção nacional na indústria da moda, representando 92% do mercado brasileiro. Em relação à produção de fibras sintéticas, o poliéster lidera com 68% da fabricação nacional deste tipo de fibra.

Tabela 2 - Produção nacional de fibras têxteis por tipo (em mil toneladas)

Produção	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Algodão Pluma	1890.6	1843.1	1959.8	1877.3	1310.3	1734.0	1562.8	1289.2	1529.5	2005.8	2778.8
Raiom Viscose [11]	15.9	30.2	20.7	18.1	19.5	7.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Raiom Acetato [11]	16.0	15.7	16.4	15.9	15.3	16.3	16.3	11.4	10.4	13.8	10.2
Náilon	53.5	49.4	54.4	48.7	52.1	56.6	55.6	35.9	30.8	47.6	40.0
Elastano [12]	0.0	0.0	11.7	12.0	17.4	23.0	22.0	22.8	22.8	25.0	26.0
Poliéster	252.6	209.3	230.9	208.4	179.2	191.6	196.3	168.2	167.9	147.1	159.0
Acrílico	31.9	31.8	32.4	32.4	26.0	15.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Total	2260.5	2179.5	2326.3	2212.8	1619.8	2044.8	1853.1	1527.5	1761.5	2260.5	3014.0

Fonte: ABRAFAS (2020) e ABRAPA (2020) *apud* Modefica, FGVces e Regenerate (2020)

Se no Brasil o algodão prevalece como a fibra mais produzida na indústria da moda (possivelmente pela vocação agrícola que o país apresenta), ao se analisar a produção mundial de fibras têxteis, a literatura aponta para o predomínio de utilização de fibras sintéticas.

O guia orientativo Close the Loop (Flanders, 2023) relata aumento da demanda por poliéster reciclado na indústria da moda, principalmente nos segmentos de mercado de roupas esportivas e atividades ao ar livre (isto é, *outdoor*).

[11] Raiom viscose e raiom acetato são fibras artificiais produzidas a partir de lâminas de celulose, diferindo em suas rotas de produção. Para a produção de viscose, as lâminas de celulose são submetidas a um banho de soda cáustica, moagem, sulfurização, maturação, fiação e extrusão. Já na produção de acetato, as lâminas de celulose seguem para um banho de ácido sulfúrico, diluição em acetona, extrusão e evaporação da acetona (ABRAFAS, s.d.). Segundo Textile Exchange (2024), a diferença entre viscose e raiom (ou *rayon*) consiste somente no nome que a fibra recebe em diferentes partes do mundo. Desta forma, compreende-se que o mesmo se aplica ao termo raiom acetato.

[12] Fibras elastômeras ou elastano são fibras químicas obtidas a partir do etano, popularmente conhecida pelo nome comercial Lycra®, desenvolvida e registrada pela empresa DuPont. Apresentam elevado potencial elástico, permitindo que as roupas, ao serem esticadas, retornem à forma original (Zanotti, 2024).

Segundo o relatório *The Materials Market Report*, publicação anual que disponibiliza dados aceca da produção global de fibras e matérias-primas, após uma ligeira queda em 2020 em decorrência da pandemia de Covid-19, a produção mundial de fibras aumentou de, aproximadamente, 112 milhões de toneladas em 2021 para uma produção recorde de 116 milhões de toneladas em 2022 (Textile Exchage, 2023), em uma taxa de crescimento em torno de 3,6% ao ano.

A publicação relata, ainda, que, no período de vinte anos, a produção mundial de fibras aumentou de 58 milhões de toneladas no ano 2000 para 116 milhões de toneladas em 2022, sendo esperado um aumento para 147 milhões de toneladas em 2030, mantidas as condições atuais (Textile Exchage, 2023).

A produção global de fibras sintéticas virgens à base de materiais fósseis apresentou um crescimento de 63 milhões de toneladas em 2021 para 67 milhões de toneladas em 2022 em um movimento de desalinhamento aos compromissos e metas ambientais de redução de 1,5º C (Textile Exchage, 2023).

A Tabela 3 apresenta a participação no mercado mundial de cada categoria de fibra e os seus respectivos volumes de produção em 2022. É possível observar a predominância das fibras sintéticas, com aproximadamente 65% da produção de fibra global total, seguida pelas fibras vegetais (com cerca de 27% de participação), fibras celulósicas artificiais, isto é, feitas pela ação humana (em torno de 6,3%) e fibras animais (com cerca de 1,6%). O poliéster apresenta-se como a fibra mais produzida no mundo, com um volume de produção aumentando de 61 milhões de toneladas em 2021 para 63 milhões de toneladas em 2022, totalizando 54% da produção global total em 2022.

Tabela 3 - Produção de fibras global no ano de 2022

Tipo de fibra	Proporção da produção de fibra global (%)	Produção de fibra global em 2022 (milhões de toneladas)
Fibras sintéticas	**~ 65%**	**~ 75,5**
Poliéster	~ 54%	~ 63,3
Poliamida	~ 5%	~ 6,2
Outros	~ 5%	~ 6,0
Polipropileno	~ 2,7%	~ 3,1
Acrílico	~ 1,4%	~ 1,6
Elastano	~ 1,1%	~ 1,2
Fibras vegetais	**~ 27%**	**~ 31,5**
Algodão	~ 22%	~ 25,5
Outros	~ 5,2%	~ 6,03
Linho	~ 0,32%	~ 0,38
Cânhamo	~ 0,26%	~ 0,30
Outras fibras	~ 4,6%	~ 5,35
Fibras celulósicas artificiais	**~ 6,3%**	**~ 7,3**
Viscose	~ 5%	~ 5,8
Outros	~ 1,3%	~ 1,4
Acetato	~ 0,81%	~ 0,9
Liocel	~ 0,28%	~ 0,3
Modal	~ 0,17%	~ 0,2
Cupro	~ 0,01%	~ 0,01
Fibras animais	**~ 1,6%**	**~ 1,9**
Lã (ovelha)	~ 1%	~ 1,1
Outros	~ 0,65%	~ 0,75
Penas	~ 0,52%	~ 0,61
Seda	~ 0,08%	~ 0,09
Outras fibras	~ 0,04%	~ 0,05
Total	100%	~ 116

Fonte: Adaptado de Textile Exchange (2023), este a partir de Textile Exchange com base em dados do CIRFS, FAO, ICAC, IVC, IWTO, Maia Research, e modelação própria[13].
Nota: Estes dados incluem fibras recicladas

Desde meados da década de 1990, momento em que ultrapassaram a produção de algodão, as fibras sintéticas passaram a liderar o mercado de fibras. Em

[13] No documento analisado (Textile Exchange, 2023) não foram identificadas as descrições dos termos utilizados. No website da Textile Exchange (2024), somente foi possível identificar que ICAC remete a International Cotton Advisory Committee. Os demais termos foram pesquisados no website Google (disponível em: <https://www.google.com.br>, acesso em 25 mar. 2024), seguidos individualmente pela palavra "*meanning*", isto é, "significado" em inglês, gerando os seguintes resultados: CIFRS: European Man-Made Fibres Association; FAO: Food and Agriculture Organization; IWTO: International Whool Textile Organization; Maia Research: Market Research Reports, industrial Analysis; IVC: não foi identificado.

2022, esta categoria de fibras representou, aproximadamente, 65% da produção de fibra global, totalizando cerca de 75,5 milhões de toneladas. Dentre as fibras sintéticas, o poliéster foi responsável por cerca de 54% do mercado de fibra mundial total, totalizando aproximadamente 63,3 milhões de toneladas em 2022. A segunda fibra sintética mais utilizada, a poliamida (conhecida como *nylon* ou náilon), respondeu por cerca de 5% da produção de fibra global, com um total aproximado de 6,2 milhões de toneladas produzidas em 2022. Outros sintéticos (como polipropileno, acrílico e elastano) tiveram cerca de 5% de participação combinada no mercado de fibra mundial em 2022, totalizando, aproximadamente, 6 milhões de toneladas (Textile Exchage, 2023).

As fibras vegetais representaram cerca de 27% do mercado global em 2022, totalizando aproximadamente 31,5 milhões de toneladas produzidas. Nesta categoria, o algodão apresentou-se como a segunda fibra mais produzida em termos de volume, com uma participação de aproximadamente 22% no mercado de fibra global, o equivalente a cerca de 25,5 milhões de toneladas em 2022. As demais fibras vegetais, nas quais estão inclusos cânhamo, juta, linho, fibra de coco, sisal, abacá, rami, kenaf, sumaúma e agave, apresentaram em torno de 5,2% de participação combinada na produção de fibra global, totalizando, aproximadamente, 6,03 milhões de toneladas produzidas (Textile Exchage, 2023).

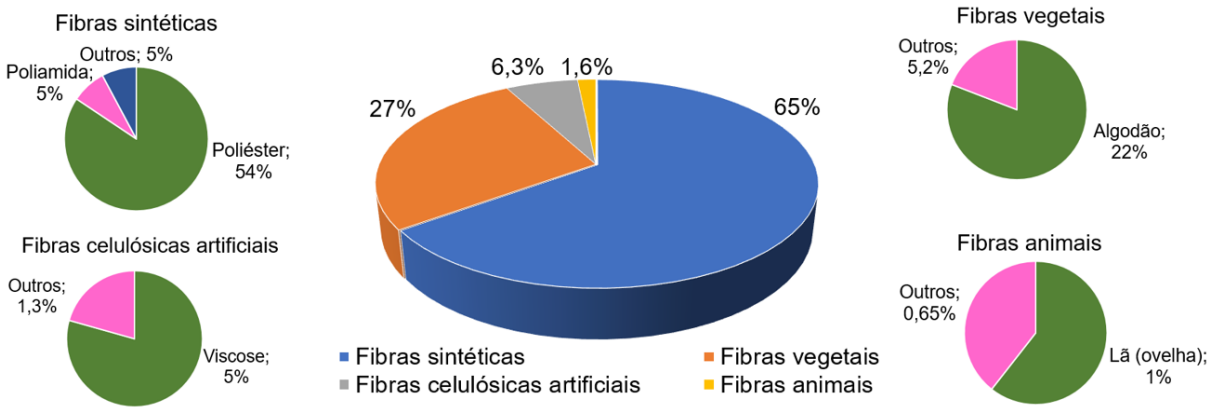
As fibras celulósicas artificiais, que abrangem viscose, acetato, liocel, modal e cumpro, apresentaram cerca de 6,3% de participação no mercado global total, com 7,3 milhões de toneladas produzidas em 2022. Destes materiais, a viscose denotou, aproximadamente, 5% de participação no mercado global de fibras em 2022, com uma produção em torno de 5,8 milhões de toneladas. Os demais materiais celulósicos sintéticos tiveram, combinados, uma participação em torno de 1,3% no mercado global de fibras em 2022, o que representa cerca de 1,4 milhão de tonelada produzida (Textile Exchage, 2023).

Já as fibras animais, que incluem lã, penugem, penas e seda, contaram com aproximadamente 1,6% de participação no mercado global total em 2022, totalizando 1,9 milhão de tonelada produzida. A lã teve cerca de 1% do mercado, com aproximadamente 1,1 milhão de tonelada produzida, seguida de penugem e penas (com cerca de 0,52% de participação no mercado global total) e seda (contando com aproximadamente 0,08% de participação nesse mercado). Outras fibras animais, a

saber, alpaca, angorá, camelo, caxemira, guanaco, lhama, mohair, vicunha, e iaque corresponderam a 0,04% do mercado de fibras global, totalizando 0,05 milhões de toneladas em 2022 (Textile Exchage, 2023).

A Figura 25 resume a distribuição da produção global de fibras total no ano de 2022, demonstrando a participação das fibras sintéticas (65%), fibras vegetais (27%), fibras celulósicas artificiais (6,3%) e fibras animais (1,6%).

Figura 25 - Mercado de fibra global em 2022



Fonte: adaptado de Textile Exchange (2023)

4.4 GERAÇÃO DE RESÍDUOS TÊXTEIS E DE VESTUÁRIO E OS SEUS IMPACTOS

Esta seção aborda os impactos ambientais e econômicos decorrentes dos resíduos têxteis e de vestuário gerados.

4.4.1 Impactos ambientais

Marques, Marques e Ferreira (2020) relatam que o tratamento de materiais têxteis em fim de vida apresenta elevada complexidade em decorrência da diversidade de fibras empregadas e dos diferentes processos industriais utilizados (incluindo o tingimento), além da variedade de acessórios de vestuário que apresentam, como botões, fechos, artigos metálicos, plásticos e etiquetas.

O setor têxtil e de vestuário gera impactos significativos ao meio ambiente, tanto na sua produção quanto no descarte dos seus resíduos. Os processos

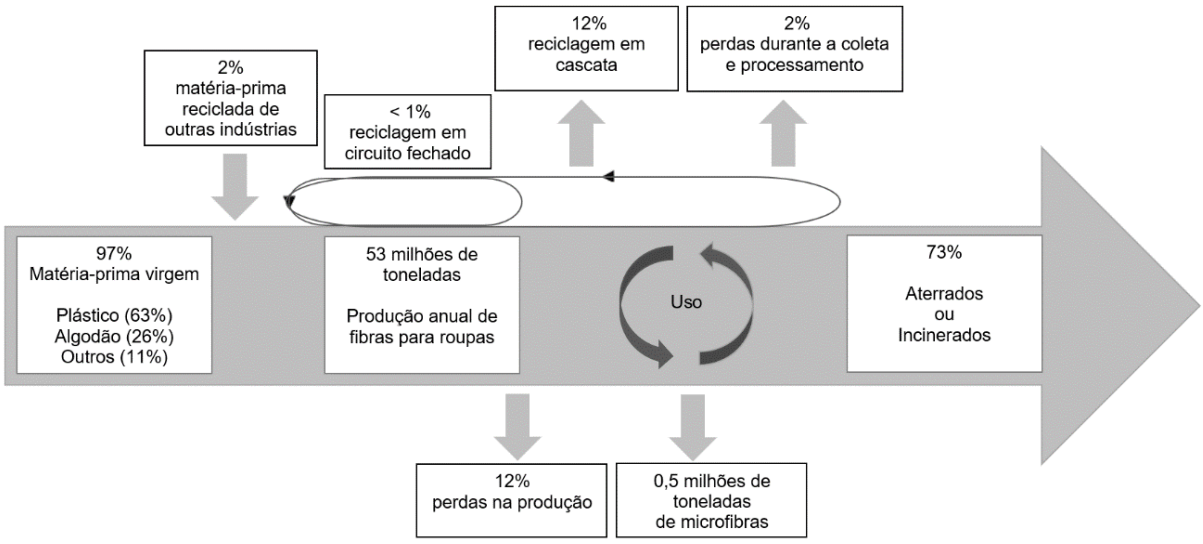
produtivos presentes no segmento têxtil apresentam-se intensivos no consumo de água e na utilização de pigmentos na etapa de tingimento das peças. O descarte inadequado destes corantes pode contaminar os corpos d'água, lençol freático e solo, gerando riscos à saúde humana e ao meio ambiente.

Além disso, a utilização intensiva de materiais sintéticos, como o poliéster, na produção das peças têxteis representa um grave problema ambiental, uma vez que a sua matéria-prima, o petróleo, constitui-se em uma fonte de recursos não renováveis.

Ainda que sejam empregadas práticas eficientes de reciclagem, as características poluidoras das fibras sintéticas (como o poliéster) permanecem, em virtude da liberação de fibras de microplásticos em cada ciclo de lavagem (Modefica, FGVces e Regenerate, 2020).

A Figura 26 apresenta o fluxo de materiais globais para vestuário no ano de 2015. A partir da sua análise, é possível observar que menos de 1% do material utilizado para produção de roupas é reciclado em novas peças de vestuário, abrangendo os processos de reciclagem após fabricação e uso. Incluindo o quantitativo de 12% de material submetidos à reciclagem em cascata (isto é, aquelas aplicações em outras indústrias e de menor valor financeiro), observa-se que, em toda a indústria, somente 13% da entrada total de material é submetida a algum tipo de reciclagem após o uso final da roupa (Ellen MacArthur Foundation, 2017a).

Figura 26 - Fluxo de materiais globais para vestuário



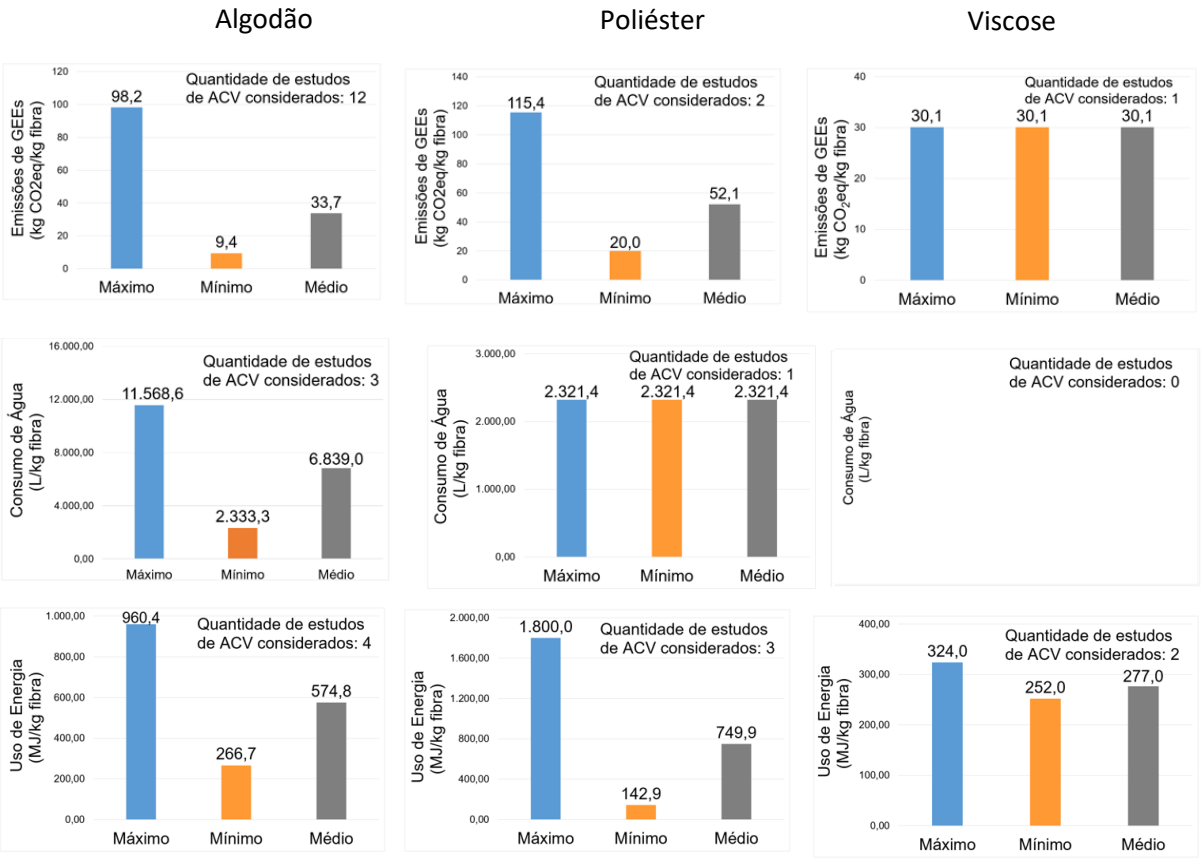
Fonte: adaptado de Ellen MacArthur Foundation (2017a)

Da entrada total de fibras, mais de 97% são oriundas de matérias-primas virgens (sendo 63% compostos por plásticos, 26% por algodão e 11% por outros materiais), enquanto 2% são provenientes de material reciclado (na forma de matéria-prima proveniente de outras indústrias), e menos de 1% tem origem na reciclagem em circuito fechado, isto é, quando as roupas são submetidas à reciclagem nas mesmas aplicações de qualidade ou similares (Ellen MacArthur Foundation, 2017a).

Do total das 53 milhões de toneladas de fibras produzidas para o vestuário anualmente, 12% são descartadas como perdas de produção, o que abrange sobras de fábrica e liquidação de excesso de estoque. Na fase de uso, 500 mil toneladas de microfibras de plásticos desprendidas durante a lavagem das peças têm como destino os oceanos. Após o uso final da peça, 73% de todo material que entra no sistema de vestuário segue para aterros ou incineradores, enquanto 12% são encaminhados para reciclagem em cascata, isto é, quando a reciclagem das roupas é realizada em outras aplicações de menor valor, como materiais de isolamento, panos de limpeza ou enchimento de colchões. Há, ainda, a perda de 2% de material durante as etapas de coleta e processamento (Ellen MacArthur Foundation, 2017a).

Os impactos ambientais relacionados à emissão de GEE, consumo de água e uso de energia desde a fase de extração de matérias-primas até o descarte do produto são apresentados na Figura 27, discriminados por tipo de fibra, a saber, algodão, poliéster e viscose. Dentre os materiais, o poliéster é aquele que apresenta a maior taxa de emissões de GEE (com taxa máxima de 115,4 kg CO_2eq/kg fibra). Uma possível justificativa reside na origem de base fóssil deste material, que consiste em intensa fonte emissora de gases. Também é essa a fibra que apresenta a maior utilização de energia (com taxa máxima de 1.800,0 MJ/kg fibra), dentre as verificadas. Quanto ao consumo de água, o algodão apresenta-se como o mais intensivo no uso deste recurso (com taxa máxima de 11,568,6 L/kg fibra).

Figura 27 - Impactos ambientais no ciclo de vida (do berço ao túmulo) de uma peça têxtil por fibra: algodão, poliéster e viscose



Fonte: adaptado de (Modefica, FGVces e Regenerate, 2020)

Na indústria têxtil e de vestuário, foram identificados impactos ambientais relacionados ao descarte de resíduos sólidos, ao consumo de água e poluição hídrica, e às emissões de GEE. Tais impactos são descritos a seguir.

a) Descarte de resíduos sólidos

Até 2030, Farooq, Naqvi e Kamil (2022) relatam uma projeção de descarte de resíduos superior a 134 milhões de toneladas de têxteis por ano em todo o mundo. No Brasil, dados do Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas (SEBRAE, 2014) indicam que aproximadamente 170 mil toneladas de resíduos têxteis são geradas anualmente, dos quais 80% são descartados em aterros sanitários e lixões.

Marques, Marques e Ferreira (2020) corroboram esta informação ao relatarem que apenas cerca de 20% dos resíduos de roupas em todo o mundo são coletados e seguem para reutilização ou reciclagem, enquanto os 80% restantes seguem para aterros ou incineração, acarretando perdas de energia e de matéria-prima. Ademais, Farooq, Naqvi e Kamil (2022) relatam que a taxa de reciclagem têxtil na Europa é de aproximadamente 25%, enquanto nos Estados Unidos da América apenas 16,2% dos têxteis são reciclados.

Ao analisar a geração de resíduos têxteis no Brasil em comparação à geração total de resíduos sólidos urbanos de aproximadamente 82,5 milhões (ABRELPE, 2021), é possível observar que os resíduos têxteis correspondem a cerca de 0,2% da geração brasileira total de resíduos. Esta contribuição encontra-se muito distante daquela observada na média mundial, de 20%, segundo Flanders (2023).

b) Consumo de água e poluição hídrica

Dados da Fundação Ellen MacArthur com base em uma pesquisa de mercado da *Euromonitor International Apparel & Footwear*, edição 2016, indicam que a produção têxtil (incluindo o cultivo de algodão) consome aproximadamente 93 bilhões de metros cúbicos de água anualmente (Ellen MacArthur Foundation, 2017a).

Ao analisar a indústria têxtil e de vestuário, a organização UN Alliance for Sustainable Fashion (s.d.) informa que este setor é responsável pelo consumo de aproximadamente 215 trilhões de litros de água por ano, o equivalente a 215 bilhões de metros cúbico anualmente.

Como exemplo dos expressivos volumes de recursos hídricos utilizados ao longo da cadeia têxtil, é possível citar que, na fabricação de uma única calça jeans, são empregados 3.781 litros de água, considerando a produção, fabricação, transporte e lavagem do algodão. O processo corresponde a aproximadamente 33,4 kg de carbono equivalente emitidos, o que representa dirigir 111 quilômetros ou assistir 246 horas de televisão em uma tela grande (UNEP, 2018a).

Fontes adicionais relatam que o montante de água necessária para fabricar um par de jeans pode ser ainda maior. Dados da organização United Nations (2019) indicam que esta fabricação requer aproximadamente 7.500 litros de água, volume equivalente ao ingerido em média por um indivíduo durante um período de sete anos.

Os elevados volumes de água empregados na indústria têxtil e de vestuário apresentam-se como um ponto de alerta não somente quanto ao potencial de degradação ambiental, como também, social, uma vez que podem conduzir a quadros de escassez e estrese hídrico em regiões ao longo do Planeta, com potenciais prejuízos à sobrevivência humana.

Além disso, quantidades elevadas de produção e consumo de têxteis tendem a agravar a poluição hídrica em decorrência do descarte inadequado desses materiais em muitas ocasiões. Dados da organização UN Alliance for Sustainable Fashion (s.d.) indicam que os materiais têxteis representam cerca de 9% das perdas de microplásticos para os oceanos por ano.

Kant (2012) relata que a atividade de tingimento têxtil contribui com 15% a 20% do fluxo total de águas residuais. Dados da UNEP (2018a) reforçam esse quantitativo de consumo hídrico ao indicar que 20% da poluição industrial da água têm origem nos processos de tingimento e tratamento de têxteis.

Sob a perspectiva do uso de produtos químicos, a produção de algodão consome 4% do total de fertilizantes de nitrogênio e fósforo utilizados no mundo, constituindo-se em uma relevante fonte de poluição dos recursos hídricos (Farooq, Naqvi e Kamil, 2022).

c) Emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE)

O relatório *Fashion on Climate* emitido pelas organizações McKinsey & Company e Global Fashion Agenda (2020) reúne dados que indicam que somente a indústria global da moda produziu, aproximadamente, 2,1 bilhões de toneladas de emissões de GEE no ano de 2018, o que corresponde a cerca de 4% do total global, em um montante equivalente às emissões anuais de GEE somadas da França, Alemanha e Reino Unido. Aproximadamente 70% das emissões da indústria da moda foram oriundas de atividades a montante (isto é, *upstream*), como preparo das atividades, processamento de materiais e produção (McKinsey & Company e Global Fashion Agenda, 2020).

4.4.2 Impactos econômicos

Algumas inciativas de mercado destacam-se no segmento têxtil com o objetivo de mitigar os impactos ambientais gerados pelos excessivos volumes de produção e consumo. Dados disponibilizados pela CNN (2022) indicam que uma das tendências para o reaproveitamento dos resíduos é a atividade de “upcycling”, que consiste na transformação de produtos, retalhos e peças inutilizadas em roupas novas e em funções diferentes daquelas iniciais. Já o comércio de produtos de segunda mão (isto é, usados) apresentou um crescimento de 48,58%, entre os primeiros semestres de 2020 e 2021, segundo dados da Agência SEBRAE de Notícias (2021).

Ainda que seja necessário investir no desenvolvimento de tecnologia, principalmente em relação à reciclagem de têxteis, opções mais sustentáveis já podem ser realizadas pela indústria da moda, dentre as quais destacam-se: investimento em fibras alternativas; garantia da destinação adequada dos resíduos têxteis da confecção, encaminhando os retalhos de pré-consumo da própria produção para reciclagem; adoção de práticas de design para circularidade de modo a projetar os produtos para reciclagem ou destinação adequada ao fim da vida útil; investimento em educação ambiental como parte integrante das estratégias de marketing e publicidade de modo a incentivar o consumo consciente; e testagem de modelos circulares de negócios (Modefica, FGVces e Regenerate, 2020).

Além disso, a utilização de sistemas de água em circuito fechado reduz o volume de entrada de água nos processos de fabricação de têxteis e evita a liberação de produtos químicos da produção e corantes nos corpos hídricos (Modefica, FGVces e Regenerate, 2020).

Neste sentido, muitas organizações, incluindo varejistas de grande porte, estão incorporando princípios sustentáveis aos seus planejamentos estratégicos. Como exemplos, observa-se que a cadeia mundial de roupas H&M desenvolveu um sistema de coleta de peças, enquanto a marca de jeans Guess estabeleceu um programa de reciclagem de roupas. Já a fabricante de roupas para uso ao ar livre e esportes, Patagônia, produz jaquetas a partir de poliéster oriundo da reciclagem de garrafas (United Nations, 2019).

Empresas de menor parte também estão migrando para estratégias de negócios mais sustentáveis. Exemplos incluem a empresa suíça Freitag, que fabrica

bolsas e mochilas a partir do reaproveitamento de materiais como lonas de caminhão e cintos de segurança, além da empresa Indosol, que utiliza pneus descartados para a produção de calçados, e ainda, a empresa de roupas canadense Novel Supply, que desenvolveu um programa de devolução de roupas usadas para posterior reutilização e reciclagem (United Nations, 2019).

Além dos potenciais impactos ambientais gerados pelo segmento têxtil, a utilização de terras férteis para a produção de insumos destinados à indústria da moda apresenta-se como um ponto de atenção, visto que pode representar uma ameaça à soberania alimentar dos indivíduos (Modefica, FGVces e Regenerate, 2020).

Neste contexto, a utilização de estratégias de economia circular orientadas para a conservação e recuperação de recursos materiais e energéticos apresenta-se como um modelo econômico alternativo baseado na mitigação dos impactos negativos gerados.

4.5 TAXAS DE RECICLAGEM DE FIBRAS TÊXTEIS

Na pesquisa acerca dos processos de recuperação de materiais têxteis, foi possível identificar as taxas de reciclagem das fibras têxteis geradas.

A parcela combinada de todas as fibras recicladas apresentou uma ligeira queda de 8,5% para 7,9% entre os anos 2021 e 2022, respectivamente, após anos de crescimento. Este quadro decorreu, principalmente, do aumento da produção de poliéster de base fóssil, cujo preço foi inferior ao do poliéster reciclado. Além disso, os têxteis reciclados pré e pós-consumo representaram menos de 1% do mercado de fibra global total no ano de 2022 (Textile Exchage, 2023).

A participação no mercado das fibras de poliéster recicladas decresceu de 15% em 2021 para 14% em 2022, em decorrência de fatores que abrangem a competição crescente por garrafas PET como matérias-primas, além de desafios sistêmicos na escala de reciclagem de têxteis em têxteis, juntamente com o aumento da produção de poliéster virgem à base de petróleo (Textile Exchage, 2023).

O poliéster reciclado é majoritariamente (a saber, 99%) oriundo de garrafas plásticas, enquanto sistemas para reciclagem de têxteis em têxteis contabilizam menos de 1% de todo poliéster reciclado. Já os plásticos recolhidos dos oceanos

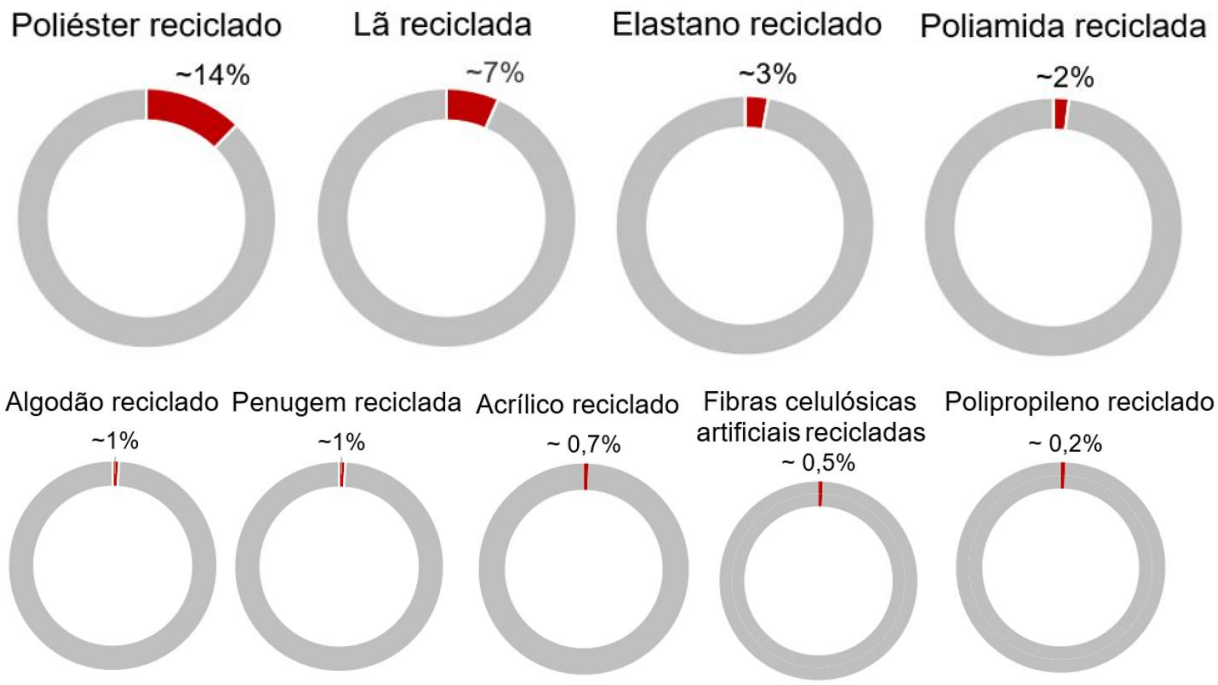
correspondem a menos de 0,01% do total de poliéster reciclado (Textile Exchage, 2023).

A poliamida reciclada foi responsável por somente 2% do mercado de poliamida de global, em virtude de desafios técnicos para reciclagem e preços superiores à poliamida virgem de origem fóssil. Têxteis pré-consumo e materiais descartados como redes de pesca e tapetes constituem a maior parte da poliamida reciclada. Já as fibras de poliamida de base biológica representaram aproximadamente 0,4% do mercado de poliamida total (Textile Exchage, 2023).

A Figura 28 demonstra o mercado de fibras recicladas por tipo no ano de 2022. Ainda que não tenham sido identificados dados relativos ao mercado brasileiro, é possível estimar que o país acompanhe este padrão mundial no mercado de fibras recicladas.

Por meio da análise da Figura 28, possível observar que o poliéster apresentou a maior proporção de fibras recicladas, a saber, aproximadamente 14% da produção total de poliéster. Ressalta-se que 99% do poliéster reciclado foi oriundo e garrafas PET. A segunda maior participação de fibra reciclada em 2022 correspondeu à lã, com cerca de 7% do seu mercado total. O elastano reciclado e a poliamida reciclada tiveram participações em seus mercados totais em torno de 3% e 2%, respectivamente. Já o algodão reciclado representou cerca de 1% da produção global dessa fibra, a mesma participação apresentada pela penugem reciclada em seu mercado global. As fibras acrílicas recicladas corresponderam a, aproximadamente, 0,7% do seu mercado global, enquanto as fibras celulósicas artificiais recicladas representaram cerca de 0,5% da sua produção global, e o polipropileno reciclado correspondeu em torno de 0,2% do seu mercado global (Textile Exchage, 2023).

Figura 28 - Mercado de fibras recicladas por tipo em 2022



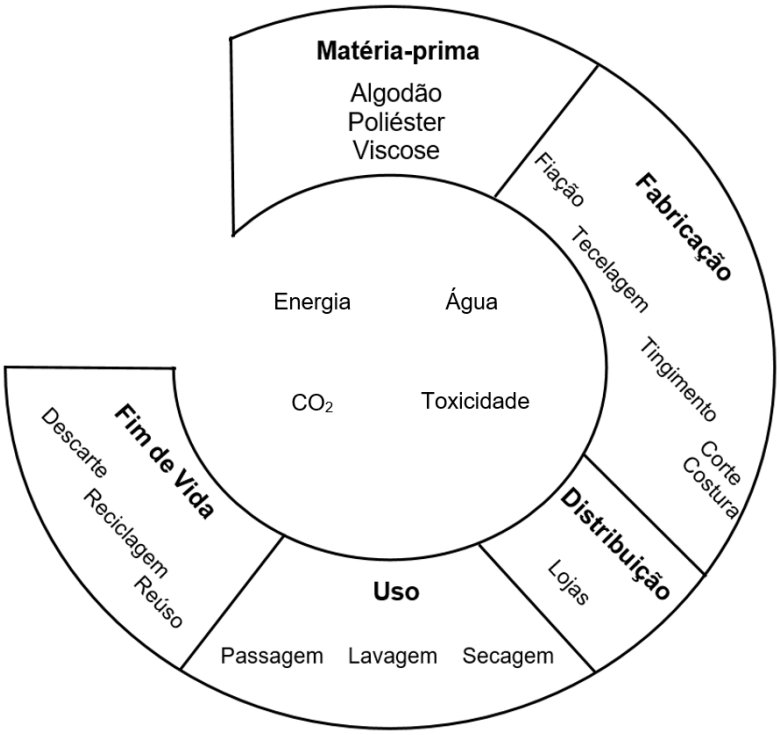
Fonte: Adaptado de Textile Exchange (2023), este a partir de Textile Exchange com base em Maia Research e compilação de dados globais

Desta forma, a análise da Figura 28 permite concluir que, nas condições analisadas, as taxas de reciclagem de fibras são muito baixas, representando um impacto de baixa magnitude na mitigação da degradação ambiental. Portanto, como estratégia de economia circular, apresenta baixo alcance em sua eficácia.

4.6 DESENVOLVIMENTOS DA ECONOMIA CIRCULAR NO ÂMBITO DA INDÚSTRIA TÊXTIL E DE VESTUÁRIO

A compreensão das etapas e dos processos que compõem o ciclo de vida dos produtos têxteis é essencial na quantificação dos impactos ao longo da sua cadeia. Figura 29, abrangendo desde a obtenção de insumos até o seu descarte (Modefica, FGVces e Regenerate, 2020).

Figura 29 - Ciclo de vida de uma peça de vestuário



Fonte: Adaptado de Modefica, FGVces e Regenerate (2020)

A indústria têxtil e de vestuário apresenta relevante importante para o desenvolvimento econômico mundial, visto que contribui com aproximadamente US$ 2,4 trilhões para a manufatura global e emprega cerca de 300 milhões de pessoas em toda a cadeia de valor. Devido à sua dimensão e abrangência, práticas insustentáveis neste segmento do mercado geram importantes impactos socioambientais (UN Alliance for Sustainable Fashion, s.d.)

A Aliança das Nações Unidas para a Moda Sustentável, inciativa das agências das Nações Unidas e organizações aliadas que desenvolvem projetos para garantir que a cadeia de valor da moda contribua para o alcance das metas dos ODS, ressalta que, na ausência de grandes mudanças nos padrões de consumo e nos processos produtivos da moda, os custos sociais e ambientais do setor continuarão a crescer (UN Alliance for Sustainable Fashion, s.d.)

Organizações como a Aliança das Nações Unidas para a Moda Sustentável e instituições como a Fundação Ellen MacArthur vêm desenvolvendo estudos rumo a uma nova economia têxtil, com o objetivo de incentivar o uso de novos materiais para aumentar a durabilidade das roupas, de modo que possam ser revendidas ou recicladas em outros produtos, auxiliando na redução da poluição (World Bank, 2019).

Sob esse direcionamento, empresas em todo o mundo vêm trabalhando no desenvolvimento de fibras alternativas e processos ambientalmente mais amigáveis. Plásticos extraídos do oceano estão sendo utilizados na confecção de tênis e roupas esportivas, assim como produtos químicos estão sendo substituídos por peles de peixe e corantes naturais, além de lonas descartadas sendo convertidas em mochilas e bolsas. Algumas empresas possuem, ainda, uma política de devolução de roupas dos consumidores a fim de que sejam encaminhadas à reciclagem (World Bank, 2019).

Dentre as iniciativas verificadas, observa-se que a empresa sueca Nudie Jeans utiliza algodão orgânico na sua confecção e, ainda, oferece reparos vitalícios sem custo. Também concede descontos aos clientes que fizerem a devolução das suas calças jeans antigas. A organização Tonlé, com sede no Camboja, desenvolve coleções de moda a partir de tecidos excedentes de grandes produtores de roupas em uma política de zero desperdício. Utiliza mais de 97% do material recebido, enquanto o restante, é transformado em papel (UNEP, 2018b).

Já a holandesa Wintervacht fabrica casacos e jaquetas a partir de cobertores e cortinas oriundos de brechós e instalações de triagem e processamento de doações. A empresa Indosole, com sede em São Francisco e Bali, fabrica sapatos, sandálias e chinelos a partir de pneus descartados na Indonésia. Já a organização suíça Freitag produz bolsas e mochilas a partir do reaproveitamento de lonas, cintos de segurança e câmaras de ar de bicicletas (UNEP, 2018b).

A organização Queen of Raw, sediada em nova York, coloca em contato designers, arquitetos e empesas têxteis com estoques mortos de tecidos sustentáveis de fábricas e varejistas. A fabricação de roupas da canadense Novel Supply é realizada mediante a utilização de tecidos naturais e orgânicos. Além disso, a empresa está estruturando um programa de devolução e alternativas de uso das peças no final da sua vida útil. Seu objetivo é desenvolver um modelo de moda de circuito fechado com zero desperdício. A rede H&M possui um programa de coleta de roupas, enquanto a fabricante de jeans Guess relatou o lançamento de um programa de reciclagem de guarda-roupas no EUA em conjunto com a organização i:Collect, que realiza as atividades de coleta classificação e reciclagem de roupas e calçados em todo o mundo. O programa prevê a concessão de descontos para clientes que devolverem cinco ou mais itens. As peças vestíveis serão submetidas à reciclagem,

enquanto as peças não vestíveis serão transformadas em novos produtos, como panos de limpeza ou, ainda, transformados em fibras para materiais de isolamento (UNEP, 2018b).

Para Colucci e Vecchi (2021), as principais práticas de economia circular das organizações enquadram-se nos seguintes princípios-chave: extensão da vida do produto, reúso, reciclagem e remanufatura. Como estratégia adicional, os autores identificaram a adoção de práticas de preservação de recursos para a sua utilização mais eficiente.

Colucci e Vecchi (2021) relataram que não foram identificadas evidências acerca de qualquer prática associada à remanufatura têxtil, ainda que a presente pesquisa tenha identificado em outras fontes. Já dentre as práticas de reúso, os autores citaram como exemplo a estratégia de compartilhamento por meio do aluguel de roupas. Os referidos autores indicaram, ainda, que o serviço de aluguel de roupas e as vendas de roupas em segunda mão constituem-se como práticas que prolongam o ciclo de vida dos produtos de moda e reduzem o seu descarte.

Do ponto de vista do design têxtil, uma estratégia adicional de extensão da vida útil de produtos têxteis reside na fabricação de tecidos projetados para serem duráveis e reciclados, reduzindo o desperdício e a necessidade de consumo acelerado das peças de vestuário (Colucci e Vecchi, 2021).

A seguir, são analisadas as principais práticas de economia circular identificadas no segmento têxtil e de vestuário, a saber: recuperação de recursos, extensão da vida útil, reúso, reciclagem, remanufatura e compartilhamento.

4.6.1 Recuperação de recursos

Os produtores de denim vêm investindo na produção de fibras com maior durabilidade, mas que também possam ser descartadas de forma mais sustentável ao fim da vida útil. Como exemplo, tem-se que a empresa Cardiani desenvolveu, em 2018, um programa para a produção de tecidos produzidos a partir de algodão certificado e fibra elástica reciclada certificada, além da utilização de corantes de tecnologia limpa e novos acabamentos e fibras mais sustentáveis. A organização utiliza, ainda, tecidos biodegradáveis e está investindo na fabricação de tecidos a serem totalmente absorvidos pelo solo (Colucci e Vecchi, 2021).

A empresa Cardiani Denim desenvolveu um tecido a partir de fibras 100% recicladas, gerando uma economia de aproximadamente 2.600 litros de água por calça jeans. O processo de produção elaborado pela empresa tem o potencial de reduzir o consumo de água em 75% e a utilização de produtos químicos em 65%. (Colucci e Vecchi, 2021).

No Brasil, em maio de 2021, a fabricante de roupas Malwee desenvolveu um processo de produção de calças jeans utilizando apenas 300 ml de água por peça, o equivalente a um copo, o que representa uma redução de 98% do consumo de água na fabricação. Um ano depois, anunciou a expansão do seu portfólio para doze peças, em parceria com a *startup* Água na Caixa, empresa que envasa água mineral em caixa reutilizável e integralmente reciclável. Dentre as peças produzidas, encontram-se calças, jaquetas, top, shorts, camisetas, cropped, regatas cropped e moletons (Exame, 2022).

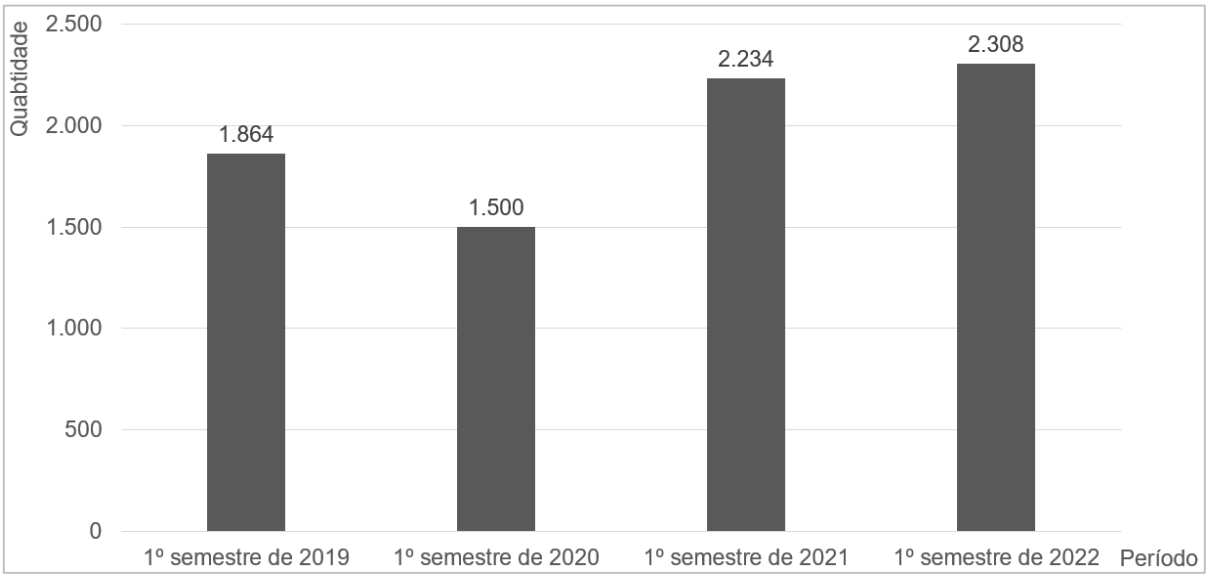
Além disso, as peças em malha são fabricadas a partir de algodão orgânico, sem a utilização de agrotóxicos e demais substâncias químicas nocivas, além consumirem uma quantidade menor de água. O processo de estampa dos moletons também emprega métodos mais sustentáveis, como a utilização de 60% menos água do que o processo tradicional (Exame, 2022).

4.6.2 Extensão da vida útil

Um modelo possível para promover a manutenção e o prolongamento da vida útil ocorre por meio do comércio de peças de roupas usadas em estabelecimentos do tipo brechó.

Dados do SEBRAE (2022) indicam que o mercado de produtos usados encontra-se em expansão no Brasil. A Figura 30 demonstra a quantidade de comércios de antiguidades, brechós e bazares abertos nos últimos anos. É possível observar um crescimento de aproximadamente 3,3% na quantidade de negócios abertos no primeiro semestre de 2022 em comparação ao mesmo período de 2021. Já o primeiro semestre de 2020, este mercado apresentou retração na quantidade de negócios abertos em virtude da crise sanitária e econômica gerada pela pandemia de Covid-19.

Figura 30 - Comércio de antiguidades, brechós e bazares no Brasil



Fonte: Adaptado de SEBRAE (2022)

Do total de negócios abertos nos seis primeiros meses de 2022 no segmento de usados, pouco mais de 2.050 corresponderam a microempreendedores individuais (MEI's), enquanto as microempresas totalizaram quase 200 novos registros e 55 empresas de pequeno porte foram criadas no segmento (SEBRAE, 2022).

Ao analisar o período de 2019 a 2022, os dados do SEBRAE (2022) indicam que a maior parte dos negócios de usados foi aberta por MEI's (12.322 unidades), seguidos pelas microempresas (1.288 unidades) e empresas de pequeno porte (219 unidades).

Segundo pesquisa realizada pela instituição GlobalData encomendada pela varejista online norte-americana do segmento de vendas de roupas usadas, ThredUP, o mercado global de vestuário de segunda mão deve crescer de US$ 96 bilhões em 2021 para US$ 218 bilhões em 2026, o que representa uma expectativa de crescimento de aproximadamente 127% no período (ThredUP, 2022).

Utilizando dados de uma análise de mercado intitulada GlobalData Market Sizing, realizada em fevereiro de 2022, a publicação de ThredUP (2022) relata que o segmento de vestuário de segunda mão apresentou um crescimento de 215% no período de 2012 a 2021, enquanto o setor de vestuário total cresceu 24% nesse mesmo intervalo.

A publicação em questão descreve, ainda, que a revenda é uma questão inevitável no futuro do varejo. Dados obtidos a partir da pesquisa GlobalData Fashion

Retailer Survey, conduzida com 50 varejistas de moda (abrangendo vestuário, acessórios e calçados) dos EUA acerca das suas metas de moda circular em janeiro de 2022, indicam que aproximadamente 75% dos executivos do varejo afirmam que possuem ou estão propensos a oferecer produtos de segunda mão a seus clientes, o que representa um aumento de 14 pontos em relação a 2020 (ThredUP, 2022).

Do ponto de vista dos consumidores, segundo dados provenientes da pesquisa GlobalData Consumer Resale Survey, realizada com 3.5000 adultos nos EUA em janeiro de 2022, indica que 45% da geração Z e da geração do milênio relatam maior probabilidade de comprar com uma marca que oferta, simultaneamente, roupas de segunda mão e roupas novas, representando um crescimento de 1 ponto em relação a 2020 (ThredUP, 2022).

Dados do relatório da ThredUP (2022) indicam que a pandemia acelerou o crescimento da revenda, com 33 milhões de consumidores comprando pela primeira vez produtos de segunda mão no ano de 2020. Considerando que período foi marcado pelo fechamento temporário das lojas físicas em decorrência do isolamento social, é possível inferir a importância do comércio eletrônico como impulsionador das vendas de roupas em brechós.

Ainda que seja um mercado em franca expansão, a revenda de produtos de segunda mão em brechós apresenta-se como uma estratégia protelatória, pois, ainda que possibilite o prolongamento da vida útil da peça por um período de tempo, em algum momento este produto seguirá para destinação em aterro sanitário ou incineração. Desta forma, esta estratégia adia, mas não impede o descarte final do bem.

4.6.3 Reúso

Colucci e Vecchi (2021) relatam que as práticas de reúso concentram-se, principalmente, nas etapas de extração de recursos naturais, produção e fim de vida dos materiais.

Exemplos incluem o processo produtivo da varejista italiana de moda Candiani Denim, que dispõe de processos circulares que abrangem medidas como a recuperação de água para uso em atividades de limpeza, a recuperação de calor

residual e de CO_2 emitidos e a reciclagem de 100% das sobras de algodão geradas (Colucci e Vecchi, 2021).

Também se destaca a atuação da empresa italiana de moda WRÅD, que desenvolveu em 2019 uma coleção de roupas a partir de algodão orgânico reciclado e certificado, além de tecidos militares reutilizados (Colucci e Vecchi, 2021).

4.6.4 Reciclagem

De acordo com a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) instituída pela Lei nº 12.305/2010, a reciclagem pode ser definida como o processo de transformação dos resíduos sólidos em que ocorre a alteração de suas propriedades físicas, físico-químicas ou biológicas, com o objetivo de transformação em insumos ou novos produtos (Brasil, 2010).

Na indústria de materiais têxteis e de vestuário, é possível observar práticas de reciclagem de materiais e produtos de natureza têxtil e não têxtil, conforme apresentado a seguir.

4.6.4.1 Reciclagem têxtil

A reciclagem de fios e têxteis apresenta-se como uma alternativa à necessidade de fabricação de novos tecidos a partir de matérias-primas virgens, como algodão ou fibras sintéticas. Esta tecnologia possibilita a economia de energia e a prevenção da poluição que ocorre durante os processos tradicionais de tingimento, lavagem e colheita (Flanders, 2023).

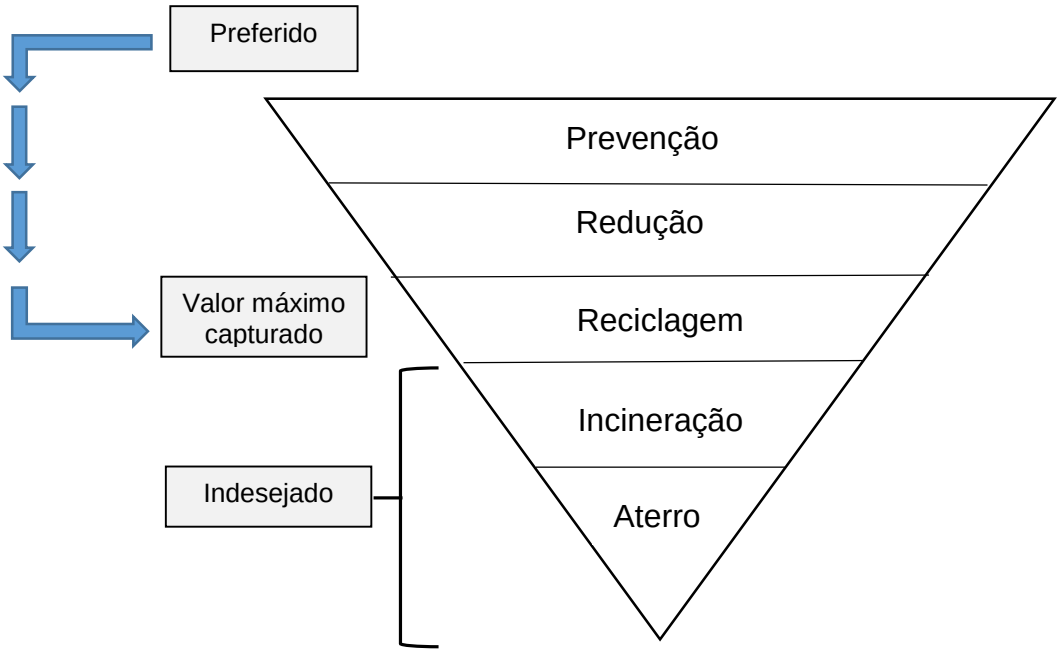
Colucci e Vecchi (2021) observam que as práticas de reciclagem podem ser observadas ao longo dos estágios de extração de recursos, produção e fim de vida dos materiais. Sob a ótica de recursos, em 1976, a empresa Candiani Denim apresentou pioneirismo ao instalar um sistema de circuito fechado de banhos de tingimento e, também, iniciar a reciclagem dos resíduos de algodão gerados. Já a empresa WRÅD utiliza recursos reciclados como pó de grafite e quitosana em processos como o de tingimento do seu algodão 100% orgânico (Colucci e Vecchi, 2021).

A Figura 31 demonstra que a reciclagem encontra-se no terceiro nível na pirâmide de hierarquia de resíduos, possibilitando a captura do valor máximo desses

materiais. Desta forma, as estratégias de prevenção e redução dos volumes de produção de têxteis são preferíveis em virtude da não geração ou da minimização da geração de resíduos. Enquanto a incineração e o aterro de resíduos têxteis são considerados técnicas indesejáveis devido aos impactos ambientais gerados.

O guia orientativo *Close de Loop* (Flanders, 2023) corrobora para esta análise ao descrever que a prevenção do desperdício por meio de estratégias como o aumento da vida útil e da durabilidade do produto constitui-se como a melhor solução disponível, e que a reciclagem deve ser o último recurso empregado.

Figura 31 - Hierarquia de resíduos



Fonte: adaptado de Accelerating Circularity (2020)

Fluxos circulares possibilitam o direcionamento efetivo de produtos, suas partes ou materiais para um novo ciclo. São exemplos da aplicação do fluxo circular na cadeia têxtil as seguintes práticas: sistema fechado de utilização de água na fabricação de fios; criação de peças utilizando resíduo têxtil industrial; implementação de rede de logística reversa de roupas pelos varejistas; entre outras (Modefica, FGVces e Regenerate, 2020).

Os ciclos reversos neste segmento englobam a coleta de sobras de têxteis da produção e de roupas usadas pelos consumidores. Além da redução dos volumes de resíduos destinados em aterros sanitários, estes modelos podem gerar receitas adicionais para as organizações e intensificar o relacionamento com os usuários. Por

meio de sistemas de devolução ou programas de coleta de roupas, as organizações recolhem seus próprios produtos ou de outras marcas em detrimento da oferta de cupons ou compensações para o consumidor (Modefica, FGVces e Regenerate, 2020).

O desperdício têxtil está presente na etapa de costura das peças, devido a falhas como medições maiores ou menores o que o necessário, agulhas danificadas, erro no orifício do botão, costuras distorcidas, manchas na lavagem ou de alvejante, linhas de vinco, entre outros (Farooq, Naqvi e Kamil, 2022).

Nos estágios de corte e costura, são gerados resíduos em baixa quantidade e formato irregular. Estes materiais, comumente descartados, podem ser reciclados após um processo de trituração. Já a sua reutilização é dificultada em virtude das suas pequenas dimensões (Farooq, Naqvi e Kamil, 2022).

Os resíduos de tecido também podem ser gerados nas atividades subsequentes aos estágios de tecelagem e acabamento, quando os tecidos são inspecionados e classificados. Tecidos que apresentam defeitos são segregados da linha de produção e, mediante um esforço extra, pode ser aproveitados para reutilização (Farooq, Naqvi e Kamil, 2022).

A reciclagem de materiais têxteis pode ocorrer tanto na fase de pré-consumo quanto na fase de pós-consumo. Os resíduos pré-consumo referem-se àqueles gerados ao longo do processo de fabricação dos têxteis, isto é, durante a produção do fio e do tecido, bem como da roupa em si. Já os resíduos pós-consumo correspondem às peças de roupas descartadas pelo consumidor após o seu uso (Flanders, 2023).

Farooq, Naqvi e Kamil (2022) diferenciam os resíduos pré-consumo como aqueles que comumente são gerados antes do seu recebimento pelo consumidor, constituindo-se em resíduos de fabricação que podem ter origem em diversas etapas da fabricação do tecido.

A reciclagem pré-consumo, isto é, apenas de resíduos da produção (como aqueles oriundos dos processos de fiação, tecido e confecção) prevalece na indústria têxtil brasileira, por ser mais simples e econômica. A entrada de materiais pré-consumo apresenta menor grau de dificuldade em relação ao conteúdo, qualidade, comprimento e cor das fibras. A maior parte do têxteis é reciclada ou transformada em materiais de menor valor, como isolamentos. Já a reciclagem pós-consumo apresenta

maior grau de complexidade devido às misturas de fibras, aviamentos, botões, zíperes, irregularidades de cor e qualidade de fibra. Os custos associados à reciclagem pós-consumo são maiores, e a resistência das fibras à tração é menor, quando comparados à reciclagem pré-consumo (Modefica, FGVces e Regenerate, 2020).

Um estudo desenvolvido no ano de 2017 coletou dados de vinte e uma empresas que realizam reciclagem de têxteis no Brasil via processos mecânicos (por trituração) ou químicos (por meio da regeneração das fibras). Os autores realizaram visitas a cinco empresas localizadas no Estado de São Paulo e constataram que a maior parte da reciclagem de têxteis é realizada utilizando somente resíduos pós-industriais (isto é, sobras da fabricação de fios ou tecidos). Também observaram que o produto final gerado é composto, principalmente, por fios desfibrados e não tecidos (Modefica, FGVces e Regenerate, 2020; Amaral *et al*., 2018).

A reciclagem de tecidos naturais, como algodão e lã, ocorre principalmente de forma mecânica, que consiste em um processo de decapagem e trituração dos tecidos. As fibras resultantes são quebradas em cadeias mais curtas. A fim de garantir melhor qualidade ao tecido, estas fibras são misturadas a fibras longas, isto é, novas, pois o uso apenas das fibras mais curtas não seria capaz de gerar um produto forte o suficiente, e o mesmo se desintegraria com rapidez (Flanders, 2023).

Os materiais naturais também podem ser submetidos à reciclagem química. Neste caso, o algodão é dissolvido em celulose, por exemplo, convertendo-se em viscose ou liocel. Como vantagem, este método permite a remoção dos corantes contidos nas fibras, mas apresenta como desvantagem, o fato de que os materiais submetidos à reciclagem não podem conter itens duros como zíperes ou botões (Flanders, 2023).

Já a reciclagem de tecidos sintéticos pode ocorrer de forma (termo)mecânica (isto é, por meio de trituração em fibras mais curtas) e química (ou seja, a partir de dissolução em celulose). O poliéster, neste caso composto principalmente por resíduos industriais e plásticos pós-consumo, como garrafas, é submetido a processos de pulverização, derretimento e fiação em novas fibras (Flanders, 2023).

Estudo desenvolvido pelas instituições Modefica, FGV e Regenerate (2020), demonstra que os insumos da reciclagem mecânica englobam fibras mistas (algodão, poliéster e viscose com e sem elastano), poliéster e algodão. Estas fibras são

oriundas, principalmente, das mesas de corte da confecção (isto é, pré-consumo), sendo obtidas diretamente ou por meio de terceiros. A publicação identificou uma perda de 13,5% sob a forma de resíduos durante o processo de reciclagem. Como produtos finais, a reciclagem de têxteis gera a produção de desfibrados de poliéster[14], desfibrados mil cores[15], enchimento e tecidos em tingimento de índigo 100% algodão. Em sua maior parte, os materiais reciclados são encaminhados para a fabricação de não tecidos (nas indústrias automobilística e de construção civil, além da produção de isolamentos) e decoração. Apenas o insumo composto por materiais 100% algodão é direcionado para a fabricação dos produtos circulares na indústria da moda (Modefica, FGVces e Regenerate, 2020).

A reciclagem têxtil ocorre mediante diferentes processos em virtude do tipo de material. No caso do algodão, sua reciclagem auxilia na redução da poluição e do consumo de recursos naturais, tendo em vista que a indústria algodoeira é intensiva no consumo de água, pesticidas e inseticidas. Como o resíduo de algodão já se encontra tingido, não há necessidade de utilização de corante adicional. A eliminação do processo de tingimento apresenta-se como uma vantagem, uma vez que esta atividade consome elevados volumes de água e produtos químicos (Flanders, 2023).

A reciclagem de algodão pode ser verificada tanto na etapa de pré-consumo quanto na etapa de pós-consumo. No processo de reciclagem mecânica do algodão, inicialmente, os resíduos são segregados por tipo e cor. Os tecidos selecionados são, então, triturados mecanicamente em tiras e, em seguida, desfiados, resultando em fibras mais curtas. A fim de aumentar a resistência e qualidade do fio, frequentemente o algodão reciclado é misturado a novas fibras de algodão, em uma proporção não superior a 30% de algodão reciclado em um tecido novo (Flanders, 2023).

A reciclagem de materiais têxteis apresenta dois importantes desafios técnicos a serem superados, quais sejam: a degradação e a mistura de fibras. Durante a fase de uso da peça, as fibras são lentamente submetidas à degradação pelo atrito, e desgaste, principalmente pela lavagem, reduzindo o comprimento das cadeias de fibras e polímeros. A degradação é, ainda, potencializada pela reciclagem mecânica. Como consequência, fibras com comprimentos mais curtos apresentam menor

[14] Os tecidos desfibrados são misturas de retalhos com PET reciclado ou insumo virgem, como o algodão (Textile Industry, 2016). O desfibrado poliéster é fabricado a partir de resíduos de fiações de poliéster (Fibran do Brasil, s.d.).

[15] O desfibrado mil cores é fabricado a partir de resíduos mistos (FAVA TÊXTIL, 2020).

resistência e qualidade, comprometendo a eficiência da reciclagem em circuito fechado (Peters *et al*., 2014).

Além da degradação, a mistura de fibras constitui o segundo principal desafio à reciclagem têxtil, visto que a alta variabilidade de fios gera dificuldades técnicas como: dificulta o processo de triagem; prejudica a reciclagem mecânica (uma vez que, por exemplo, as fibras de poliuretano tendem a se emaranhar no triturador enquanto as fibras de poliéster, mais resistentes, necessitam de mais energia para serem cortadas); e dificulta a dissolução química e separação, dada a complexidade de ajuste do processo químico para uma fibra mista específica (Peters *et al.*, 2014).

Corroborando para este entendimento, Farooq, Naqvi e Kamil (2022) relatam que a questão tecnológica encontra-se entre as principais causas da limitação da reciclagem de têxteis. A separação das fibras é dificultada pela complexidade de suas misturas, uma vez que a presença de mais de dois tipos diferentes de fibras e mais de 5% de elastano tornam a separação dos fios mais difícil. Além disso, observa-se dificuldade na realização da segregação de corantes, produtos químicos e contaminantes das fibras utilizando os métodos existentes (Farooq, Naqvi e Kamil, 2022).

4.6.4.2 Reciclagem a partir de materiais não têxteis

A mistura de fibras de algodão e poliéster é amplamente utilizada nos tecidos de vestuário. O algodão favorece características como conforto, controle de umidade, porosidade elevada e condução de calor. Já o poliéster confere resistência, secagem rápida e a manutenção da forma. Processos mecânicos não são suficientes para possibilitar a separação e classificação desta mistura de fibras. Para isso, desenvolvimentos recentes na reciclagem de materiais têxteis têm investigado processos de reciclagem química (Wang e Salmon, 2022).

Por meio de atividade enzimática, estas técnicas possibilitam a recuperação do poliéster e da celulose contida no algodão. O resíduo de algodão pode ser empregado na produção de fibras de celulose regeneradas de elevada qualidade, nanocristais de celulose ou biocombustíveis (como, por exemplo, bioteanol e biogás). Por sua vez, o resíduo de poliéster pode ser utilizado na produção de fios coloridos ou ser submetido a um processo de conversão química em seus monômeros purificados para geração do polímero virgem (Wang e Salmon, 2022).

Diversas iniciativas de recuperação de materiais não têxteis já vêm sendo desenvolvidas por organizações privadas. A empresa Ecoalf, originária da Espanha, coleta materiais plásticos de oceanos em 33 portos e desenvolve sapatos, roupas e bolsa a partir do material reciclado. A instituição GumDrop coleta chiclete em Amsterdã para a fabricação de sapatos em parceria com a organização I Amsterdã e a empresa de moda Explicit, em uma taxa de produção de aproximadamente 2,2 kg de chiclete para a fabricação de quatro pares de tênis. Já a empresa californiana de equipamentos para atividades ao ar livre Patagonia utiliza poliéster de garrafas recicladas para a fabricação de jaquetas de lã desde 1993, em colaboração com a empresa de designer têxtil com sede em Massachusetts, Polartec. Além disso, a Patagonia estimula os consumidores a comprarem somente o necessário, e também realiza consertos e reciclagem de itens mais antigos (UNEP, 2018b).

4.6.5 Remanufatura

A estratégia de remanufatura de roupas apresenta poucas aplicações, conforme observado por meio da restrita literatura disponível. Esta técnica ocorre quando a peça passa por algum tipo de operação de transformação em que o produto gerado apresenta desempenho igual ou superior ao original. Exemplos incluem um processo de tingimento da roupa ou a troca de um zíper ou botão. Tais operações conferem uma limitada extensão à vida útil da peça, mas não impedem o seu descarte final em aterros sanitários ou incineradores ao fim deste período.

Para Gwilt (2014 *apud* Avila *et al*., 2018), a técnica conhecida como *upcycling* encontra aplicação na reforma ou remanufatura de peças que já existem.

O *upcycling* converte produtos sem utilidade e descartáveis em novos materiais ou peças com maior valor, uso ou qualidade (Berlim, 2016 *apud* Avila *et al*., 2018). Esta técnica aprimora e agrega valor a um produto ou material que seria descartado. Possibilita o aumento do aproveitamento e do valor dos materiais, ampliando sua vida, ao contrário da reciclagem, a qual pode ocasionar depreciação e diminuição do valor dos materiais ou produtos (Gwilt, 2014 *apud* Avila *et al*., 2018).

Por meio do *upcycling*, é possível a agregação de valor a uma peça de roupa ao serem realizadas pequenas mudanças ou detalhes nas mesmas, ou mesmo ao se desenvolver roupas inteiras a partir de peças usadas, sobras de tecidos, retalhos,

aviamentos ou outros materiais já sem funcionalidade (Gwilt, 2014 *apud* Avila *et al*., 2018).

No *upcycling*, peças de roupas que seguiriam para descarte ou retalhos de tecido são utilizadas para customizar novas peças. Também podem ser reaproveitadas peças com defeitos, agregando valor ao produto em detrimento do seu descarte. Organizações em todo o mundo estão empregando a técnica que transforma peças usadas e reaproveita sobras da produção. Como exemplo, tem-se o caso da transformação de tecidos militares em roupas e acessórios realizada pelo estilista inglês Christopher Raeburn. No Brasil, a empresa COMAS fabrica saiais, vestidos e camisas estilizadas a partir da recuperação de camisas masculinas defeituosas que seguiriam para descarte (Delta Máquinas Têxteis, 2019).

4.6.6 Compartilhamento

A presente pesquisa analisa o serviço de aluguel de roupas sob a ótica da economia de compartilhamento, uma vez que, ao ampliar a quantidade de usos da peça, aumenta-se a eficiência no uso dos recursos naturais já empregados na produção da peça. Ademais, o aluguel de roupas configura-se como uma prática de compartilhamento do uso, acesso e propriedade, reforçando a sua análise enquanto modelo da economia compartilhada.

Colucci e Vecchi (2021) corroboram para essa definição ao verificaram que a empresa Dress You Can, pioneira no mercado italiano de aluguel de moda, foi desenvolvida para criar um espaço físico e virtual para ampliar o compartilhamento de peças entre amigos para um público mais amplo.

O modelo de aluguel de roupas apresenta-se como uma alternativa para a redução do impacto do descarte de roupas sob o argumento de muitos especialistas de que a reciclagem é intensiva em energia, além de não abranger a cultura descartável atual, exemplificada pelo fato de que a quantidade de vezes que uma peça de roupa é utilizada reduziu 36% em quinze anos (UNEP, 2018b).

Dentre as empresas que apesentam pioneirismo neste segmento, destaca-se a holandesa Mud Jeans, que atua no aluguel e jeans orgânicos. Outros exemplos também incluem as empresas Rent the Runway, Girl Meets Dress e YCloset na China (UNEP, 2018b).

Patsy Perry, da Universidade de Manchester, relata que a estratégia de aluguel é claramente uma vencedora no segmento mais alto do mercado, em que os consumidores podem não ter intenção de usar um vestido de ocasião mais de uma vez. No entanto, no segmento mais baixo, o especialista relata a facilidade de compra direta por meio da internet de qualquer tendência ou item (UNEP, 2018b).

Segundo o referido palestrante, o sucesso do aluguel neste nível do mercado depende da oferta de opções suficientes de marcas e estilos de modo que afaste os consumidores da compra direta. Por meio desta estratégia, é possível manter a peça em uso durante um período maior de tempo, reduzindo a utilização de recursos naturais, consequentemente, o impacto ambiental oriundo do descarte de roupas em perfeitos estados, mas indesejadas (UNEP, 2018b).

5 EQUIPAMENTOS ELETROELETRÔNICOS

Nesta seção é apresentada uma caracterização do setor de equipamentos eletroeletrônicos, convergindo para o caso específico do tipo “máquinas de lavar roupa”. Também é descrito um panorama acerca dos artigos publicados no tema. Ademais, são analisados dados relativos à produção e ao consumo de produtos eletroeletrônicos, bem como os impactos ambientais e econômicos associados à geração de seus resíduos, além das suas taxas de reciclagem, Em seguida, é realizada a análise do caso concreto dos equipamentos eletroeletrônicos do tipo máquinas de lavar, momento em que são apresentados a composição deste equipamento e os impactos ambientais ao longo do seu ciclo de vida. Também são avaliadas informações acerca dos volumes de produção e consumo das máquinas de lavar. A subseção é encerrada discorrendo acerca dos desenvolvimentos da economia circular no contexto das máquinas de lavar.

5.1 VISÃO GERAL E ESTRUTURA DO SETOR

O setor de eletroeletrônicos no Brasil alcançou um faturamento de R$ 204,6 bilhões em 2023, resultando em um desempenho de aproximadamente 6% abaixo daquele atingido no ano anterior. O segmento finalizou o referido ano com um total de 265.600 trabalhadores, cerca de 1% abaixo em relação ano anterior. Por sua vez, a produção de bens do segmento em 2023 apresentou um recuo de 10,6% em relação ao ano de 2022. (ABINEE, 2024).

Ainda que a produção física de produtos eletroeletrônicos tenha apresentado retração no ano de 2023 em relação a 2022, projeções da ABINEE (2024) atualizadas em junho de 2024 estimam um crescimento de 4,5% da produção física industrial no ano de 2024 em relação ao período anterior. Diante deste cenário, faz-se necessária a busca por soluções alternativas aos padrões atuais de produção e consumo.

A Diretiva 2012/19/EU do Parlamento Europeu e do Conselho, de 4 de julho de 2012, referente aos resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos (REEE) define os equipamentos elétricos e eletrônicos (EEE) como aqueles que dependem de corrente elétrica ou de campos magnéticos para o seu efetivo funcionamento, assim como os equipamentos que geram, transferem e medem essas correntes e campos,

e projetados para uso com uma tensão nominal que não exceda 1.000 volts para corrente alternada e 1.500 volts para corrente contínua (European Union, 2012).

A Universidade das Nações Unidas (United Nations University) e a iniciativa StEP (Solving the E-Waste Problem) definem os EEE como todo item doméstico ou comercial que possui circuitos ou componentes elétricos com energia ou alimentação por bateria (StEP Initiative e UNU, 2014)

Em seu Anexo III, a Diretiva Europeia 2012/19/EU classifica os EEE em seis categorias, descritas a seguir (European Union, 2012).

1. Equipamentos de troca de temperatura;

2. Telas, monitores e equipamentos contendo telas com superfície maior que 100 cm2;

3. Lâmpadas;

4. Equipamentos de grandes dimensões (com qualquer dimensão externa maior que 50 cm), abrangendo, mas não limitados aos seguintes: eletrodomésticos; equipamentos de tecnologia da informação e telecomunicação; equipamentos de consumo; luminárias; equipamentos de reprodução de sons ou imagens; equipamento musicais; ferramentas elétricas e eletrônicas; brinquedos e equipamentos de lazer e esportes; dispositivos médicos; instrumentos de monitoramento e controle; dispensadores automáticos; equipamentos para geração de correntes elétricas. Esta categoria não abrange equipamentos que constam nas categorias 1 a 3.

5. Equipamentos de pequenas dimensões (em que nenhuma dimensão externa supere 50 cm), abrangendo, mas não se limitando aos seguintes: eletrodomésticos; equipamentos de consumo; luminárias; equipamentos de reprodução de sons ou imagens; equipamentos musicais; ferramentas elétricas e eletrônicas; brinquedos e equipamentos de lazer e esportes; dispositivos médicos; instrumentos de monitoramento e controle; dispensadores automáticos; equipamentos para geração de correntes elétricas. Esta categoria não abrange equipamentos que constam nas categorias 1 a 3 e 6.

6. Equipamentos de tecnologia da informação e telecomunicação de pequenas dimensões (em que nenhuma dimensão externa supere 50 cm).

O Anexo IV da Diretiva 2012/19/EU apresenta uma lista não exaustiva de EEE, dentre os quais, a máquina de lavar é classificada na categoria de equipamentos de grandes dimensões (European Union, 2012).

No Brasil, a Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial (ABDI) relata, ainda, a divisão dos EEE em quatro amplas categorias, descritas a seguir por ABDI, (2013):

a) Linha Branca: refrigeradores e congeladores, fogões, máquinas de lavar roupa e louça, secadoras, condicionadores de ar;

b) Linha Marrom: monitores e televisores de tubo, plasma, LCD e LED, equipamentos de DVD e VHS, aparelhos de áudio, filmadoras;

c) Linha Azul: batedeiras, liquidificadores, ferros elétricos, furadeiras, secadores de cabelo, espremedores de frutas, aspiradores de pó, cafeteiras;

d) Linha Verde: computadores desktop e laptops, acessórios de informática, telefones celulares e tabletes.

No país, o Sistema Nacional de Informações sobre a Gestão dos Resíduos Sólidos (SINIR, s.d.), gerido pelo Ministério do Meio Ambiente, descreve que os equipamentos eletroeletrônicos e seus componentes de uso doméstico são aqueles cujo funcionamento depende da utilização de correntes elétricas com tensão nominal que não exceda 240 volts. Acrescenta, ainda, que esses materiais tornam-se resíduos ao fim de suas vidas úteis, devendo ser gerenciados adequadamente.

Resíduos eletroeletrônicos, ou e-lixo, são conceituados por Step Initiative e UNU (2014) como todos equipamentos eletroeletrônicos e suas peças que foram descartados como lixo pelo proprietário sem a intenção de reutilização.

No mês de outubro de 2019, o Brasil assinou o Acordo Setorial para Implantação de um Sistema de Logística Reversa de produtos eletroeletrônicos domésticos e seus componentes. Este documento estabelece que os fabricantes, distribuidores e comerciantes de produtos eletroeletrônicos são obrigados a estruturar e implementar sistemas de logística reversa, por meio do retorno dos produtos após seu consumo, de modo independente do serviço público de limpeza urbana e de manejo dos resíduos sólidos, de acordo com a PNRS. Também determina que os importadores também possuem a obrigação de estruturar e implementar sistemas de logística reversa, conforme a PNRS (SINIR, 2022a).

Para operacionalizar esse sistema, o referido Acordo Setorial estabeleceu metas anuais para coleta e destinação às organizações que atuam no mercado de eletroeletrônicos. Iniciando no ano de 2021, essas empresas são obrigadas a coletar e destinar nesse ano o equivalente a 1% em peso do que produziram e venderam no ano-base de 2018. A Tabela 4 apresenta as referidas metas, as quais recaem sob o peso total dos produtos colocados no mercado em 2018.

Tabela 4 - Cronograma de implantação do sistema de logística reversa de eletroeletrônicos

Ano	Metas de coleta e destinação
2021	1%
2022	3%
2023	6%
2024	12%
2025	17%

Fonte: adaptado de SINIR, 2022b

O Acordo Setorial prevê que a estruturação e implantação do Sistema de Logística Reversa ocorra no prazo de cinco anos. Determina, ainda, que as metas anuais não são cumulativas. Assim, no quinto ano de implantação, o sistema deverá proceder a coleta e destinação ambientalmente adequada de 17% em peso dos produtos eletroeletrônicos constantes comercializados no mercado nacional de uso doméstico no ano-base (SINIR, 2022a).

O documento determina, também, que 100% dos produtos eletroeletrônicos recebidos devem seguir para destinação final ambientalmente adequada (SINIR, 2022a).

Já o Decreto nº 10.240, de 12 de fevereiro de 2020, determina normas para a implementação de um Sistema de Logística Reversa obrigatória de produtos eletroeletrônicos de uso doméstico e seus componentes. Dentre os eletroeletrônicos objetos do sistema de que trata esse decreto, encontram-se as máquinas de lavar roupa (Brasil, 2020).

Em seu Anexo II, o referido decreto apresenta um cronograma para o alcance de metas anuais de coleta e destinação final no período de 2021 a 2025. Essas metas são as mesmas estabelecidas no Acordo Setorial para Implantação de um Sistema de

Logística Reversa de produtos eletroeletrônicos domésticos e seus componentes, apresentadas na Tabela 4.

5.2 ESFORÇOS DE PESQUISA ACADÊMICA NO DOMÍNIO DA ECONOMIA CIRCULAR

Uma pesquisa foi realizada na base de dados Web of Science com o objetivo de identificar a bibliografia relevante acerca da aplicação da economia circular na indústria têxtil. Os limites de busca utilizados encontram-se descritos no Quadro 6.

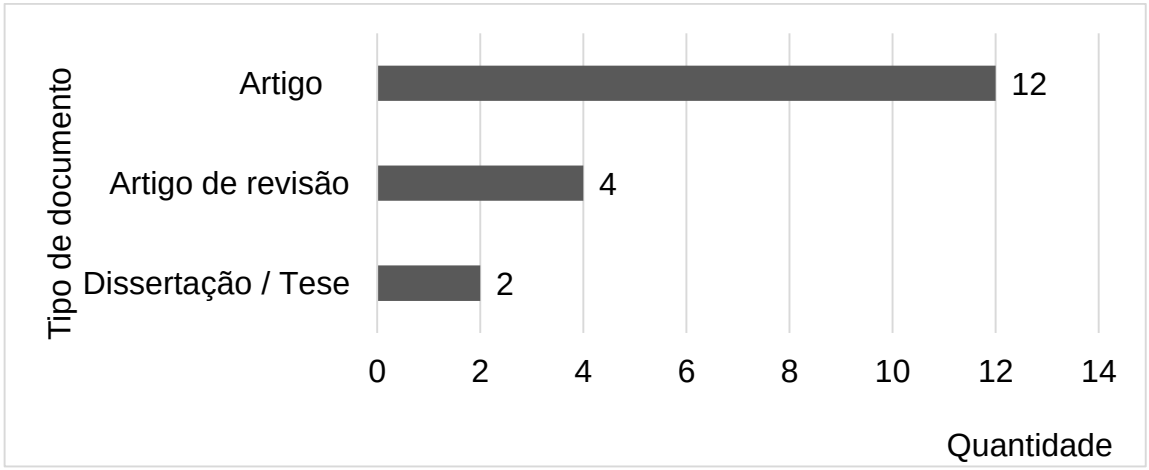
Quadro 6 - Filtros de pesquisa na base Web of Science

Pesquisar em:	All data bases
Coleções:	All
Título:	“circular economy” and “electrical and electronic equipment”
Data de publicação:	2018-01-01 até 2022-12-31

Fonte: elaboração própria (2024)

Esta pesquisa retornou 14 resultados, compostos pelos seguintes documentos apresentados na Figura 32. Observa-se que os 4 artigos de revisão também estão computados na categoria de artigos.

Figura 32 - Tipos de documentos no período analisado

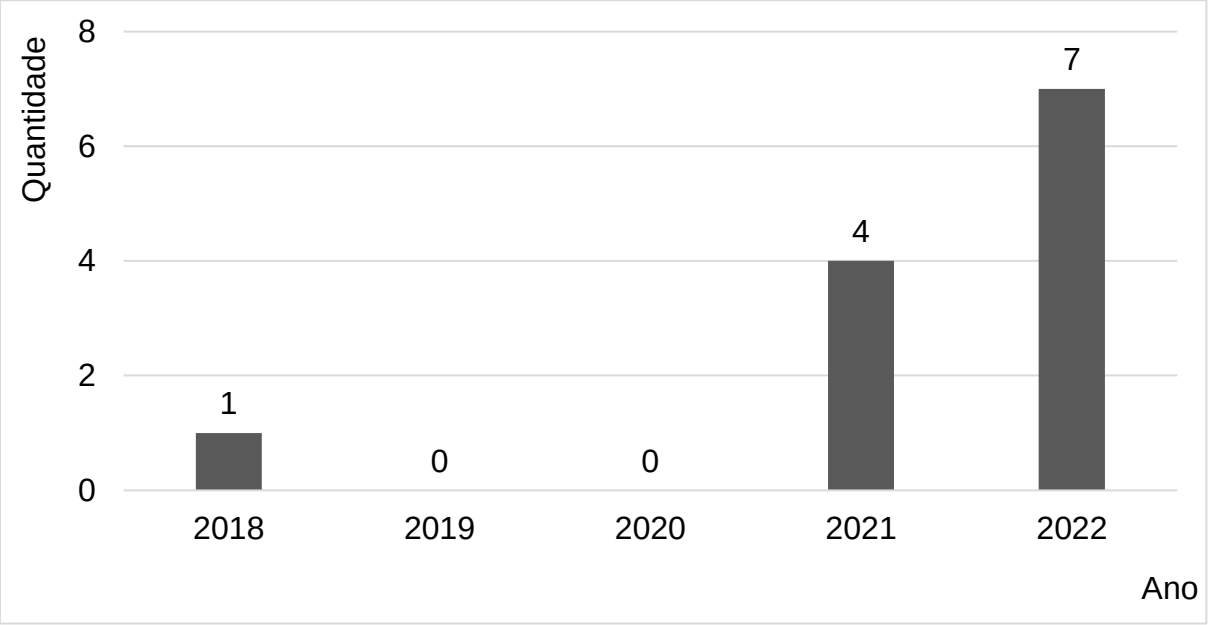


Fonte: elaboração própria (2024)

Ao refinar a amostra obtida por tipo de documento e excluindo o caráter de duplicidade presente, foram selecionados somente aqueles categorizados como artigos. Desta forma, a pesquisa retornou 12 resultados, todos constantes da Coleção principal da Web of Science.

A Figura 33 apresenta a distribuição dos 12 artigos publicados ao longo dos cinco anos relacionados à “circular economy” e “electrical and electronic equipment”. É possível verificar que o ano de 2022 foi aquele que apresentou maior quantidade de artigos publicados no período (isto é, 7 artigos), com um aumento de 75% em relação à quantidade de publicações no ano anterior.

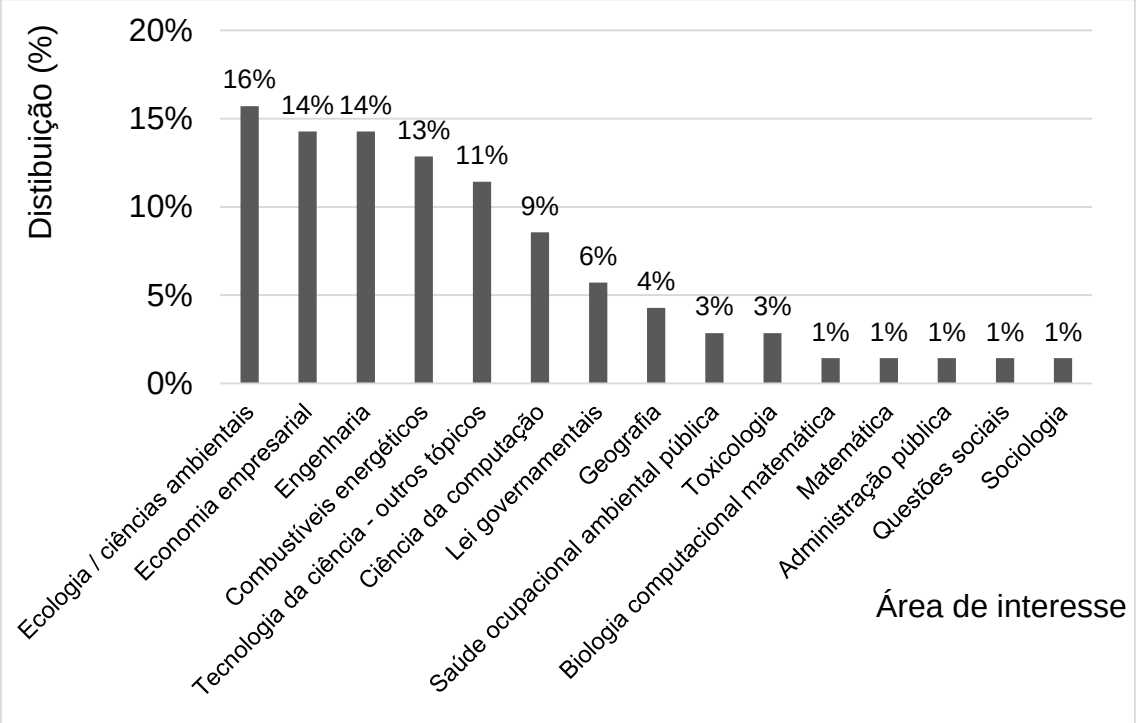
Figura 33 - Quantidade de artigos publicados por ano



Fonte: elaboração própria (2024)

Ao observar a distribuição dos artigos identificados por área de interesse, por meio da Figura 34, é possível verificar que as áreas que concentram as maiores quantidades de pesquisas sobre economia circular no tema dos eletroeletrônicos são as seguintes: ecologia / ciências ambientais (16,0% das publicações), economia empresarial (14,0% das publicações), engenharia (14,0% das publicações), combustíveis energéticos (13,0% das publicações) e outros tópicos de tecnologia da ciência (11,0% das publicações).

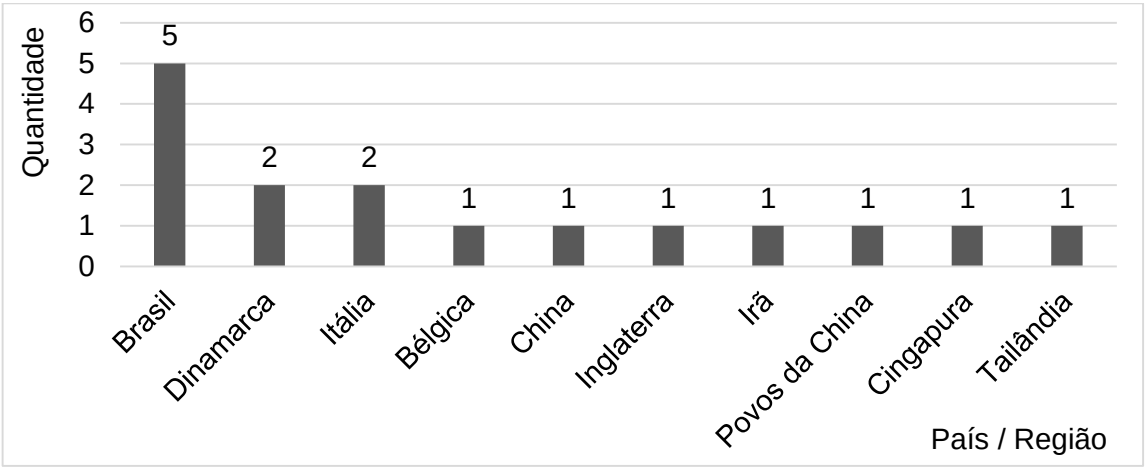
Figura 34 - Distribuição percentual dos artigos publicados por área de interesse



Fonte: elaboração própria (2024)

A Figura 35 apresenta a distribuição dos artigos publicados por país ou região. É possível observar que o Brasil encontra-se na primeira posição dentre os países com artigos publicados na área.

Figura 35 - Distribuição dos artigos publicados por países / regiões



Fonte: elaboração própria (2024)

Ao restringir a pesquisa da economia circular às máquinas de lavar, conforme sintetizado no Quadro 7, não foi obtido qualquer resultado.

Quadro 7 - Filtros de pesquisa na base Web of Science

Pesquisar em:	All data bases
Coleções:	All
Título:	“circular economy” and “washing machine”
Data de publicação:	2018-01-01 até 2022-12-31

Fonte: elaboração própria (2024)

Ampliando-se a pesquisa das palavras-chave do “Título” para o “Abstract” (conforme demonstrado no Quadro 8), foram identificados 9 resultados, dos quais 8 estão categorizados como artigos, enquanto 1 configura-se como patente. Dos 8 artigos selecionados, observou-se que um datava de novembro de 2017, sendo, portanto, excluído da amostra, restando 7 resultados.

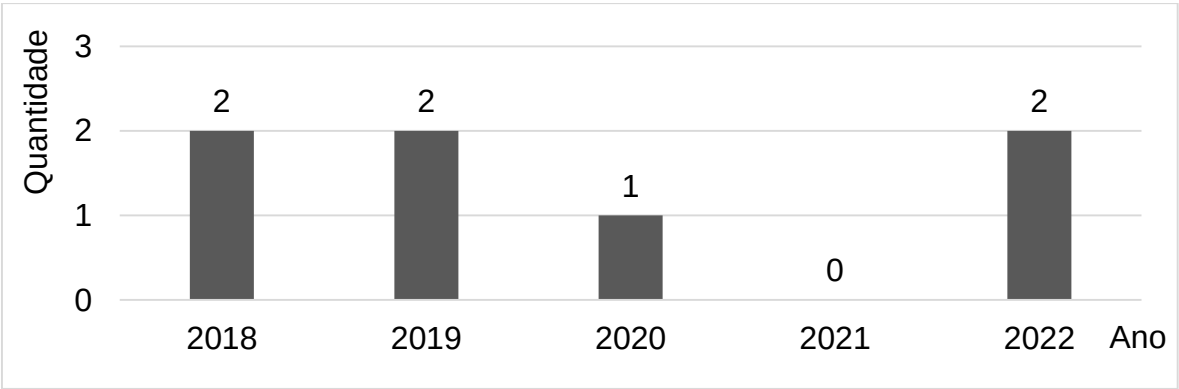
Quadro 8 - Filtros de pesquisa na base Web of Science

Pesquisar em:	All data bases
Coleções:	All
Abstract:	“circular economy” and “washing machine”
Data de publicação:	2018-01-01 até 2022-12-31

Fonte: elaboração própria (2024)

Na Figura 36, em que é apresentada a distribuição das publicações dos 7 artigos ao longo do tempo, observa-se uma diminuição em 2020 e uma descontinuidade em 2021, possivelmente motivada pelos efeitos negativos produzidos pela pandemia de Covid-19 na sociedade e academia nesse período.

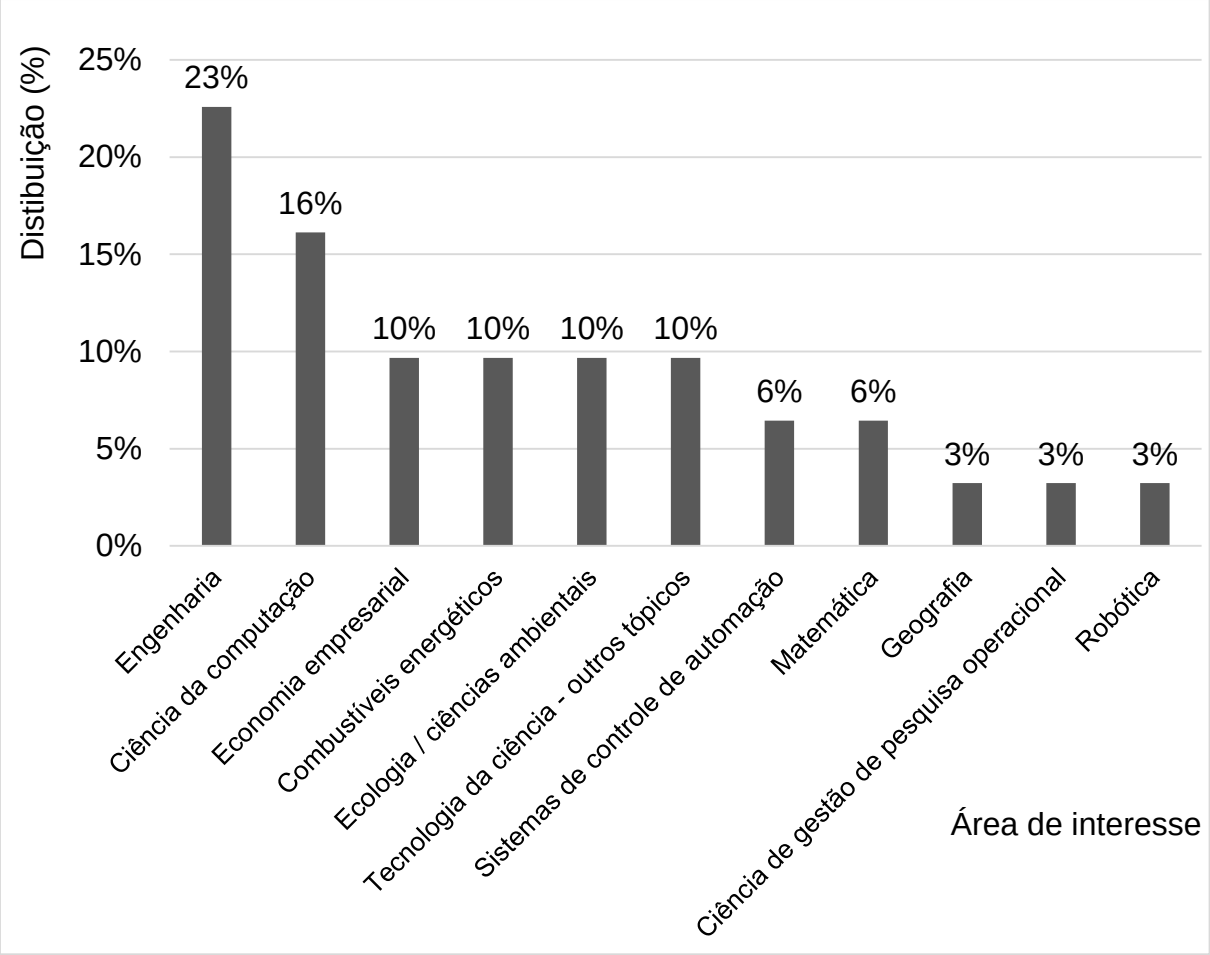
Figura 36 - Quantidade de artigos publicados por ano



Fonte: elaboração própria (2024)

A distribuição dos artigos identificados por área de interesse, demonstrada por meio da Figura 37, permite verificar as seguintes áreas que concentram maior quantidade de pesquisas sobre economia circular no tema das máquinas de lavar: engenharia (23,0% das publicações), ciência da computação (16,0% das publicações), economia empresarial (10,0% das publicações), combustíveis energéticos (10,0% das publicações), ecologia / ciências ambientais (10,0% das publicações), e outros tópicos da tecnologia da ciência (10,0% das publicações).

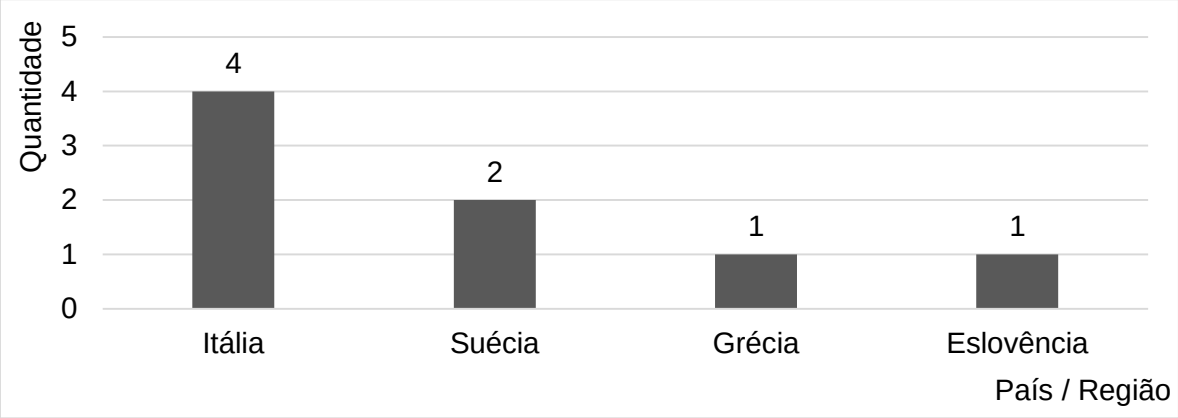
Figura 37 - Distribuição percentual dos artigos publicados por área de interesse



Fonte: elaboração própria (2024)

Por meio da análise da Figura 38, é possível observar que a Itália apresentou-se como o país com a maior quantidade de artigos publicados no tema no período (contando com 4 artigos), seguida pela Suécia (com 2 artigos), Grécia e Eslovênia (com 1 artigo, cada).

Figura 38 - Distribuição dos artigos publicados por países / regiões



Fonte: elaboração própria (2024)

Assim como na pesquisa aplicada aos materiais têxteis, os critérios de busca utilizados na pesquisa em questão foram considerados suficientes, uma vez que abrangem publicações restritas a uma limitação temporal recente (e, portanto, com informações mais atualizadas) e concentradas nos seus títulos (isto é, aumentando a convergência com o estudo proposto).

Para além dos limites de busca utilizados (quais sejam, o recorte temporal de cinco anos e a pesquisa somente no título das publicações), também foi realizada uma pesquisa livre com os termos “circular economy” AND “electrical and electronic equipment”, em qualquer campo e sem limitação de data de publicação. Esta pesquisa conduziu a 313 publicações, com datas que iniciam no ano de 2010 (com 3 ocorrências) a janeiro de 2025 (com 4 ocorrências). Este cenário permite inferir que o estudo acadêmico da economia circular aplicada equipamentos eletroeletrônicos é relativamente recente.

5.3 PRODUÇÃO E CONSUMO DE EQUIPAMENTOS ELETROELETRÔNICOS

Dados do relatório The Global E-waste Monitor 2024, publicado pelos institutos United Nations Institute for Training and Research (UNITAR), International Telecommunication Union (ITU) e Fondation Carmignac, de autoria de Baldé *et al*. (2024) indicam que a produção global de EEE aumentou de 62 milhões de toneladas em 2010 para 96 milhões de toneladas em 2022, além de uma previsão de aumento para 120 milhões de toneladas em 2030. Esse relatório também indica que a

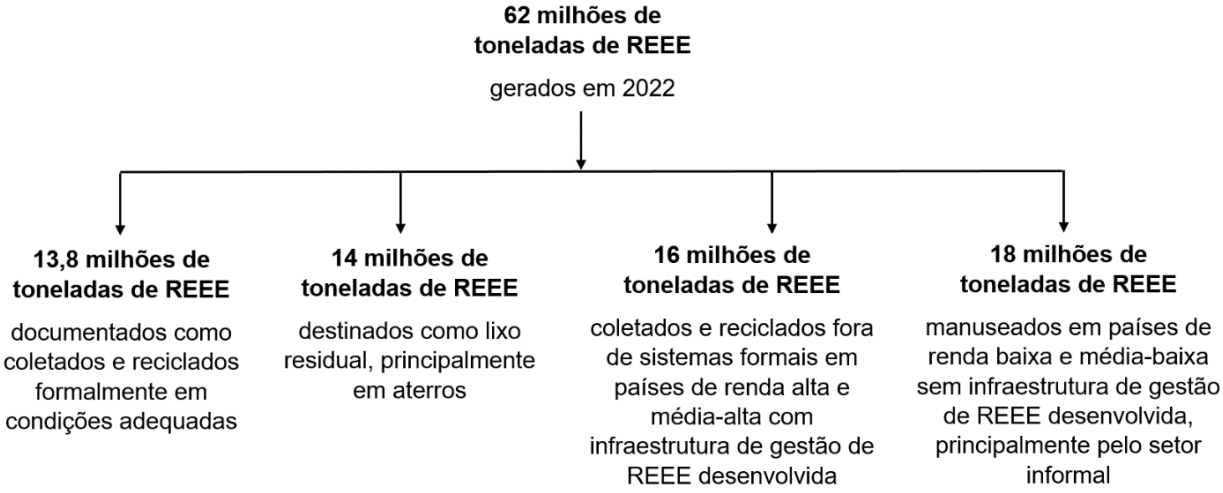
quantidade de equipamentos eletroeletrônicos e seus resíduos vem aumentando, mas as taxas de coleta e reciclagem não acompanham esse crescimento.

A geração mundial de REEE foi de 62 milhões de toneladas no ano de 2022, o que representa uma média anual de 7,8 kg por pessoa. No entanto, somente 13,8 milhões de toneladas (isto é, 22,3%) dos resíduos gerados seguiram documentados como formalmente para coleta e reciclagem. No ano de 2010, a geração mundial foi de 34 milhões de toneladas de REEE (em uma taxa de crescimento aproximada de 54,8% no período de 2010 a 2022, a mesma observada para a geração de EEE no mesmo período), enquanto a quantidade documentada formalmente coletada e reciclada foi de 8 milhões de toneladas (Baldé *et al*., 2024).

Portanto, a geração de REEE cresce cinco vezes mais rapidamente do que a coleta e reciclagem formais. Este cenário é impulsionado por fatores como: progresso tecnológico, maior consumo, opções de reparo limitadas, curtos ciclos de vida dos produtos, crescente eletrificação da sociedade, e infraestrutura inadequada de gestão de REEE (Baldé *et al*., 2024).

A Figura 39 permite observar as rotas de gerenciamento de REEE em 2022. Enquanto 13,8 milhões de toneladas do total gerado de REEE em 2022 estão documentadas como coletadas e recicladas de forma ambientalmente correta, estima-se que 16 milhões de toneladas de REEE foram coletados e reciclados fora de sistemas formais em países de renda alta e média-alta dotados de infraestrutura de gestão de REE desenvolvida, e que 18 milhões de toneladas de REEE foram manuseados em países de renda baixa e média-baixa sem infraestrutura de gerenciamento de REEE desenvolvida, principalmente pelo setor informal. Por fim, as estimativas indicam que 14 milhões de toneladas de REEE foram descartados como lixo residual, majoritariamente, em aterros em todo o planeta (Baldé *et al*., 2024).

Figura 39 - Fluxo dos REEE gerados em 2022



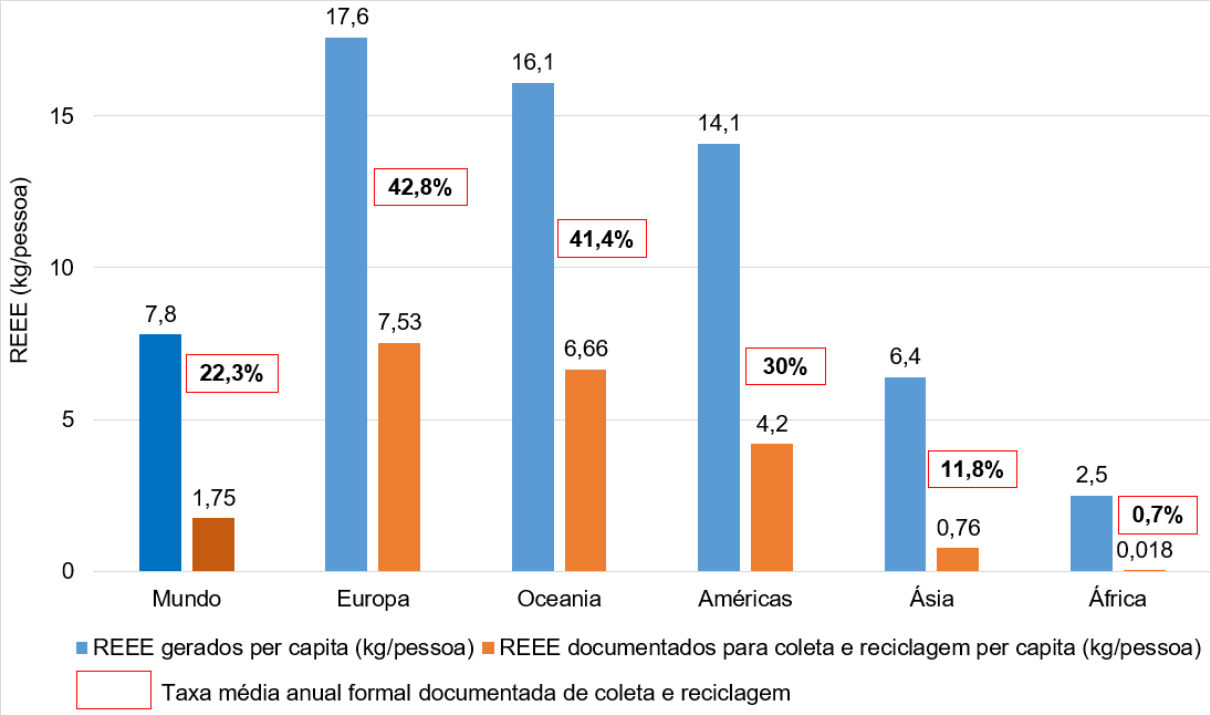
Fonte: adaptado de Baldé *et al.* (2024)

Portanto, a maioria dos REEE produzidos é gerenciada fora dos processos formais de coleta e reciclagem. Como consequência, tem-se o lançamento direto na natureza anual de 58 toneladas de mercúrio e 45 mil toneladas de plásticos contendo retardadores de chama bromados, impactando negativamente a saúde humana e o meio ambiente (Baldé *et al*., 2024).

Como exemplo de gerenciamento de REEE fora dos processos formais de coleta e reciclagem, Gana, país africano, é conhecido como um dos maiores “cemitério de eletrônicos” do mundo. O lixão a céu aberto recebe centenas de milhares de toneladas de lixo eletrônico anualmente, provenientes da Europa e da América do Norte, gerando danos à saúde dos catadores informais que atuam na região (BBC News Brasil, 2016).

A geração, coleta e reciclagem de REEE no mundo ocorrem de forma heterogênea, isto é, diferindo em cada região. A Figura 40 demostra que a Europa é o continente com a maior geração per capita de REEE (contando com 17,6 kg/pessoa) e maior quantidade de REEE documentados para coleta e reciclagem (7,53 kg/pessoa), acarretando a maior taxa formal documentada de coleta e reciclagem (42,8%). Já o continente africano conta com as quantidades mais baixas de REEE gerados (2,5 kg/pessoa) e documentados para coleta e reciclagem (0,018 kg/pessoa), e, portanto, a menor taxa formal documentada de coleta e reciclagem (somente 0,7%).

Figura 40 - Quantidades de REEE gerados e documentados como formalmente coletados e reciclados por região

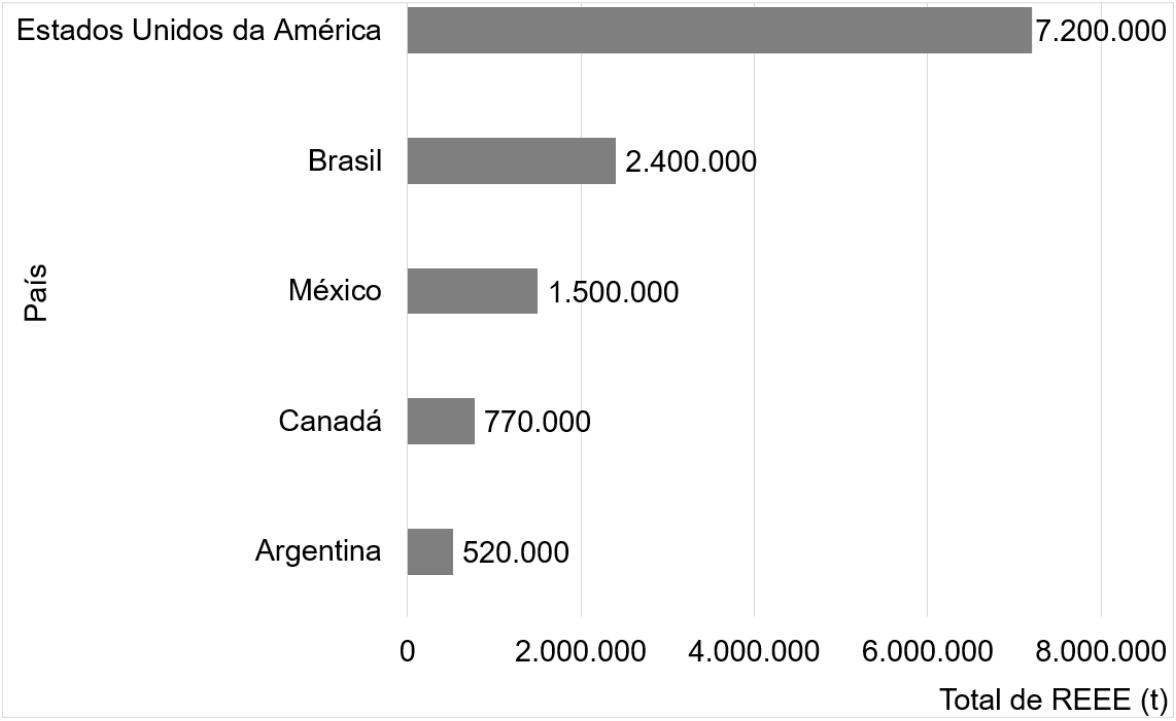


Fonte: adaptado de Baldé *et al.* (2024)

No continente americano (que abrange os países da América do Sul, América Central, América do Norte e Caribe), foram colocados no mercado 19 milhões de toneladas de equipamentos eletroeletrônicos no ano de 2022. Neste mesmo período, o continente gerou um total de 14 milhões de toneladas de REEE, o equivalente a 14,1 kg/pessoa. Somente 30% dos REEE gerados (isto é, 4,3 milhões de toneladas) foram documentados como formalmente coletados e reciclados (Baldé *et al.*, 2024).

A Figura 41 permite observar que, do total de REEE gerados nas Américas, os Estados Unidos da América apresentam-se como o país com a maior geração desse tipo de resíduo na região, com 7,2 milhões de toneladas produzidas em 2022. A segunda posição na lista é ocupada pelo Brasil (com uma geração aproximada de 2, 4 milhões de toneladas no mesmo ano), seguido pelo México, Canadá e Argentina (com, respectivamente, 1,5 milhão, 770 mil, 520 mil toneladas em 2022).

Figura 41 - Países com maior geração de REEE nas Américas



Fonte: adaptado de Baldé *et al.* (2024)

Nos Estados Unidos da América, a organização Basel Action Network implantou rastreadores GPS em 205 equipamentos eletrônicos e os encaminhou para unidades de reciclagem no país. A pesquisa concluiu que 40% dos produtos entregues nas recicladoras seguiram para o exterior. Estima-se que 96% das exportações sejam ilegais. Os resultados apontam, ainda, que 93% das exportações de resíduos eletroeletrônicos dos Estados Unidos da América foram efetuadas para países em desenvolvimento (BAN, 2016).

Dados da Associação Brasileira de Reciclagem de Eletroeletrônicos e Eletrodomésticos (ABREE) demostram que, no ano de 2022, as empresas associadas venderem 1.095.743 toneladas de eletroeletrônicos e eletrodomésticos[16]. Apesar da meta de coleta e destinação adequada determinada no Decreto nº 10.240 de 2020 ser de 3% em peso de eletroeletrônicos e eletrodomésticos comercializados no ano-base de 2018 (o que equivaleria à meta de 32.872 toneladas de resíduos de equipamentos

[16] ABREE (2022) utiliza o termo “eletroeletrônicos e eletrodomésticos”, definindo-os como “aqueles cujo funcionamento está atrelado ao uso de corrente elétrica ou de campos eletromagnéticos. No entanto, o Decreto nº 10.520 de 12 de fevereiro de 2020, que regulamente o tema no Brasil, trata da implementação de sistema de logística reversa de produtos eletroeletrônicos e seus componentes de uso doméstico, não distinguindo eletrodomésticos.

eletroeletrônicos coletados), foram coletadas, efetivamente, 15.350 toneladas desses resíduos em 2022, representando cerca de 1,4% da meta anual. Ainda assim, 100% dos resíduos coletados de eletroeletrônicos e eletrodomésticos pós-consumo seguiram para destinação final adequada, prioritariamente, a reciclagem (ABREE, 2022).

Em relação à geração de REEE, Baldé *et al.* (2024) indicam que no ano de 2022, foram geradas 2.443.000 toneladas de REEE no Brasil. Os autores relatam, ainda, que o país é o maior gerador de REEE da América do Sul.

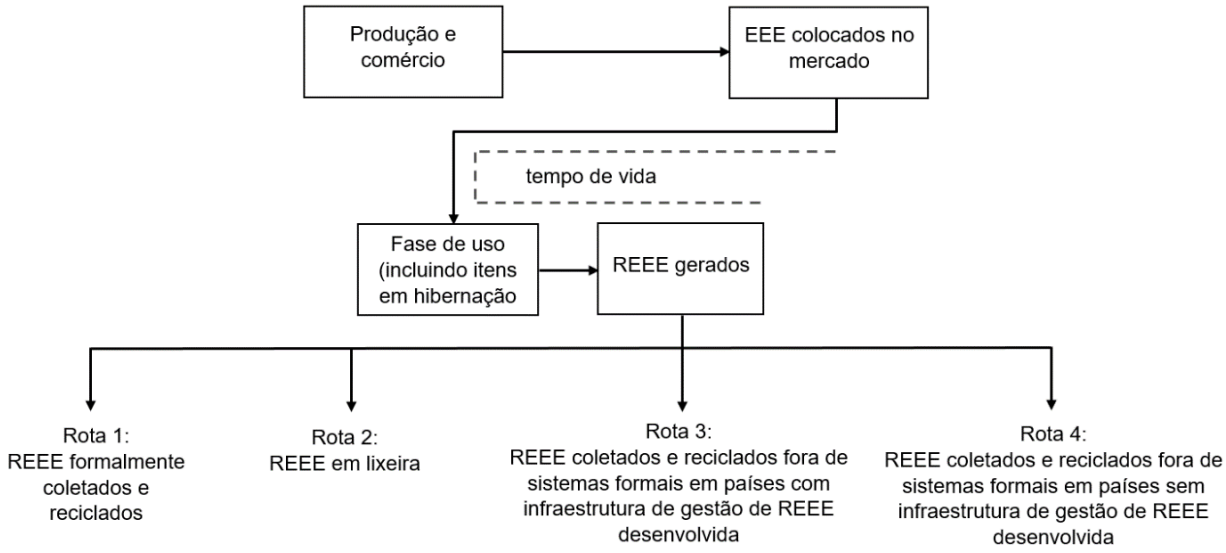
Observa-se que a geração de REEE relatada por Baldé *et al.* (2024) é superior em mais de 100% à produção de equipamentos eletroeletrônicos de 1.095.743 toneladas descrita por ABREE (2022) no ano de 2022, demonstrando a importância de busca por alternativas sustentáveis aos modelos atuais de produção e descarte desses materiais.

A partir da geração total de REEE no Brasil relatada por Baldé *et al.* (2024) e considerando os dados do Censo 2022 (IBGE, 2022a), que indicam um total populacional de 203.080.756 indivíduos no país no referido ano, é possível estimar a geração per capita de REEE em 12,03 kg/pessoa no Brasil em 2022.

A Figura 42 apresenta a dinâmica de fluxos de EEE e REEE. Quando o REEE é descartado pelo seu proprietário, inicia-se o seu processo de gerenciamento. Sua gestão abrange as etapas de coleta, pré-tratamento (que consiste em atividades de despoluição, desmontagem, trituração, classificação ou limpeza e reparação) e tratamento final (consistindo em atividades de preparo para reutilização, reciclagem ou outra recuperação). A primeira etapa (isto é, a coleta) é determinante na gestão de REEE, sendo possível verificar quatro principais rotas de gerenciamento desses resíduos (Baldé *et al.*, 2024).

Tais rotas são detalhadas nas Figuras 43 a 46. Cabe informar que os fluxos apresentam as principais estatísticas relativas ao ano de 2022, não se propondo a representar correntes de massa balanceadas.

Figura 42 - Fluxos de EEE e REEE



Fonte: adaptado de Baldé *et al.* (2024)

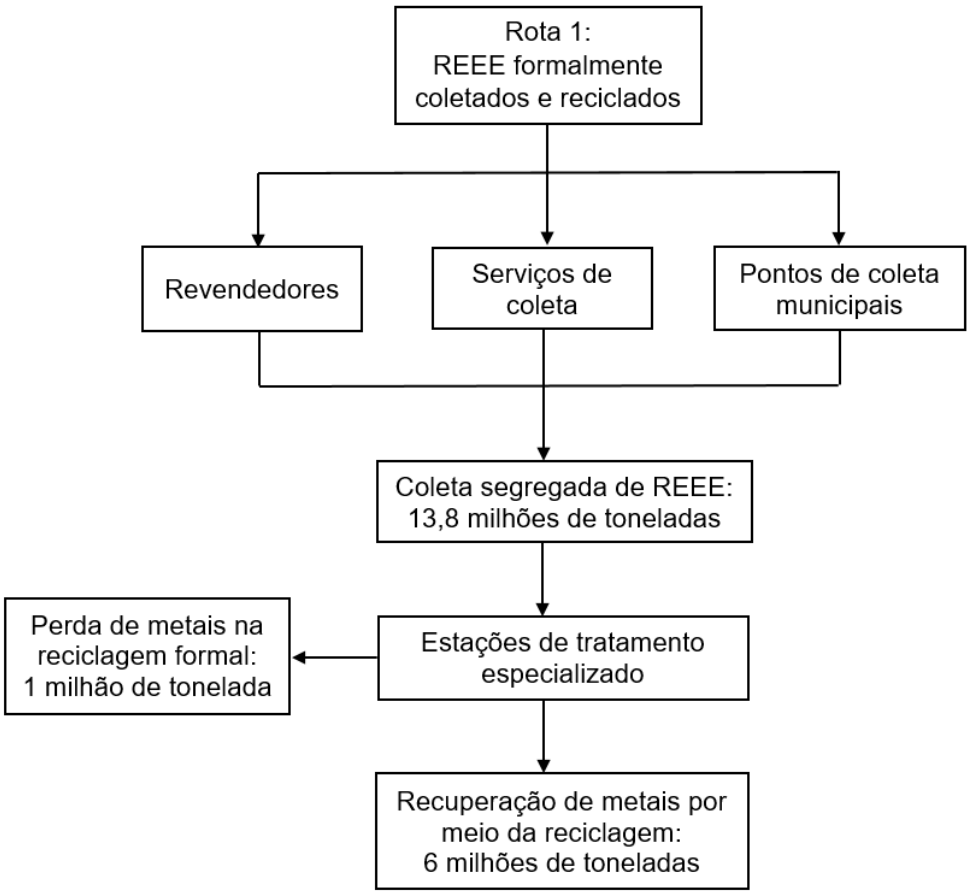
A Figura 43 apresenta a rota 1, a qual corresponde à coleta e reciclagem formais de REEE. Nesta configuração, organizações, produtores e/ou o governo são responsáveis pela arrecadação de REEE por meio de varejistas, serviços de coleta ou pontos de coleta municipais, culminando na coleta de 13,8 milhões de toneladas de REEE em 2022. Na sequência, os REEE coletados são encaminhados a estações de tratamento especializado, que contam com adequados sistemas de gestão de substâncias perigosas e onde ocorre a recuperação de materiais com elevado valor em um ambiente controlado. Nessas instalações, os materiais são preparados para reutilização. Também é neste local que ocorre o desmonte de componentes perigosos e valiosos para despoluição e/ou recuperação de materiais. Já o restante dos materiais é triturado e segregado, antes de ser encaminhado para recuperação de energia e materiais (Baldé *et al.*, 2024).

No ano de 2022, um total de 6 milhões de toneladas de metais retornaram à economia por meio da reciclagem nessas instalações. Quaisquer resíduos resultantes são enviados à incineração ou aterro controlado, culminando em uma perda de 1 milhão de tonelada de metais durante a reciclagem formal de REEE em virtude de recuperação inviável (Baldé *et al.*, 2024).

A rota 1, descrita na Figura 43, apresenta-se como o processo de gestão de REEE mais eficiente e ambientalmente adequado. Ainda assim, em 2022, apenas

22,3% do total mundial de REEE gerado foi gerenciado deste modo. O principal desafio observado consiste no desenvolvimento de sistemas eficazes de coleta, de modo a aumentar a taxa de coleta (Baldé *et al.*, 2024).

Figura 43 - Coleta e reciclagem formais de REEE

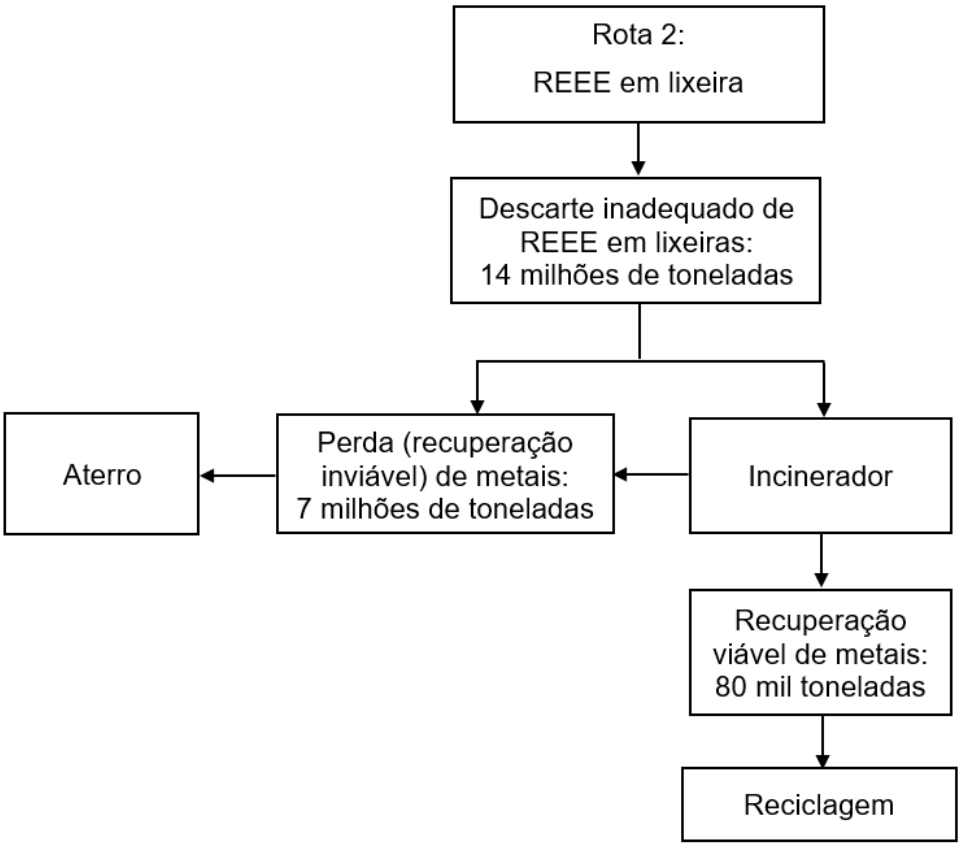


Fonte: adaptado de Baldé *et al.* (2024)

A rota 2 é apresentada na Figura 44 e ilustra o descarte inadequado de REEE em lixeiras, estimado em 14 milhões de toneladas de REEE em todo o mundo no ano de 2022. Os REEE de pequeno porte, como lâmpadas e pequenos equipamentos de tecnologia da informação, seguem, muitas vezes com o resíduo doméstico regular. Já resíduos de maior porte são potencialmente incinerados ou descartados em aterros sem reciclagem prévia. Alguns países de renda alta utilizam métodos como separação magnética ou reciclagem das cinzas residuais provenientes da incineração para recuperar metais. Um total de 80 mil toneladas de metais são recuperados deste modo. No entanto, 7 milhões de toneladas são perdidos na incineração ou em aterros (Baldé *et al.*, 2024).

Desta forma, o modelo de descarte representado na Figura 44, além de gerar potenciais impactos negativos ao meio ambiente, acarreta elevadas perdas de recursos naturais, sendo proibida pela maioria da legislações sobre REEE (Baldé *et al.*, 2024).

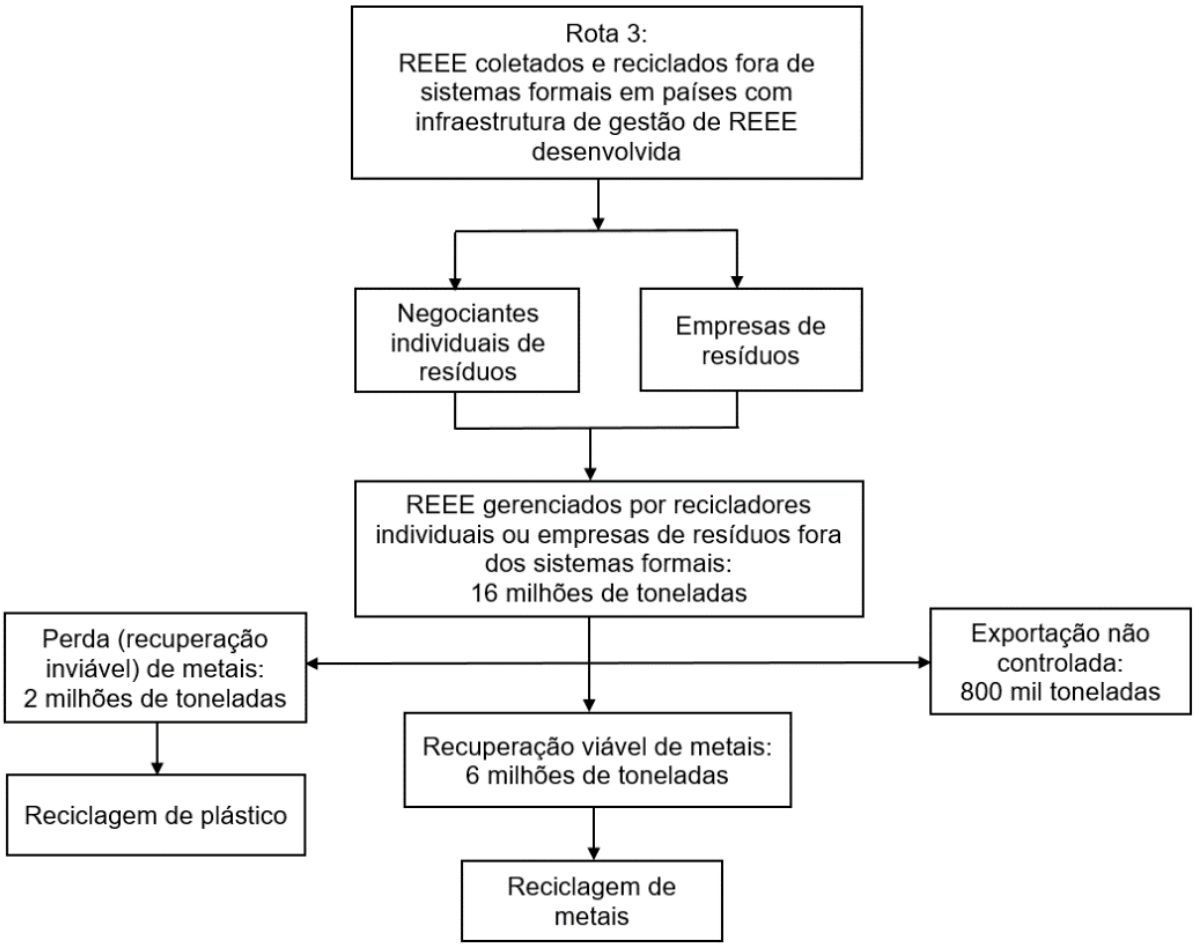
Figura 44 - Descarte de REEE juntamente com os resíduos comuns



Fonte: adaptado de Baldé *et al.* (2024)

A rota 3 é apresentada na Figura 45 e demonstra as atividades de coleta e reciclagem de REEE fora dos sistemas formais em países dotados de infraestrutura de gestão desses resíduos, estimadas em 16 milhões de toneladas de REEE em 2022, gerenciadas por revendedores individuais ou companhias que realizam a atividade de coleta fora do ambiente formal. Os REEE coletados podem ser comercializados mediante canais variados, como por meio da reciclagem de metal ou plástico (ainda que as substâncias perigosas não sejam devidamente despoluídas) ou exportados como resíduos não controlados ou EEE usados para países de renda baixa ou média-baixa desprovidos de infraestrutura de gestão adequada (alternativa que conduz à perda de recursos e à degradação ambiental) (Baldé *et al.*, 2024).

Figura 45 - Coleta e reciclagem informais de REEE em países com infraestrutura de gestão de REEE



Fonte: adaptado de Baldé *et al.* (2024)

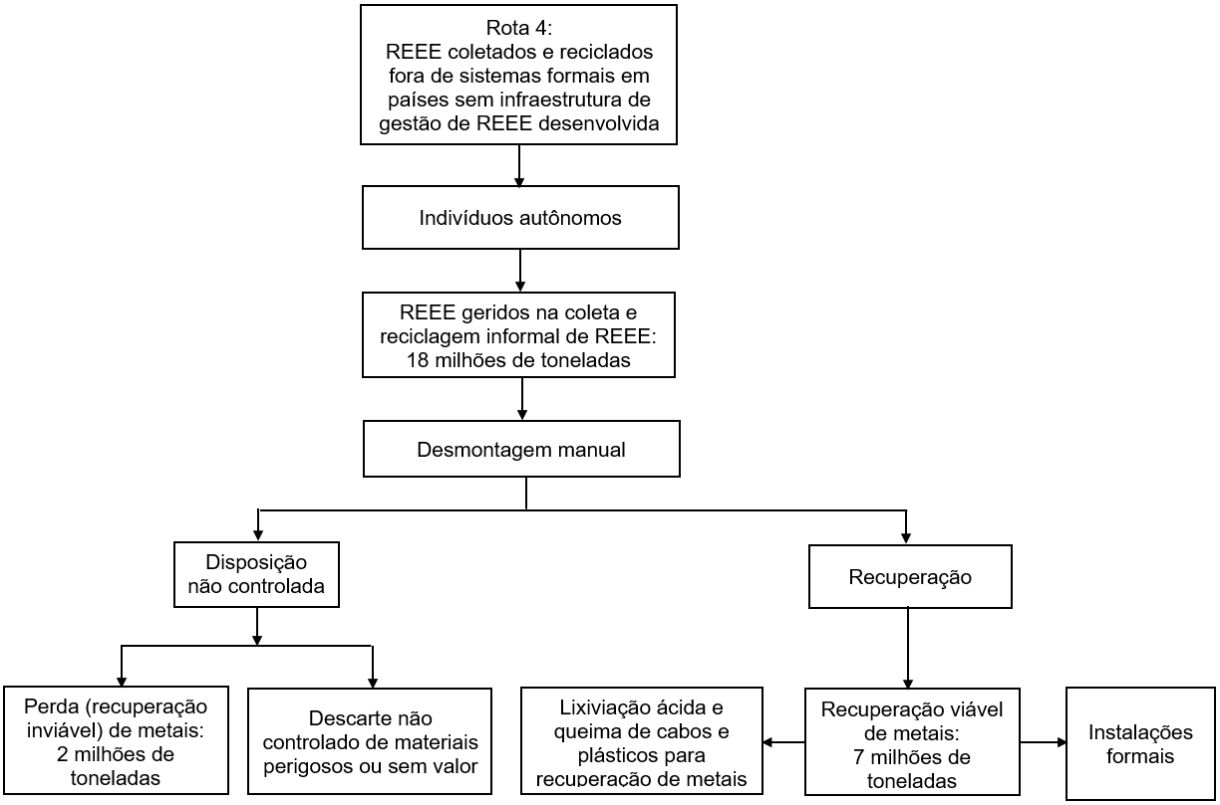
Por fim, a rota 4, apresentada na Figura 46, ilustra as atividades de coleta e reciclagem de REEE fora dos sistemas formais em países desprovidos de infraestrutura de gestão desses resíduos. Em muitos países de renda baixa e média-baixa, trabalhadores independentes coletam EEE usados ou REEE no método de porta-a-porta de residências, empresas e instituições pública e comercializam para reparo, reforma ou desmontagem (Baldé *et al.*, 2024).

Nesta rota, os equipamentos são quebrados manualmente para a obtenção de materiais e componentes que tenham valor comercial. Em seguida, a reciclagem é feita por meio de atividades de queima, lixiviação e fusão para a obtenção de matérias-primas secundárias. Esta chamada “reciclagem de quintal” gera emissões ambientais, conduzindo ao aumento da poluição ambiental e danos à saúde, além da perda de recursos. Há casos em que recicladores de REEE em países de renda elevada compram as frações valiosas oriundas dos coletores e recicladores informais, e

recuperam os componentes em instalações formais, possibilitando que estas frações sejam tratadas de modo ambientalmente adequado (Baldé *et al.*, 2024).

Dos 18 milhões de toneladas de REEE gerenciados por meio da rota 4 em 2022, estima-se que foram recuperados 7 milhões de toneladas de metais (Baldé *et al.*, 2024).

Figura 46 - Coleta e reciclagem informais de REEE em países sem infraestrutura de gestão de REEE



Fonte: adaptado de Baldé *et al*. (2024)

5.4 GERAÇÃO DE RESÍDUOS ELETROELETRÔNICOS E SEUS IMPACTOS

Esta seção aborda os impactos ambientais e econômicos decorrentes dos resíduos de equipamentos eletroeletrônicos gerados.

5.4.1 Impactos ambientais

Estima-se que a quantidade total de REEE gerada em 2022 continha 31 milhões de toneladas de metais, 17 milhões de toneladas de plásticos, e 14 milhões

de toneladas de outros materiais (isto é, minerais, vidro, materiais compósitos, entre outros). Do total de metais contidos nos REEE, aproximadamente 19 milhões foram recuperados de forma viável e, desta forma, retornaram à circulação (Baldé *et al*., 2024).

A Tabela 5 apresenta os metais presentes no REEE e as suas taxas de recuperação de acordo com as práticas atuais de gestão no ano de 2022. O elemento ferro é o metal mais presente (com aproximadamente 24 milhões de toneladas), seguido por alumínio e cobre (com cerca de 4 milhões e 2 milhões de toneladas, respectivamente). Esses elementos, juntamente com o níquel (cuja quantidade presente nos REEE é de 520 mil toneladas) e outros metais (com 460 mil toneladas presentes nos REEE), correspondem a cerca de 60% dos metais recuperados.

A Tabela 5 também demonstra a presença de 70 mil toneladas de chumbo, elemento que apresenta elevada toxicidade à saúde e ao meio ambiente. Além disso, metais de alto valor econômico (como prata, ouro, paládio, ósmio, platina, irídio, ródio e rutênio) também estavam presentes nos REEE, totalizando cerca de 1.600 toneladas. No entanto, a taxa de recuperação desses metais é de somente 20%, o que corresponde a, aproximadamente, 322 toneladas recuperadas em 2022.

Tabela 5 - Metais presentes e recuperados nos REEE

	Metal	Quantidade contida nos REEE (t)	Metais recuperados (%)
Metais totais nos REEE	Ferro (Fe)	24 milhões	60%
	Alumínio (Al)	4 milhões	
	Cobre (Cu)	2 milhões	
	Níquel (Ni)	520 mil	
	Outros	460 mil	
Outros metais nos REEE	Zinco (Zn)	280 mil	4%
	Chumbo (Pb)	70 mil	
	Estanho (Sn)	44 mil	
	Cobalto (Co)	34 mil	
	Antimônio (Sb)	28 mil	
	Outros	2 mil	
Metais preciosos nos REEE	Prata (Ag)	1,2 mil	20%
	Ouro (Au)	270	
	Paládio (Pd)	120	
	Ósmio (Os)	12	
	Platina (Pt), Irídio (Ir), Ródio (Rh) e Rutênio (Ru)	9	

Fonte: adaptado de Baldé *et al.* (2024)

O gerenciamento adequado de REEE contribui não somente para a recuperação de matérias-primas, como também para evitar a geração de emissões de GEE. Por outro lado, sistemas de gestão de REEE ambientalmente inadequados geram impactos negativos à população, ao meio ambiente e à economia, incluindo o preço pago pela sociedade ao longo do tempo e os custos de externalidades de saúde e ambientais advindos de substâncias perigosas não gerenciadas e emissões geradas (Baldé *et al*., 2024).

Baldé *et al (2024)* relatam que a reciclagem, ou mineração urbana, possibilita o retorno de matérias-primas secundárias à economia e diminui a demanda pela mineração primária. Os autores descrevem, ainda, que a produção de matéria-prima secundária oriunda da reciclagem de REEE evitou a escavação de 900 milhões de toneladas de minérios e de 52 milhões de toneladas de emissões de CO_2 equivalente no ano de 2022.

Dentre o total de 900 milhões de toneladas de minérios não escavados, destacam-se a recuperação de cobre, ouro, ferro e paládio, com, respectivamente, cerca de 50%, 20%, 10% e 5% (Baldé *et al*., 2024).

O gerenciamento adequado de REEE evitou, ainda, a emissão de 41 milhões de toneladas de CO_2 na forma de refrigerantes em equipamentos de troca térmica, além do montante de 52 milhões de toneladas reduzidos das emissões de GEE obtidas pela reciclagem de metais, totalizando 93 milhões de toneladas de emissões de CO_2 equivalente globalmente (Baldé *et al*., 2024).

Já a gestão inadequada de REEE, isto é, realizada fora dos meios formais de coleta e reciclagem, é responsável pela liberação anual para o meio ambiente de 58 toneladas de mercúrio e 45 mil toneladas de plásticos contendo retardadores de chama bromados, gerando severos impactos ambientais e à saúde (Baldé *et al*., 2024).

Baldé *et al*. (2024) observam que 95% das emissões de mercúrio são oriundas de lâmpadas. Os autores destacam, também, a preocupação com a gestão inadequada de outro REEE, a saber: os equipamentos de troca de temperatura, cuja reciclagem não gerenciada contribui para o agravamento das mudanças climáticas e a depleção da camada de ozônio (Baldé *et al*., 2024).

Ainda que as substâncias clorofluorcarbono e hidroclorofluorcarbono não sejam mais utilizadas na fabricação de equipamentos de refrigeração desde o ano 2000 por

determinação do Protocolo de Montreal (que, em 1987, regulou a produção e o consumo de substâncias conhecidas como destruidoras da camada de ozônio), tais moléculas permanecem presentes nos circuitos refrigerantes e espumas de isolamento de refrigeradores, *freezers* e aparelhos de ar condicionado fabricados antes do ano 2000 (Baldé *et al*., 2024).

Desta forma, a reciclagem informal desses REEE (isto é, em condições ambientalmente inadequadas), principalmente em países de renda baixa e média-baixa, continua possibilitando a liberação de substâncias que esgotam a camada de ozônio, acarretando maiores riscos de câncer de pele, doenças oculares e comprometimento do sistema imunológico dos indivíduos (Baldé *et al*., 2024).

5.4.2 Impactos econômicos

Baldé *et al*. (2024) descrevem que o gerenciamento de REEE apresenta benefícios econômicos (em termos de recuperação de metais e de emissões evitadas de GEE), mas também custos (tais como aqueles associados ao tratamento dos REEE e os custos de externalidades para a sociedade e o meio ambiente).

Estima-se em US$ 91 bilhões o valor econômico dos metais contidos nos REEE em todo o mundo em 2022. No entanto, alguns metais não apresentam viabilidade técnica e/ou econômica para reciclagem ou, ainda, a sua coleta é realizada por meios com menor eficiência de recuperação. Desta forma, estimativas indicam que as práticas atuais de gerenciamento de REEE tenham recuperado cerca de US$ 28 bilhões em metais como matérias-primas secundárias de volta para a economia no mundo em 2022, evitando a extração de 900 milhões de toneladas de minérios. As perdas ocorreram, principalmente, devido aos processos de incineração, aterro ou tratamento fora do padrão adequado (Baldé *et al*., 2024).

Os sistemas de coleta e reciclagem formais documentados possibilitam a obtenção de cerca de US$ 9 bilhões em metais. Por outro lado, os sistemas informais em países de renda baixa e média-baixa têm como estimativa de processamento, aproximadamente, US$ 12 bilhões em metais (principalmente, ferro, cobre e metais do grupo da platina). Já a recuperação de metais em sistemas fora da gestão do REEE em países de renda alta e média-alta é de, aproximadamente, US$ 7 bilhões (principalmente ferro e cobre). Por fim, os metais recuperados dos REEE dispostos

juntamente com o lixo residual em países de renda alta e média-alta totalizam cerca de US$ 500 milhões (Baldé *et al*., 2024).

Além do montante de US$ 28 bilhões em metais que apresentaram recuperação viável em todas as rotas de gestão dos REEE, a gestão dos REEE no ano de 2022 apresentou outro benefício econômico, desta vez de US$ 23 bilhões em valor monetizado oriundo de emissões evitadas de GEE. Desta forma, ao somar este montante ao valor de metais recuperados viáveis, a sociedade percebe o benefício de US$ 51 bilhões pelo gerenciamento do REEE em 2022 (Baldé *et al*., 2024).

Em contrapartida, a estrutura de custos dos REEE em 2022 consiste em uma estimativa de US$ 78 bilhões em custos de externalidades em saúde e meio ambiente (em virtude de liberações de mercúrio e chumbo, lançamentos de plásticos e contribuições para o aquecimento global, principalmente nos casos de substâncias perigosas não gerenciadas de forma adequada), além de custos adicionais com o tratamento dos REEE no valor de US$ 10 bilhões (Baldé *et al*., 2024).

O custo médio dos REEE que são submetidos a processos de tratamento ambientalmente adequado é de US$ 0,36/kg, enquanto o custo médio dos REEE descartados como lixo residual, resíduos reciclados fora dos sistemas de reciclagem compatíveis ou geridos pelo setor informal é de US$ 0,12/kg. Os custos três vezes mais elevados de tratamento dos REEE ocorrem, principalmente, devido a despesas com despoluição dos resíduos, auditoria, administração e obtenção de padrões mínimos ambientais e de segurança necessários (Baldé *et al*., 2024).

A partir das estimativas dos benefícios e dos custos econômicos, o resultado é uma perda líquida no valor estimado de US$ 37 bilhões no mundo com as atuais práticas de gestão de REEE (Baldé *et al*., 2024).

Até o ano de 2030, Baldé *et al.* (2024) estimam que a geração mundial de REEE aumente para 82 milhões de toneladas. Os autores projetam três cenários possíveis para a taxa de coleta e reciclagem de REEE formalmente documentada no ano de 2030. No cenário de manutenção do *status quo* (chamado de “business as usual scenario”), essa taxa diminuirá para 20% em 2030 (Baldé *et al*., 2024).

Esta projeção para 2030 abrange uma estrutura de custos primários de US$ 93 bilhões com externalidades para a população e o meio ambiente, em virtude de liberações de chumbo e mercúrio, lançamento de plástico e contribuições para o aquecimento global, principalmente quando substâncias perigosas não são

gerenciadas adequadamente. Ademais, estimam-se custos adicionais de US$ 15 bilhões com o tratamento do REEE, principalmente para a reciclagem. Por outo lado, há a projeção de benefícios no valor de US$ 42 bilhões com a recuperação de metais contidos nos REEE e de R$ 26 bilhões com emissões evitadas de GEE. Desta forma, a projeção aponta para perdas totais de US$ 40 bilhões na gestão de REEE em 2030 (Baldé *et al*., 2024).

No cenário progressivo (em que os países de elevada renda dotados de infraestrutura e legislação sobre REEE alcancem a taxa de coleta de 85% – que consiste na meta estabelecida pela União Europeia até 2030 – e os demais países atinjam uma taxa de coleta e gestão adequada de 10% de REEE), a taxa mundial de coleta e reciclagem formalmente documentada aumentaria para 38% até 2030. Este cenário indicaria a proximidade de alcance do índice de zero líquido (chamado de “net zero”) em termos de custos e benefícios (Baldé *et al*., 2024).

Por fim, no cenário aspiracional (em que todos os países dotados de infraestrutura de gestão de REEE alcancem a taxa de coleta de 85% de REEE; países de rendas alta e média-alta desprovidos de infraestrutura formal de gestão de REEE não mais utilizem aterros para a destinação de REE; e países de rendas baixa e média-baixa melhorem as condições de trabalho informal e alcancem uma taxa de 40% de coleta e gestão adequada de REEE), a taxa mundial de coleta e reciclagem formalmente documentada aumentaria para 60% até 2030. Nesse caso, os benefícios seriam superiores aos custos, com um acréscimo de US$ 38 bilhões, em virtude de custos de externalidades menores para a sociedade e o meio ambiente, contribuições monetizadas positivas para o aquecimento global, e maior valor dos recursos recuperados (Baldé *et al*., 2024).

5.5 TAXAS DE RECICLAGEM DE RESÍDUOS ELETROELETRÔNICOS

Do total mundial de 22,3% de REEE coletados e reciclados formalmente documentados em 2022, a maior taxa correspondeu aos equipamentos de grande porte excluindo os painéis fotovoltaicos (com 34%), enquanto a menor taxa foi verificada na coleta e reciclagem de lâmpadas (com 5%) (Baldé *et al*., 2024). A Tabela 6 sintetiza as quantidades geradas e formalmente coletadas e recicladas por categoria

de REEE, bem como as taxas de coleta e reciclagem formais documentadas por categoria de REEE no mundo no ano de 2022.

Tabela 6 - Geração, coleta e reciclagem de REEE por categoria no mundo em 2022

Categoria de REEE	Quantidade total de REEE gerado (t)	Quantidade de REEE documentado como formalmente coletado e reciclado (t)	Taxa documentada como formalmente coletada e reciclada (%)
Equipamentos de grandes dimensões excluindo painéis fotovoltaicos[17]	15,1 milhões	5,1 milhões	34%
Equipamentos de troca de temperatura	13,3 milhões	3,6 milhões	27%
Telas e monitores	5,9 milhões	1,5 milhão	25%
Equipamentos de telecomunicação e tecnologia da informação de pequenas dimensões	4,6 milhões	1 milhão	22%
Painéis fotovoltaicos	0,6 milhão	0,1 milhão	17%
Equipamentos de pequenas dimensões	20,4 milhões	2,4 milhões	12%
Lâmpadas	1,9 milhão	0,1 milhão	5%
Total	62 milhões	13,8 milhões	22,3%

Fonte: adaptado de Baldé *et al.* (2024)

Em um trabalho em que identificaram 140 potenciais recicladores ativos de REEE no Brasil, dos quais 82 foram confirmados, Dias *et al.* (2022) estimaram que o país recicla, aproximadamente, 77 mil toneladas de REEE por ano.

Os autores comparam essa estimativa de reciclagem de REEE com a quantidade total de REEE gerada no Brasil no ano de 2019 (a saber, 2,143 milhões de toneladas) descrita no relatório The Global E-waste Monitor 2020 de autoria de Forti *et al.* (2020), verificando que a taxa de reciclagem de REEE corresponde a cerca de 3,6% do total de REEE gerado no país.

[17] Apesar de categorizados como equipamentos de grande porte, Baldé *et al.* (2024) apresentam os painéis fotovoltaicos separadamente em virtude da relevância que apresentam no cenário de transição energética, destacando uma estimativa de crescimento na geração deste tipo de REEE de 0,6 milhão de tonelada em 2022 para 2,4 milhões de toneladas em 2030, segundo os referidos autores.

Esse índice de reciclagem de REEE no Brasil encontra-se, portanto, muito abaixo da taxa mundial média documentada formal de coleta e reciclagem informada por Baldé *et al.* (2024) de 22,3% no ano de 2022, demonstrando a necessidade de busca de modelos econômicos alternativos para minimização da degradação ambiental.

5.6 ELETROELETRÔNICOS: O CASO DAS MÁQUINAS DE LAVAR

A Tabela 7 demonstra informações acerca do tempo de vida útil médio das máquinas de lavar (incluindo secadoras combinadas) apresentadas por Forti, Baldé e Kuehr (2018), relativos a países europeus e países não pertencentes à União Europeia.

Tabela 7 - Tempo de vida das máquinas de lavar

País	Tempo de vida (anos)
Países Baixos, França e Bélgica	15,16
Itália	13,65
Países fora da União Europeia	13,32

Fonte: modificado de Forti, Baldé e Kuehr (2018) [18]

A Tabela 8 apresenta os pesos médios das máquinas de lavar (incluindo secadoras combinadas) para os vinte e oito Estados-Membros da União Europeia ao longo de uma série histórica. É possível verificar um acréscimo de cerca de 5% no peso médio destes equipamentos no período de 1995 a 2016, o que ratifica a necessidade de busca por modelos de produção e consumo mais sustentáveis.

[18] Nota: dados obtidos a partir do Anexo 2 dos referidos autores acerca da Distribuição de Weibull dos tempos de vida de variados equipamentos eletroeletrônicos, tendo como referência o ano de 2016, e utilizando como parâmetro de forma (α) os valores de 2,20 (nos casos dos Países Baixos, França, Bélgica e Itália) e 1,85 (nos casos de países de fora da união Europeia), além do parâmetro de escala β, tempo de vida).

Tabela 8 - Indicação de pesos médios das máquinas de lavar para os vinte e oito Estados-Membros da União Europeia

Ano	Peso médio (kg/peça)
1995	69,36
2000	70,27
2005	71,40
2010	72,54
2015	72,54
2016	72,54

Fonte: modificado de Forti, Baldé e Kuehr (2018)

A Tabela 9 apresenta a composição de materiais identificada por Stahel (1992) para uma máquina de lavar para uso doméstico de 78,5 kg, em que a maior parte é constituída por metais (isto é, 54% do peso total), enquanto 28% correspondem a cimento (concreto), além de 9% de plásticos, 2% de borracha, 3% de papelão, 3% de madeira, 0,1% de vidro e cerca de 1% composto por outros materiais.

Tabela 9 - Composição de materiais em uma máquina de lavar

Materiais	Peso (kg)	Peso (%)
METAIS	42,32	54%
Ferro	23,2	
Ferro fundido	3,8	
Aço	6,2	
Aço cromado	5,4	
Alumínio	1,9	
Cobre e latão	1,8	
Outros metais não-ferrosos	0,1	
PLÁSTICOS	6,76	9%
Estireno	2,1	
Poliolefinas	1,3	
PVC	0,7	
Poliamida	0,4	
Outros	0,35	
Compostos plásticos	0,51	
Plásticos e aditivos	1,4	
BORRACHA	1,6	2%
OUTROS MATERIAIS	27,82	35%
Cimento	21,9	
Papelão	2,3	
Madeira	2,5	
Outros materiais	1	
Vidro	0,1	
TOTAL	78,5	100%

Fonte: adaptado de Stahel (1992)

Já a Associação Brasileira de Desenvolvimento Industrial (ABDI, 2013) estima em 36,512 kg o peso médio de uma máquina de lavar, valor muito próximo à estimativa de 40 kg efetuada por Araújo *et al.* (2012). Uma possível explicação para a diferença entre os pesos identificados por Stahel (1992) em comparação àqueles relatados por ABDI (2013) e Araújo *et al.* (2012) reside na percepção de que as máquinas de lavar atuais são dotadas de mais componentes plásticos do que no passado. Considerando que o plástico é mais leve do que o metal, tal configuração resultaria na redução do peso das máquinas de lavar modernas.

Uma investigação conduzida pela organização europeia The Reuse and Recycling EU Social Enterprises Network (RREUSE, 2013), responsável pela gestão de redes nacionais e regionais de empresas de reutilização, reparação e reciclagem, identificou os principais obstáculos à reparação de máquinas de lavar roupas, máquinas de lavar louça e geladeiras.

Mudanças rápidas no design do produto e nos componentes, bem como problemas de disponibilidade de peças de reposição podem dificultar as tentativas de reparos desses eletroeletrônicos. Seu reparo também é dificultado pela falta de acesso aos manuais de reparo e serviço e aos softwares e hardwares por parte dos centros de reparo e reutilização que não são prestadores de serviço de pós-venda oficiais dos fabricantes. Além disso, a dificuldade para a desmontagem dos produtos cria obstáculos à separação dos componentes individuais e o acesso às peças no interior dos aparelhos, dificultando a substituição e o reparo, o que pode inviabilizar a reutilização do equipamento (RREUSE, 2013).

O custo das peças de reposição também é um dos obstáculos ao reparo das máquinas de lavar. Há casos em que é necessária a aquisição de um conjunto completo de peças sobressalentes quando apenas uma peça é demandada para o reparo. Um exemplo ocorre quando, para substituir os rolamentos de esferas de uma máquina de lavar que estão sendo pressionados no invólucro plástico do tambor, faz-se necessário substituir, também, ao menos, parte do invólucro. A aquisição do invólucro completo, incluindo o tambor, é muito cara, tornando antieconômico o reparo da máquina de lavar (RREUSE, 2013).

Além disso, os custos de substituição de determinados componentes, como partes eletrônicas e temporizador, são muito elevados, uma vez que, diante da grande variedade de marcas e modelos de máquinas de lavar no mercado, faz-se necessário

o uso do mesmo componente do fabricante original para reparar o equipamento, o que dificulta a utilização de componentes recuperados de máquinas obsoletas (RREUSE, 2013).

Tecchio, Ardente, Mathieux (2016) apresentaram os principais tipos de falhas das máquinas de lavar e os índices de reparo a partir da análise de um conjunto de 11.000 dados de centros de serviços de reparo localizados na Áustria no período de 2009 a 2015. Os modos de falha detectados com maiores frequências envolveram componentes relacionados à eletrônica (com 14% de ocorrência), amortecedores e mancais (13,8%), portas (11,5%), escovas de carvão (9,7%) e bombas (7,5%). Em relação às taxas de reparo (que consistem na relação entre equipamentos reparados e o total de equipamentos diagnosticados com um determinado modo de falha), as maiores taxas foram observadas para portas, escovas de carvão e retirada de objetos estranhos, enquanto as menores taxas de reparo foram identificadas para rolamentos (24%), tambores e cubas (27%), bombas de circulação (33%) e eletrônica (49%), sendo o principal motivo o alto custo para reparo (Tecchio, Ardente, Mathieux, 2016).

No total, aproximadamente 71% dos modos de falha identificados foram reparados com sucesso. Do quantitativo de equipamentos não reparados, 78% foram atribuídos aos custos elevados, principalmente relacionados a peças de reposição e mão-de-obra. Já, 15% dos equipamentos não reparados decorreram da existência de barreiras técnicas que inviabilizaram o reparo (como indisponibilidade de peças de reposição e projeto desfavorável à desmontagem). Uma vez que componentes são frequentemente projetados para não serem desmontados de forma reversível (como, por exemplo, portas e dobradiças), o custo de peças de reposição tende a aumentar (Tecchio, Ardente, Mathieux, 2016).

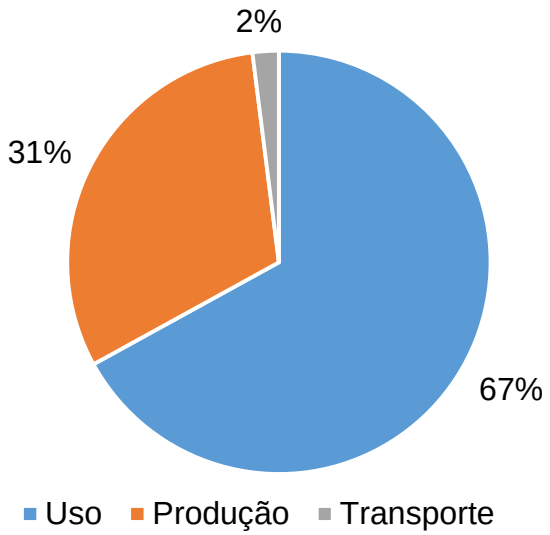
Os resultados elencados por Tecchio, Ardente, Mathieux, 2016 corroboram a compreensão de que as estratégias de economia circular, enquanto um fim em si mesmas, não desvelam uma solução completa para a mitigação dos impactos ambientais, uma vez que o sistema de produção não contempla aspectos de desmontagem na fase de design e não preveem a disponibilidade de peças de reposição em quantidade suficiente e a preços competitivos.

A fase de uso de uma máquina de lavar é a etapa mais intensiva em geração de impacto ambientais. Devoldere *et al*., 2009 relatam que o impacto ambiental gerado

nessa fase varia em função do consumo de água e eletricidade, de acordo com o tipo de máquina de lavar.

A Figura 47 demonstra a distribuição dos impactos ambientais para uma máquina de lavar com capacidade de processamento de 5kg de roupa, velocidade máxima de centrifugação de 1.200 rpm, consumo de água superior a 45 litros por ciclo e rotulagem energética A+. É possível verificar que a fase de uso representa o maior impacto (67%), seguida das fases de produção (31%) e transporte (2%). Ressalta-se que esta estimativa não abrange o consumo de detergente porque, apesar de se constituir um impacto ambiental relevante, depende, essencialmente, dos hábitos do usuário, e não do tipo de máquina de lavar (Devoldere *et al*., 2009).

Figura 47 - Impactos ambientais de uma máquina de lavar



Fonte: adaptado de Devoldere *et al*., 2009

Em uma avaliação de ciclo de vida do berço ao túmulo (isto é, abrangendo extração e processamento da matéria-prima, produção e montagem, distribuição, uso e descarte) de uma máquina de lavar de 75 kg com capacidade nominal de 6 kg, Yuan, Zhang e Liu (2016) identificaram que as maiores contribuições de impactos ambientais têm origem nas etapas de produção e uso, em virtude do consumo de minérios para a fabricação de peças eletrônicas, bem como de componentes plásticos e de eletricidade, além da geração de águas residuais decorrentes da utilização de detergente na etapa de uso, que resultam em potencial eutrofização. Na fase de uso, a temperatura da água é o fator mais relevante para a geração de impactos ambientais, pois o seu aquecimento é intensivo no consumo de eletricidade. Já a

etapa de fim de vida contribui com créditos de reciclagem, em virtude da recuperação de materiais como cobre, aço e plásticos (Yuan, Zhang e Liu, 2016).

Uma pesquisa conduzida por Rüdenauer, Gensch e Quack (2005), encomendada por Electrolux - AEG Hausgeräte GmbH, BSH Bosch e Siemens Hausgeräte GmbH, ratifica a conclusão de que a fase de uso de uma máquina de lavar é a etapa dominante em termos de geração de impactos ambientais. Em uma avaliação de ciclo de vida realizada para uma máquina de lavar com capacidade de processamento de 5kg na Alemanha, os autores identificaram a contribuição de cada etapa do ciclo de vida para três categorias de impacto consideradas.

Nas condições analisadas, Rüdenauer, Gensch e Quack (2005) verificaram que 79,9% do consumo de energia é proveniente da fase de uso (composto por 75,8% relativo ao fornecimento de energia e 4,1% referente ao fornecimento de água). Segundo os autores, a etapa de uso também é responsável por 75,8% das contribuições relativas ao potencial de aquecimento global, além de 64,8% da carga ambiental total acumulada, conforme pode ser verificado na Tabela 10.

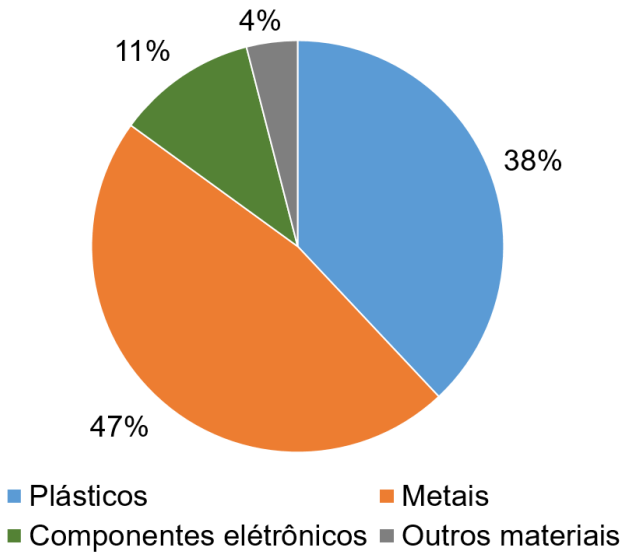
Tabela 10 - Participação relativa das fases do ciclo de vida de uma máquina de lavar por categoria de impacto

Etapa	Demanda energética	Potencial de aquecimento global	Carga ambiental total acumulada
Fornecimento de materiais	17,6%	21,9%	33,3%
Produção	2,3%	2,1%	1,5%
Distribuição	0,2%	0,2%	0,4%
Subtotal - Fase de Produção	20,1%	24,2%	35,2%
Fornecimento de energia	75,8%	72,0%	61,5%
Fornecimento de água	4,1%	3,8%	3,3%
Subtotal - Fase de Uso	79,9%	75,8%	64,8%
Total	100,0%	100,0%	100,0%
Fim de vida, créditos para reciclagem	-4,5%	-4,2%	-8,2%

Fonte: adaptado de Rüdenauer, Gensch e Quack (2005)

Detalhando o fornecimento de materiais, a Figura 48 demonstra o consumo energético relativo à produção dos materiais necessários para a fabricação de uma máquina de lavar, de acordo com Rüdenauer, Gensch e Quack (2005). É possível observar que os materiais metálicos respondem por 47% do consumo de energia, enquanto os plásticos concentram 38% da demanda energética, seguidos pelos componentes eletrônicos (com 11%) e outros materiais (com 4%).

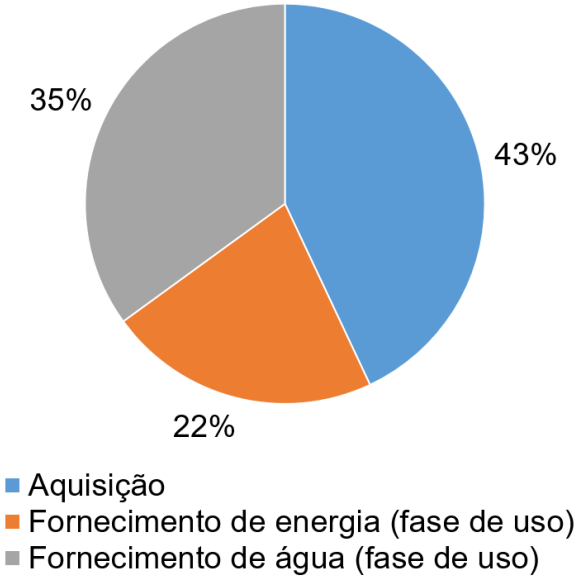
Figura 48 - Contribuição dos diferentes materiais para o consumo energético correspondente ao fornecimento de materiais



Fonte: adaptado de Rüdenauer, Gensch e Quack (2005)

Ao verificar os custos do ciclo de vida da máquina de lavar analisada, Rüdenauer, Gensch e Quack (2005) constataram que, apesar do fornecimento de energia ser responsável por 75,8% do consumo de energia, corresponde a somente 22% dos custos do ciclo de vida para famílias privadas, conforme observado na Figura 49. Já a aquisição da máquina de lavar responde por 43% dos custos, seguida pelo abastecimento de água, concentrando 35% dos custos.

Figura 49 - Custos do ciclo de vida de uma máquina de lavar



Fonte: adaptado de Rüdenauer, Gensch e Quack (2005)

Uma vez que a literatura indica que a fase de uso de uma máquina de lavar apresenta-se como a mais intensiva em impactos ambientais, estender a vida útil do equipamento ou adotar medidas de circularidade baseadas em reúso ou remanufatura podem apresentar eficácia limitada no combate à degradação ambiental.

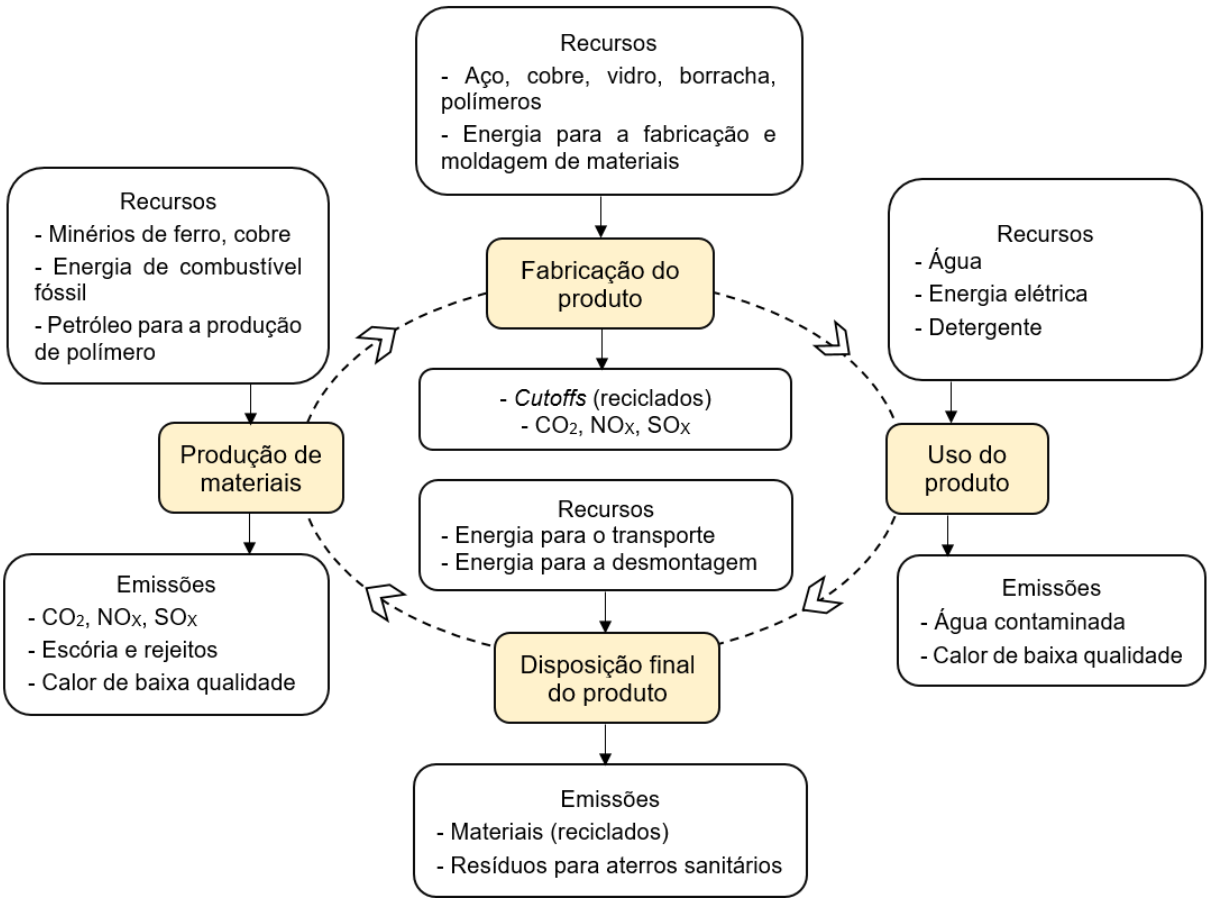
Esta conclusão, gerada na presente tese, encontra justificativa a partir da constatação realizada por Rüdenauer, Gensch e Quack (2005), quando relatam que uma vida útil longa conduz a uma quantidade menor de máquinas de lavar usadas (e, consequentemente, menor impacto ambiental e menores custos para produção e tratamento de fim de vida útil), mas, presumivelmente, resulte em impactos maiores durante a fase de uso, a qual é a mais intensiva na geração de impactos ambientais. Já, segundo os autores, uma vida útil mais curta conduz a maiores impactos e custos para a produção e o tratamento de fim de vida útil, mas, é possível que resulte em menores impactos e custos durante a fase de uso.

A Figura 50 apresenta os principais recursos e emissões envolvidos no ciclo de vida de uma máquina de lavar. Muitos componentes destes equipamentos são compostos por aço, cobre, plásticos e borracha. As fases de produção de matérias-primas e de fabricação do produto[19] exigem o consumo de energia baseada em

[19] A etapa de fabricação do produto descrita por Ashby (2013) tem, como uma das suas saídas, uma corrente de "*Cutoffs* (reciclados)". Não foi identificada na obra do referido autor esta definição. No

carbono, e tem como principais emissões, a geração de CO_2, NOx, SOx e calor de baixa qualidade. Já na fase de uso da máquina de lavar ocorre o consumo de água, energia e detergente, com a emissão de água contaminada e calor de baixa qualidade. Na fase de disposição final ocorre o consumo de energia para o transporte e a desmontagem do equipamento, e a geração dos resíduos eletrônicos a serem dispostos em aterros sanitários, além da possibilidade de encaminhamento dos materiais para a reciclagem (Ashby, 2013).

Figura 50 - Os principais recursos e emissões envolvidos no ciclo de vida de uma máquina de lavar



Fonte: adaptado de Ashby (2013)

entanto, ao pesquisar na literatura, identificou-se um paralelismo com a publicação de Malins *et al*. (2014), os quais relatam que o Estimador de Emissões de Gases de Efeito Estufa da Produção de Petróleo apresentado pelos atores inclui dentro dos limites de seu sistema fontes de emissões muito baixas que são negligenciadas como (provavelmente) insignificantes em magnitude e, portanto, estas emissões estão sujeitas a cortes (*cutoffs*) de significância. Por analogia, este é o entendimento utilizado nesta tese.

5.7 PRODUÇÃO E CONSUMO DE MÁQUINAS DE LAVAR

No Brasil, a Pesquisa Industrial Anual - Produto, conhecida como PIA - Produto, realizada pelo IBGE, fornece informações acerca da produção e das vendas dos produtos e/ou serviços industrias, de acordo com as classes de atividades e a descrição dos produtos (IBGE, 2022b). Dentre os produtos informados nas cinco pesquisas mais recentes, compreendendo o período de 2018 a 2022, foram destacadas nas Tabelas 11 e 12 aquelas relativas à produção e às vendas de máquinas de lavar e suas partes no Brasil.

A Tabela 11 permite observar a significativa relevância do segmento de máquinas de lavar e secar no mercado de fabricação de eletrodomésticos, uma vez que os produtos em análise representaram cerca de 26% da produção em valor no grupo de fogões, refrigeradores e máquinas de lavar e secar no ano de 2018. Também é possível observar que a participação em valor das máquinas de lavar e secar na produção de eletrodomésticos alcançou cerca de 28% em 2019, mas vem apresentando sucessivas quedas desde 2020 até 2022, com participações em torno de 24%, 21% e 18%, respectivamente.

Embora a participação no mercado de eletrodomésticos esteja em queda no período analisado, a produção de máquinas de lavar ou secar roupa para uso doméstico aumentou de 5.380.000 unidades em 2018 para 5.717.000 unidades em 2022, de acordo com a Tabela 11, (correspondendo a um acréscimo de cerca de 6%), ratificando a necessidade de busca por soluções sustentáveis de produção e destinação final dos materiais gerados. Em termos de valor financeiro, a produção de máquinas de lavar ou secar roupa para uso doméstico apresentou um recuo de, aproximadamente, 18% no período de 2018 a 2022.

Em contrapartida, a Tabela 11 permite verificar que a produção de partes e peças para máquinas de lavar roupa para uso doméstico apresentou uma diminuição na quantidade fabricada de 113.016.894 unidades para 61.039.276 unidades (representando uma queda de cerca de 46%) no período de 2018 a 2022. No entanto, em valor, a produção apresentou um acréscimo em torno de 11% no período.

Já a produção de tanques elétricos para lavar roupas (conhecidos como “tanquinhos”) para uso doméstico aumentou de 1.481.000 unidades em 2018 para 2.441.691 unidades em 2022, segundo a Tabela 11, (o equivalente a cerca de 65%

de acréscimo), enquanto a produção em valor apresentou um aumento em torno de 193% no período.

Com relação às máquinas de lavar roupas de uso industrial, inclusive para lavanderias, a Tabela 11 permite identificar que a quantidade produzida aumentou de 722 unidades em 2019 para 1.367 unidades em 2022 (representando um aumento de, aproximadamente, 89%). Já a sua produção em valor apresentou um incremento em torno de 72% no período.

Quanto às partes e peças para máquinas para lavar roupa de uso industrial, inclusive lavanderias, a Tabela 11 demonstra que esses itens apresentaram um acréscimo de 2.386.454 kg em 2018 para 4.959.764 kg em 2022 (em um aumento de cerca de 108%), enquanto a produção em valor cresceu em torno de 47% no período.

Tabela 11 - Produção de máquinas de lavar em quantidade e em valor no Brasil no período de 2018 a 2022

Classes de atividades e descrição dos produtos	Unidade de medida	Produção									
		2018		2019		2020		2021		2022	
		Quantidade	Valor (1 000 R$)	Quantidade	Valor (1 000 R$)	Quantidade	Valor (1 000 R$)	Quantidade	Valor (1 000 R$)	Quantidade	Valor (1 000 R$)
Fabricação de fogões, refrigeradores e máquinas de lavar e secar para uso doméstico	-	-	15.075.584	-	18.043.154	-	19.374.387	-	21.804.296	-	18.248.569
Máquinas de lavar ou secar roupa para uso doméstico	mil	5.380	3.899.696	7.049	4.999.171	7.042	4.662.651	4.889	4.515.686	5.717	3.193.733
Partes e peças para máquinas de lavar roupa para uso doméstico	unidade	113.016.894	198.109	76.580.278	204.640	90.578.697	328.713	54.579.835	232.271	61.039.276	220.272
Tanques elétricos para lavar roupas (tanquinho), para uso doméstico	unidade	1.481.000	255.471	1.620.201	277.917	2.511.661	474.903	1.410.881	347.889	2.441.691	748.054
Máquinas de lavar roupas de uso industrial, inclusive para lavanderias	unidade	-	-	722	27.182	-	-	1.286	34.829	1.367	46.623
Partes e peças para máquinas para lavar roupa de uso industrial, inclusive para lavanderias	kg	2.386.454	30.567	3.125.443	32.409	2.133.637	75.090	4.524.843	115.903	4.959.764	95.949

Fonte: adaptado de IBGE (2022b) a partir das tabelas de PIA-Produto relativas aos anos de 2018, 2019, 2020, 2021 e 2022.

As vendas de máquinas de lavar e suas partes no período de 2018 a 2022 em quantidade e em receita líquida são apresentadas na Tabela 12. É possível ratificar a relevância do segmento de máquinas de lavar e secar mediante a participação desses produtos no mercado que abrange fogões e refrigeradores, contando com *market shares* de 23%, 26%, 24%, 20% e 18% nos anos de 2018, 2019, 2020, 2021 e 2022, respectivamente.

A Tabela 12 permite observar que a quantidade vendida de máquinas de lavar ou secar roupa para uso doméstico aumentou de 5.013.000 unidades em 2018 para 6.119.000 unidades em 2022 (representando com um acréscimo em torno de 22%), enquanto a receita líquida aumentou cerca de 1% no período.

A quantidade vendida de partes e peças para máquinas de lavar roupa para uso doméstico acompanhou a queda observada na sua quantidade produzida, diminuindo de 112.426.720 unidades vendidas em 2018 para 58.983.841 unidades vendidas em 2022 (representando um recuo de cerca de 47,5%), enquanto a sua receita líquida experimentou um aumento em torno de 10% no período, conforme observado na Tabela 12.

Já as vendas de tanques elétricos para lavar roupas (os “tanquinhos”) para uso doméstico aumentou de 1.499.000 unidades em 2018 para 2.450.030 unidades em 2022, segundo a Tabela 12, (o equivalente a cerca de 63% de acréscimo, acompanhando o crescimento da quantidade produzida desses itens), enquanto a receita líquida apresentou um aumento de, aproximadamente, 193% no período.

Com relação às máquinas de lavar roupas de uso industrial, inclusive para lavanderias, a Tabela 12 permite identificar que a quantidade vendida aumentou de 719 unidades em 2019 para 1.337 unidades em 2022 (representando um aumento de cerca de 86%). Já a sua receita líquida apresentou um incremento em torno de 74% no período.

Quanto às partes e peças para máquinas para lavar roupa de uso industrial, incluindo lavanderias, a Tabela 12 demonstra que esses itens apresentaram um acréscimo de 2.386.859 kg em 2018 para 5.128.072 kg em 2022 (em um aumento de cerca de 115%), enquanto a sua receita líquida aumentou em torno de 225% no período.

Tabela 12 - Vendas de máquinas de lavar em quantidade e em valor no Brasil no período de 2018 a 2022

Classes de atividades e descrição dos produtos	Unidade de medida	Vendas									
		2018		2019		2020		2021		2022	
		Quantidade	Receita Líquida (1 000 R$)	Quantidade	Receita Líquida (1 000 R$)	Quantidade	Receita Líquida (1 000 R$)	Quantidade	Receita Líquida (1 000 R$)	Quantidade	Receita Líquida (1 000 R$)
Fabricação de fogões, refrigeradores e máquinas de lavar e secar para uso doméstico	-	-	14.441.113	-	15.972.051	-	17.124.921	-	19.935.515	-	18.616.964
Máquinas de lavar ou secar roupa para uso doméstico	mil	5.013	3.339.420	6.460	4.175.218	6.703	4.155.391	4.392	3.949.035	6.119	3.368.993
Partes e peças para máquinas de lavar roupa para uso doméstico	unidade	112.426.720	197.755	76.660.373	211.582	92.600.415	337.356	55.202.904	271.359	58.983.841	217.313
Tanques elétricos para lavar roupas (tanquinho), para uso doméstico	unidade	1.499.000	258.444	1.628.476	281.324	2.506.093	474.962	1.538.373	383.859	2.450.030	750.195
Máquinas de lavar roupas de uso industrial, inclusive para lavanderias	unidade	-	-	719	27.041	-	-	1.183	35.311	1.337	47.174
Partes e peças para máquinas para lavar roupa de uso industrial, inclusive para lavanderias	kg	2.386.859	30.569	3.098.336	31.996	2.169.146	76.634	4.452.458	114.782	5.128.072	99.348

Fonte: adaptado de IBGE (2022b) a partir das tabelas de PIA - Produto relativas aos anos de 2018, 2019, 2020, 2021 e 2022.

Desta forma, é possível concluir que, com exceção do item “partes e peças para máquinas de lavar roupa para uso doméstico”, todos os demais produtos relacionados a máquinas de lavar identificados nas pesquisas PIA - Produto do IBGE apresentaram acréscimo nas suas quantidades produzidas e vendidas entre os anos de 2018 a 2022, ratificando a necessidade de busca por modelos de produção e consumo mais sustentáveis.

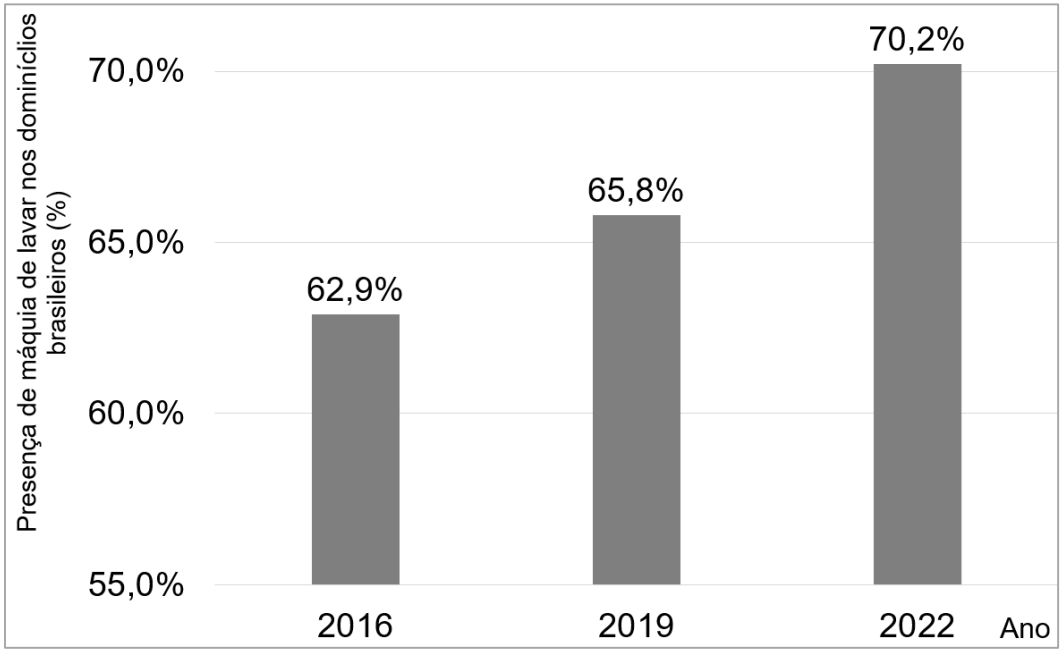
As máquinas de lavar ou secar roupa para uso doméstico tiveram acréscimos de 6% e 22% nas quantidades produzidas e vendidas, respectivamente, no período. Por sua vez, os tanques elétricos para lavar roupas (chamados de “tanquinhos”) para uso doméstico experimentaram aumentos de 65% e 63% nas respectivas quantidades produzidas e vendidas no período. Já as máquinas de lavar roupas de uso industrial, inclusive para lavanderias, apresentaram, no período analisado, aumentos de 89% e 86%, respectivamente. No mesmo período, as partes e peças para máquinas para lavar roupa de uso industrial, inclusive lavanderias, tiveram respectivos aumentos de 108% e 115% nas suas quantidades produzidas e vendidas.

Por fim, partes e peças para máquinas de lavar roupa para uso doméstico foi o único item a apresentar diminuições nas quantidades produzidas e vendidas, em, respetivamente, 46% e 47,5% no período analisado.

Sob a perspectiva do consumo, a presença de máquinas de lavar nas residências brasileiras pode ser verificada por meio da Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios Contínua (PNAD Contínua) realizada ao longo dos quatro trimestres dos anos de referência pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2024).

A Figura 51 demonstra a cobertura deste tipo de eletroeletrônico nos domicílios do Brasil a longo de uma série histórica. É possível verificar a presença das máquinas de lavar em 70,2% dos domicílios brasileiros no ano de 2022.

Figura 51 - Percentual de domicílios brasileiros que possuem máquina de lavar



Fonte: adaptado de IBGE (2024)

Observa-se, ainda que no período de seis anos (isto é, de 2016 a 2022), a presença das máquinas de lavar em domicílios brasileiros apresentou um aumento de 7,3%. Este crescimento reforça a busca pelo desenvolvimento de tecnologias de recuperação de produtos e materiais mais sustentáveis em detrimento da disposição final em aterros.

5.8 DESENVOLVIMENTOS DA ECONOMIA CIRCULAR NO ÂMBITO DA INDÚSTRIA DE MÁQUINAS DE LAVAR

Nesta seção, são analisadas as estratégias de economia circular identificadas para o caso das máquinas de lavar, sendo elas: recuperação de recursos, extensão da vida útil, reúso, remanufatura, sistema produto-serviço, e compartilhamento.

5.8.1 Recuperação de recursos

A busca por estratégias de regeneração de recursos no segmento de máquinas de lavar conduziu à identificação de aplicações de nanotecnologia relacionadas ao desenvolvimento de novos materiais têxteis que resultam na redução do consumo de recursos naturais.

A nanotecnologia vem possibilitando avanços tecnológicos na indústria têxtil, por meio do desenvolvimento dos chamados “têxteis autolimpantes”, que possuem a propriedade de serem fáceis de lavar. A facilidade de remoção de manchas persistentes proporcionada pelos têxteis autolimpantes possibilita a utilização de ciclos leves de lavagem e a redução da quantidade usada de surfactantes (Busi *et al*., 2016).

As superfícies autolimpantes podem ser de dois tipos, a saber: repelentes à água ou por depósito de fotocalisador. Os tecidos tratados com substâncias repelentes à água apresentam superfícies microscopicamente ásperas, dificultando a absorção de partículas de sujeira, as quais podem ser removidas com facilidade por simples enxague com água ou mesmo água da chuva. Já na decomposição por fotocalisador, o têxtil recebe em sua superfície uma camada fotocatalítica de TiO_2 nanocristalino que, na presença de luz solar, é capaz de degradar os materiais orgânicos (Busi *et al*., 2016).

Com o objetivo de identificar uma solução alternativa à lavagem de roupas convencional, de forma a limitar o impacto ambiental do ciclo de vida de têxteis, Busi *et al*. (2016) realizaram uma análise do ciclo de vida aplicada a um têxtil autolimpante obtido a partir do depósito de uma camada fotocatalítica de TiO_2 nanocristalino. Os autores identificaram que este tratamento possibilita a redução do consumo de água, de detergente e da temperatura necessária para a remoção de manchas, diminuindo

o consumo de energia elétrica. Destacaram, também, a redução com os custos de lavandeira e o aumento da durabilidade dos têxteis.

De fato, com a diminuição da quantidade de lavagens da peça possibilitada pelo uso de tecidos autolimpantes, além da redução no consumo de água, detergente e energia elétrica, espera-se, também, o aumento da durabilidade do tecido, prologando a sua vida útil.

5.8.2 Extensão da vida útil

Devoldere *et al*. (2009) investigaram a estratégia de extensão da vida útil de máquinas de lavar em centros de reúso em Flanders, na Bélgica, nos quais o preço de venda praticado é equivalente a um terço do preço médio de um produto novo.

Os autores calcularam o custo total de propriedade de máquinas de lavar com variadas idades de reúso, rotulagens de eficiência energética e consumo de água ao longo de 15 anos, idade assumida como o tempo de vida útil do equipamento. Em sua pesquisa, os autores adotaram como referência uma máquina de lavar com capacidade de processamento de 5 kg de roupa, velocidade máxima de centrifugação de 1.200 rpm, consumo de água superior a 45 litros por ciclo e etiqueta energética A+.

Como resultado, determinaram a idade crítica de reúso, acima da qual o reúso é indesejável do ponto de vista ambiental ou econômico. Máquinas de lavar com idade de reúso inferior a 6 anos são relativamente mais baratas do que a referência de base. Já as máquinas de lavar com idade de reúso superior a 10 anos apresentaram custos totais de propriedade maiores do que a referência de base (Devoldere *et al*., 2009).

Uma vez que os centros de reúso não podem prolongar a vida útil técnica (L) de uma máquina de lavar, um equipamento com idade de reúso (R) terá como duração média (L-R) anos. Desta forma, faz-se necessária aquisição de mais de uma máquina de lavar para abranger o período de 15 anos de vida útil do equipamento (Devoldere *et al*., 2009). Na prática, a produção de mais unidades de máquinas de lavar para suprir a necessidade de uso representa aumento do consumo de recursos materiais e energéticos, além de acréscimo na quantidade gerada de resíduos e emissões. Portanto, conclui-se a eficácia limitada desta estratégia na mitigação dos impactos ambientais e no aprimoramento da sustentabilidade.

5.8.2 Reúso

Boldoczki, Thorenz e Tuma (2021) investigaram em que circunstâncias o aumento da circularidade, por meio da estratégia de reúso de equipamentos eletroeletrônicos intensivos na fase de uso, conduz a benefícios ambientais. Para isso, definiram metas de reúso em um estudo de caso acerca de máquinas de lavar na Alemanha, e empregaram uma análise dinâmica de fluxo de materiais associada a uma avaliação de ciclo de vida.

Os autores identificaram os impactos acumulados entre os anos de 2015 a 2050 para três cenários possíveis de reúso, representados na Tabela 13. O primeiro cenário (*business as usual*) consiste na situação em que nenhuma ação é tomada. Neste caso, é utilizada a participação atual de reúso na Alemanha de 0,5%, relatada por Messmann *et al.* (2019). O segundo cenário ilustra a implementação de uma meta de preparação para reúso de 5%, conforme sugerido pelo Parlamento Europeu (Boldoczki, Thorenz e Tuma, 2021).

Por fim, as metas utilizadas na construção do terceiro cenário derivam de pesquisas anteriores acerca dos potenciais de preparação para reúso na Alemanha descritas por Messman *et al*. (2019). Este cenário demonstra os impactos do reúso dos resíduos de equipamentos eletroeletrônicos, caso todo o potencial de reúso fosse utilizado, fornecendo um limite superior de 86,6%. Com base em Messmann *et al* (2019), em média, 14,5% dos resíduos dos equipamentos eletroeletrônicos poderiam ser reutilizados sem operação adicional. O alcance do reúso de 44,1% desses resíduos requer a realização de modificações no seu processo de coleta. Para alcançar a plenitude do potencial de reúso de 86,6%, são necessários esforços de longo prazo e incentivos ao mercado de produtos secundários (Boldoczki, Thorenz e Tuma, 2021).

Tabela 13 - Cenários de reúso

	Cenário	Cotas de reúso por ano				
		2015	2020	2030	2040	2050
1	"*Business as usual*"	0,5%	0,5%	0,5%	0,5%	0,5%
2	Aumento moderado da meta de preparação para reúso	0,5%	5,0%	5,0%	5.0%	5,0%
3	Forte aumento da meta de preparação para reúso	0,5%	14,5%	44,1%	86,6%	86,6%

Fonte: adaptado de Boldoczki, Thorenz e Tuma (2021)

Como resultado, a proposta de meta de reúso de 5% conduziu a reduções de impacto médias de 1% comparativamente ao cenário "*business as usual*", isto é, os impactos acumulados ao longo de 35 anos demonstraram somente uma diferença marginal entre os dois cenários. Já a proposta de meta de reúso de 86,6% originou uma redução de impacto médio de 9%, variando de um aumento de 1% na categoria de consumo de água a uma redução de até 26% na categoria uso da terra (Boldoczki, Thorenz e Tuma (2021).

Para Boldoczki, Thorenz e Tuma (2021), estes resultados demonstram que o reúso não conduz a uma redução considerável dos impactos ambientais (mas também não a um aumento), e que, mesmo elevadas taxas de reúso exercem influência limitada sobre a redução dos impactos ambientais.

Os resultados da pesquisa de Johnson, McMahon e Fitzpatrick (2020) corroboram para o entendimento de que a estratégia de preparação para o reúso, nas condições atuais, apresenta baixa taxa de eficácia enquanto solução para a mitigação dos impactos ambientais.

Os referidos autores realizaram uma avaliação quantitativa em um ponto de coleta de REEE na Irlanda para verificar o potencial de preparação para reúso de máquinas de lavar nas presentes condições de coleta. Dos 23.129 equipamentos inspecionados, um total de 1.134 máquinas de lavar (isto é, 4,9%) foram selecionadas após as etapas de avaliação visual e funcional. Destas, 327 máquinas foram preparadas para o reúso com sucesso, sendo reformadas, reparadas e vendidas como aparelhos de reúso, em uma taxa geral de reúso de 1,5% (Johnson, McMahon e Fitzpatrick, 2020).

O baixo índice de sucesso da preparação para reúso destas máquinas de lavar pode ser explicado por falhas funcionais durante o seu uso ou danos ocorridos durante a sua coleta. As principais sugestões para lidar com as falhas funcionais identificadas consistem no uso de motores, bombas de drenagem e escovas modulares e substituíveis, cabos de alimentação e de rede elétrica intercambiáveis, e portas e vedações de portas padronizadas, em todos os modelos e marcas de equipamentos (Johnson, McMahon e Fitzpatrick, 2020).

Com relação aos danos provocados durante a coleta, Johnson, McMahon e Fitzpatrick (2020) recomendam que os equipamentos sejam coletados para reúso na posição mais a montante possível. Os autores observam, ainda, que o índice de

máquinas de lavar adequadas para reúso poderia aumentar caso fossem implementadas modificações no modo de coleta, transporte e condições de armazenamento dos REEE.

Portanto, por meio dos resultados obtidos nas pesquisas de Boldoczki, Thorenz e Tuma (2021) e Johnson, McMahon e Fitzpatrick (2020), ratifica-se compreensão de que estratégias de circularidade auxiliam de forma limitada na mitigação dos impactos ambientais, apresentando baixas taxas de eficácia. Para possibilitar o aumento destes índices, são necessárias medidas no âmbito do design do produto (como a utilização de componentes modulares, intercambiáveis e que favoreçam a desmontagem e reparo) e modificações nos processos de coleta, transporte e armazenamento dos produtos a serem encaminhados para estratégias de recuperação.

5.8.4 Remanufatura

A análise da literatura acerca da estratégia de remanufatura de máquinas de lavar conduziu a uma empresa pertencente ao fabricante Electrolux chamada El-kretsen AB, localizada no município de Motala, Suécia.

Esta empresa desenvolveu uma rede nacional de recuperação de equipamentos eletroeletrônicos de modo a favorecer a coleta e reciclagem adequada e, em 1998, iniciou uma operação de remanufatura em Motala (Sundin e Tyskeng, 2003). O quantitativo de produtos recebidos na unidade é distribuído de acordo com o seguinte mix: 35% são refrigeradores, 30% são máquinas de lavar, 20% são fogões e 15% são micro-ondas (Sundin, 2001).

A unidade de remanufatura e a fábrica da Electrolux estão localizadas na mesma área, o que favorece a utilização do mesmo sistema logístico para os produtos remanufaturados e os novos. Os produtos remanufaturados são comercializados por meio dos canais de mercado convencionais (Sundin, Jacobsson e Björkman 2000).

Quando um eletrodoméstico apresenta defeito, o serviço de reparo da Electrolux realiza três tentativas de conserto do equipamento. Esgotadas essas tentativas, os produtos são encaminhados para o centro de serviço local da Electrolux, de onde podem ser transportados para a unidade de remanufatura em Motala ou para a reciclagem local de materiais (Sundin e Tyskeng, 2003).

Cerca de 80% dos produtos defeituosos recebidos em Motala são remanufaturados, enquanto o restante é encaminhado para reciclagem. Os produtos

remanufaturados apresentam funcionalidade equivalente aos dos produtos novos, ainda que possa haver “defeitos cosméticos”, os quais podem influenciar o preço de venda (Sundin e Tyskeng, 2003).

Ao serem recebidos na unidade em Motala, os produtos defeituosos são submetidos a uma etapa de inventário, para segregação daqueles que podem ser encaminhados para reparo. Os equipamentos que não podem ser reparados seguem para a etapa de desmontagem, fase em que as peças em bom estado serão usadas como peças de reposição no reparo de outros produtos, enquanto as peças em mau estado seguirão para reciclagem dos materiais. Já os equipamentos defeituosos que podem ser reparados são submetidos a testes para detecção de falhas e, na sequência, são efetuados os reparos necessários. Após a realização de novos testes para verificação do funcionamento, os produtos são limpos e testados sob alta tensão. Na sequência, são embalados e transportados para revenda (Sundin e Tyskeng, 2003).

Sundin e Tyskeng (2003) compararam os cenários de remanufatura e reciclagem de máquinas de lavar por meio de uma avaliação do ciclo de vida realizada para o modelo AEG Lavamat 72330W do fabricante Electrolux. Foram incluídas na avaliação somente as fases do ciclo de vida após o produto ser considerado como não possível de ser reparado. As etapas de embalagem e transporte final também não estão incluídas, uma vez que considera-se que estas atividades causem aproximadamente o mesmo efeito em ambos os cenários (Sundin e Tyskeng, 2003).

Os resultados obtidos permitiram identificar que, comparativamente ao cenário da reciclagem, a remanufatura de máquinas de lavar resultou em maiores emissões de GEE (em virtude da necessidade de transportes mais longos até a unidade de Motala) e de compostos de eutrofização[20] (devido à presença de materiais nitrogenados e fosforados contidos nos detergentes utilizados na fase de testes das máquinas de lavar). Ainda assim, a remanufatura permite a obtenção de um produto funcional, isto é, tão bom quanto um recém-fabricado, enquanto a reciclagem somente fornece materiais. Desta forma, nos cenários analisados, a estratégia da remanufatura

[20] Consiste no enriquecimento excessivo de nutrientes (como fosfatos e nitratos) em um corpo d’água, resultando em crescimento demasiado de organismos e depleção da concentração de oxigênio (Ashby, 2013). O acúmulo de nutrientes fosforados e nitrogenados nos corpos d’água acarreta redução do oxigênio dissolvido, mortandade de peixes e emissões de gases tóxicos e GEE (Assis, 2013).

das máquinas de lavar é ambientalmente preferível à sua reciclagem (Sundin e Tyskeng, 2003).

Para viabilizar economicamente um processo sistemático de remanufatura de máquinas de lavar, faz-se necessário o desenvolvimento de uma estrutura de logística reversa que garanta o fornecimento constante de matéria-prima (isto é, máquinas de lavar em fase final de vida útil ou já descartadas) em quantidade e frequência necessárias para a operação de remanufatura (Correa, Serra e Freire, 2020).

5.8.5 Sistema Produto-Serviço (PSS)

Gnoni *et al*. (2017) descrevem que a adoção de novos modelos de negócios que tenham como base o uso em detrimento da propriedade do bem pode favorecer a implementação de estratégias de economia circular. Neste sentido, os autores propuseram um novo modelo de cadeia de suprimentos para máquinas de lavar, integrando a estratégia de PSS a modelos de ciclos fechados para gerenciar os fluxos de logística reversa.

Nesta proposta, a estratégia de PSS consiste em um contrato de leasing[21] em que o consumidor pode utilizar o produto por um determinado período de tempo, como, por exemplo, 5, 10 ou 20 anos, com uma distribuição de custos no decorrer do período. O modelo conta com o fornecimento de um serviço de manutenção para as intervenções necessárias, além de um programa de atualizações. Já a abordagem de circuito fechado permite realizar a coleta dos equipamentos usados ao final do contrato de leasing, favorecendo a recuperação de componentes e materiais para reciclagem e remanufatura, nas situações em que houver viabilidade econômica (Gnoni *et al*., 2017).

Neste modelo, o gerenciamento dos contratos de leasing e das operações de manutenção é efetuado por uma empresa prestadora de serviços, em substituição ao varejista presente em uma cadeia de suprimentos tradicional. Este fornecedor de serviços também passa a ser responsável pelo mercado de matérias-primas secundárias e descarte de sucata. Há, ainda, a previsão da existência de um provedor de serviços logísticos terceirizado, para as atividades de coleta e transporte dos

[21] O leasing consiste em uma abordagem de negócio baseada no acesso ao bem, em que os fabricantes mantêm a propriedade do produto (Gülserliler, Blackburn e Wassenhove, 2021).

equipamentos usados, a serem encaminhados, quando viável, para o processo de recondicionamento, gerido pelo produtor de forma direta ou indireta (Gnoni *et al*., 2017).

Usualmente, o recondicionamento das máquinas de lavar consiste em substituir os pontos de quebra comuns (como motor, bomba e rolamento, dentre outros) e atualizar programas, possibilitando consecutivas operações de leasing. Os produtos recondicionados podem, então, ser encaminhados para um mercado secundário. Quando não há viabilidade técnica ou econômica para o recondicionamento, os materiais seguem para reciclagem (Gnoni *et al*., 2017).

Na prática, a estratégia baseada no sistema produto-serviço apresenta-se desafiadora. Em um estudo de caso realizado junto a um fabricante de equipamentos de linha branca, em que investigaram o modelo de operações consecutivas de leasing de máquina de lavar com etapas intermediárias de remanufatura, Loon, Wassenhove e Mihelic (2021) identificaram que a simples mudança de venda para arrendamento não funciona, visto que muitos outros componentes devem ser considerados.

Dentre as questões subestimadas envolvidas na migração para um modelo de negócio circular, Loon, Wassenhove e Mihelic (2021) citam as atividades de relacionamentos com clientes, logísticas de devolução, operações de remanufatura, e contratos com revendedores e técnicos de serviços. Os autores observam que muitas destas atividades adicionam custos que devem ser otimizados a fim de garantir a sustentabilidade dos negócios da empresa.

Gülserliler, Blackburn e Wassenhove (2021) identificaram as barreiras envolvidas na transição do modelo de negócios por meio de um experimento em que avaliaram as preferências dos consumidores entre as alternativas de compra de uma máquina de lavar nova e de leasing de uma máquina de lavar nova ou usada.

Nesta pesquisa, os autores observaram que 35% dos consumidores sempre preferem a compra de uma máquina de lavar, mesmo em condições de taxas de leasing tão baixas que são menos lucrativas para o fabricante do que a venda do produto. Os autores observaram que é improvável que o preço por si só seja eficaz para alterar a demanda de compra para leasing, e que as preferências dos consumidores são fortemente influenciadas por fatores psicológicos. Dentre os fatores que podem explicar a resistência à alternativa de leasing, os autores elencaram os

sentimentos de orgulho da propriedade e de repulsa a produtos usados por outras pessoas (Gülserliler, Blackburn e Wassenhove, 2021).

No mercado, já é possível observar empresas que oferecem o modelo baseado em sistemas de produto como serviço. A *startup* Bundles, fundada em 2014 em Amsterdam, oferece um modelo de assinatura de máquinas de lavar mediante o pagamento de uma taxa de acesso mensal e uma taxa por lavagem. A Bundles compra as máquinas de um renomado fabricante de bens de consumo duráveis chamada Miele, detém a propriedade do equipamento, e as instala na residência do consumidor, sendo responsável, também, por sua manutenção e reparo. No momento da rescisão do contrato, a *startup* realiza a retirada da máquina de lavar e a encaminha para o processo de recondicionamento, em que o equipamento é avaliado, limpo e reparado para ser reutilizado por outro consumidor (Nahar, 2019).

Do ponto de vista da atratividade deste modelo, mesmo que parte da receita da empresa seja proveniente de um componente fixo, os custos de reparo e reforma são crescentes à medida que as máquinas de lavar são utilizadas. Desta forma, a competitividade do negócio da Bundles é prejudicada pelos altos custos do ciclo de vida resultantes da falta de desenvolvimento conjunto do produto (isto é, a máquina de lavar) com o serviço (ou seja, o modelo de assinatura). Tal cenário decorre do fato que a máquina de lavar, nas condições atuais, não é projetada para a economia circular, isto é, a sua fase de design não considera a ocorrência de múltiplos ciclos de uso (Nahar, 2019).

5.8.6 Compartilhamento

A atividade de compartilhamento apresenta-se como um modo colaborativo de consumo e pode resultar em benefícios para a sociedade e o meio ambiente. Entretanto, há autores que identificaram que o compartilhamento, em detrimento da posse do bem, pode apresentar barreiras culturais à sua implantação (Vasques e Ono, 2016).

Este modelo de negócio é intensivo em interações interpessoais, além de demandar confiança e favorecer as relações entre diferentes usuários. No entanto, no contexto brasileiro, a propriedade de um bem está intrinsicamente associada ao status social e, portanto, o desejo da compra de uma máquina de lavar é muito usual nas camadas sociais menos favorecidas (Vasques e Ono, 2016).

Em uma pesquisa de campo acerca de uma lavanderia coletiva entre vizinhos no município de Curitiba, no Brasil, Vasques e Ono (2016) identificaram que os usuários, em geral, estão satisfeitos com o serviço prestado, ainda que prefiram a aquisição de suas próprias máquinas de lavar e se preocupem com uma possível contaminação e com a privacidade.

Por meio do desenvolvimento de uma análise de ciclo de vida para avaliar o potencial de sistemas compartilhados para a redução de impactos ambientais das atividades de lavanderia na Suécia, Klint e Peters (2021) identificaram que o uso de lavanderias compartilhadas em prédios de apartamentos reduziria as emissões resultantes em cerca de 26%, comparativamente à geração de GEE das máquinas de lavar privadas, estimada em 190 kg de CO_2 eq./kg de roupa lavada e seca.

Além da redução de emissões, comparativamente à alternativa da propriedade privada, o projeto de lavanderias compartilhadas pode resultar em menor consumo de recursos naturais, uma vez que a demanda por área necessária por apartamento é menor e, portanto, uma quantidade reduzida de materiais é utilizada na construção do prédio, ou, ainda, é possível viabilizar uma quantidade maior de apartamentos por prédio (Klint e Peters, 2021).

A análise da bibliografia acerca da adoção de estratégias de circularidade na gestão das máquinas de lavar, permite concluir que nem toda máquina de lavar é passível de reciclagem, remanufatura ou qualquer outra estratégia circular. Para favorecer a sua circularidade, é necessário projetar estes equipamentos de forma que favoreça a sua desmontagem em peças individuais de forma não destrutiva. Faz-se necessário conceber o produto, ainda em sua fase de design, de modo que os componentes da máquina de lavar possam ser facilmente removidos, reparados e/ou substituídos.

6 ANÁLISE DA SUSTENTABILIDADE DAS ESTRATÉGIAS DE ECONOMIA CIRCULAR

Este capítulo inicia com uma discussão acerca da ocorrência de efeito rebote na economia circular, seguida por uma análise do impacto das estratégias circulares sob a sustentabilidade, mediante a proposição de dois sistemas de classificação, quais sejam: quanto aos atributos de circularidade, e quanto ao grau de circularidade. Na sequência, são descritos os custos de recuperação de RSU, bem como as taxas de recuperação dos resíduos têxteis e de equipamentos eletroeletrônicos, enquanto componentes dos RSU. Em seguida, são examinadas as limitações da economia circular como solução mitigadora dos impactos ambientais. A desmercantilização dos bens é, então, apresentada como uma abordagem possível para promover a reconfiguração dos sistemas sociais de produção e consumo. O capítulo é finalizado com o levantamento dos desafios identificados para o aumento da eficácia da economia circular.

6.1 ECONOMIA CIRCULAR E EFEITO REBOTE

Zink e Geyer (2017) observam que é comum o tratamento da economia circular meramente como um sistema de engenharia, sem considerar os fatores econômicos, resultando em suposições implícitas e sem fundamento acerca do impacto da circularidade sob a produção primária de bens. Segundo os autores, ao introduzir os aspectos socioeconômicos complexos, o resultado ambiental da economia circular torna-se ambíguo, visto que o simples fechamento dos ciclos materiais não é suficiente para garantir a melhoria ambiental.

Zink e Geyer (2017) observam que pesquisas recentes vêm questionando o ponto central da economia circular, em uma discussão se o fechamento de ciclos de produtos e materiais realmente impede a produção primária de bens. Os referidos autores argumentam que as atividades de economia circular (as quais possuem impactos mais baixos por unidade de produção) podem ocasionar o aumento da produção, o que pode resultar na compensação parcial ou total dos benefícios obtidos. A este fenômeno, Zink e Geyser (2017) denominaram “*circular economy rebound*” (efeito rebote da economia circular, em tradução livre pela autora).

O potencial efeito rebote, também conhecido como Paradoxo de Jevons, é uma questão não resolvida no âmbito da economia circular. Este fenômeno se faz presente em diversos níveis econômicos, nos quais melhorias na eficiência em função do progresso tecnológico são compensadas pelo aumento do uso do bem (Schröder *et al*., 2019).

Portanto, o efeito rebote da economia circular ocorre quando as atividades circulares acarretam, também, maiores níveis de produção, diminuindo os benefícios obtidos. Dentre as causas para a ocorrência deste fenômeno, está a capacidade limitada de substituição de produtos primários por produtos secundários (Zink e Geyer, 2017).

Por produção secundária, Zink e Geyer (2017) referem-se as três atividades que compõem o núcleo da economia circular, segundo os autores, a saber: reúso ou reutilização em nível do produto (como “reparo” ou “reforma”); reúso ou reutilização em nível do componente (como, por exemplo, “remanufatura”) e reúso ou reutilização em nível dos materiais (o caso da “reciclagem”) (Zink e Geyer, 2017).

Uma segunda causa para a ocorrência do efeito rebote na economia circular consiste no efeito da produção secundária sob os preços de mercado. Esta situação ocorre quando os preços de produtos reutilizados e materiais reciclados são menores que os preços dos produtos primários para compensar deficiências técnicas, sejam estas reais ou percebidas (Zink e Geyer, 2017).

Este é o caso de produtos da economia circular que possuem qualidade inferior aos respectivos produtos primários e, para se tornarem mais competitivos, são vendidos por preços inferiores. Os produtores à jusante que os comprarem em um efeito-substituição[22] aos produtos primários passarão a ser comparativamente mais ricos (mediante um fenômeno de efeito-renda[22]) e poderão comprar mais materiais e, desta forma, produzir mais bens. Tais produtos tendem a ser de qualidade inferior e, portanto, serão vendidos aos consumidores finais também com desconto, ocasionando a multiplicação do efeito-renda. Portanto, o aumento da reciclagem

[22] Segundo a hipótese de maximização da utilidade, para bens normais (situação em que a quantidade demandada aumenta à medida que a renda aumenta), a diminuição no preço de um bem resulta em um aumento na quantidade consumida porque o efeito-substituição faz com que o indivíduo aumente o seu consumo à medida que se desloca ao longo de uma curva de indiferença, e o efeito renda faz com que o indivíduo consuma mais porque a redução do preço aumenta o seu poder de compra, conduzindo a uma curva de indiferença mais elevada. (Nicholson e Snyder, 2012).

resultará, neste caso, no aumento da produção e do consumo do bem (Zink e Geyer, 2017).

Ao estudarem o efeito rebote da economia circular, Zink e Geyer (2017) ressaltam a analogia que este fenômeno apresenta com a eficiência energética. O efeito rebote ocorre quando o aumento da eficiência faz com que o consumo de um determinado bem (como, por exemplo, energia ou transporte) fique relativamente mais barato, resultando no aumento do seu consumo. O aumento do uso reduz o benefício ambiental gerado pelo acréscimo da eficiência, podendo, até mesmo, ser proporcionalmente superior ao ganho de eficiência, conduzindo a impactos líquidos maiores (Zink e Geyer, 2017).

Desta forma, o efeito rebote ocorre quando os aumentos da eficiência na etapa de uso são compensados pelo o acréscimo do uso. No caso da economia circular, ocorre quando aumentos na eficiência da produção ou do consumo são compensados por acréscimos nos níveis de produção e consumo (Zink e Geyer, 2017).

Para evitar o efeito rebote da economia circular, Zink e Geyer (2017) sugerem potenciais estratégias (como assegurar que os produtos sejam bons substitutos para os produtos de referência, além de concentrar esforços em mercados com compradores que apresentem baixa sensibilidade ao preço), mas observam que é pouco provável que estas estratégias sejam lucrativas para as organizações privadas. Os referidos autores relatam, ainda, que incentivar estas empresas na busca por oportunidades circulares atrativas tende a ocasionar o efeito rebote e diminuir, ou até mesmo, eliminar os benefícios ambientais potenciais (Zink e Geyer, 2017).

Para Zink e Geyer (2017), o princípio central por trás do apelo ambiental da economia circular é se as atividades de produção secundária diminuem ou “deslocam” a produção primária. Os referidos autores observam que, caso positivo, atinge-se a promessa intuitiva da economia circular, mas, caso contrário, aos impactos da produção primária serão somados os impactos do aumento da produção secundária. Ademais, na ausência de deslocamento, o aterro de materiais não é reduzido, mas somente adiado, e a extração de recursos não sofre alteração ou, até mesmo, aumenta (Zink e Geyer, 2017).

Zink e Geyer (2017) relatam que pesquisadores da área de ecologia industrial vêm, de forma implícita, considerando que o deslocamento ocorre na proporção de 1:1, isto é, cada 1 kg de produção secundária diminui a produção primária em 1 kg.

No entanto, esta visão não incorpora os mercados existentes. Ao analisaram a atividades de economia circular puramente como sistemas de engenharia (em que os fluxos aparentam fluir diretamente no sentido consumidor-coletor-processador-secundário-fabricante-consumidor, como no Diagrama de Sistema de Economia Circular da Fundação Ellen MacArthur), defensores da economia circular tendem a ignorar a influência dos fatores econômicos (Zink e Geyer, 2017). Neste sentido, McMillan *et al* (2012) *apud* Zink e Geyer (2017) relatam que o deslocamento é orientando, principalmente, pelas tendências de mercado.

As forças de mercado permeiam quase todas as etapas da economia circular. Há mercados para produtos finais, produtos em fim de vida, sucatas não processadas, sucatas semiprocessadas, materiais reciclados, produtos reformados ou recondicionados, produtos reparados em segunda mão, entre outros. Em cada um destes mercados, os produtos secundários competem de forma direta com os produtos primários. Apesar da expectativa de que a competição possa resultar na diminuição da produção de materiais e produtos primários, ela também torna as interações entre os produtos primários e secundários mais imprevisíveis, se comparadas a um modelo de engenharia (Zink e Geyer, 2017).

Para Zink e Geyer (2017), não há motivos para crer que as forças de mercado conduziriam ao pleno deslocamento. Desta forma, os referidos autores sugerem que a questão principal acerca da economia circular é, se, e até que ponto a produção secundária desloca ou substitui a produção primária.

Em seus estudos acerca dos mecanismos econômicos envolvidos no deslocamento da produção primária pelo aumento da reciclagem Zink, Geyer e Startz (2015) observam que, o deslocamento 1:1 é improvável em mercados de *commodities* competitivos. Concluem, também, que o deslocamento zero é possível caso os materiais secundários sejam substitutos fracos dos materiais primários. Também verificam que o deslocamento provavelmente é reduzido nos casos em que os materiais secundários possuam propriedades técnicas inferiores.

Portanto, Zink e Geyer (2017) concluem que o fechamento dos ciclos materiais de produtos por si só não é suficiente para assegurar a melhoria ambiental, sendo necessário gerar o deslocamento ou a substituição da produção primária. Os referidos autores observam que as atividades da economia circular podem conduzir a um efeito

rebote por não conseguirem competir de forma eficaz com a produção primária, ou por reduzirem os preços e, desta forma, aumentarem o consumo.

Schröder *et al*., 2019 reforçam a discussão acerca do potencial efeito rebote ao concluírem que não está claro se a economia circular pode conduzir a resultados globais de sustentabilidade dentro dos limites ecológicos da Terra.

6.2 IMPACTO DAS ESTRATÉGIAS CIRCULARES SOB A SUSTENTABILIDADE

Por meio da revisão bibliográfica, foi possível verificar características convergentes entre diversas estratégias de economia circular, o que possibilitou o desenvolvimento de dois sistemas de classificação com vistas à análise da sustentabilidade das referidas práticas.

No primeiro sistema de classificação, as estratégias circulares são agrupadas em função dos seus atributos de circularidade, resultando em três modelos, a saber: i. Minimização do consumo de recursos naturais; ii. Maximização da vida útil do produto; iii. Acesso.

Já, no segundo sistema de classificação, as estratégias de economia circular são estratificadas quanto ao seu grau de circularidade, em uma verificação ao longo das principais fases do ciclo de vida de um produto, isto é, desde a extração dos recursos naturais até a sua disposição em aterro sanitário, compreendendo, portanto, as etapas de projeto, uso e fim de vida útil.

A seguir, são apresentadas as avaliações quanto aos dois sistemas propostos de classificação das estratégias circulares.

6.2.1 Análise quanto aos atributos de circularidade

Na Figura 52 é proposta uma matriz de distribuição das estratégias circulares em três modelos, em função das propriedades identificadas na revisão de literatura.

O primeiro modelo constitui-se naquelas estratégias que envolvem o aumento da eficiência do consumo de matérias-primas. Este grupo abrange as seguintes iniciativas:

a) Reciclagem: possibilita a recuperação de materiais, que seguiriam para descarte final, e reintroduzi-los em outras cadeias de processamento, diminuindo, desta forma, a necessidade de extração de recursos naturais;

b) Insumos circulares: permite que materiais oriundos de atividades de reforma, reparo, reciclagem ou remanufatura sejam utilizados como matérias-primas para outras cadeias de produção, em detrimento do seu descarte;

c) Recuperação de recursos: possibilita a redução do consumo de matérias-primas e a diminuição do desperdício de recursos;

d) Virtualização: a substituição de produtos físicos por serviços digitais resulta na diminuição do consumo de recursos.

O segundo modelo consiste nas estratégias que promovem a otimização do tempo de vida útil dos produtos e seus componentes. Inclui as seguintes iniciativas circulares:

a) Extensão da vida útil: promove o prolongamento da vida útil do produto;

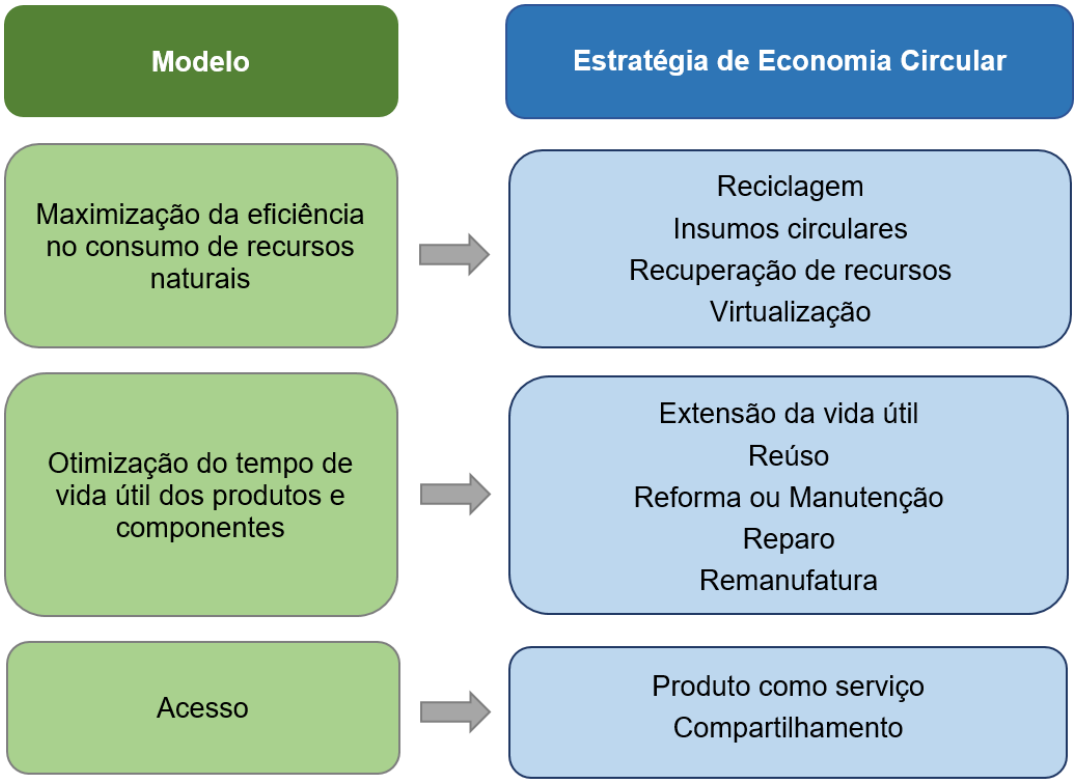
b) Reúso: possibilita a reutilização de um produto para a mesma finalidade para o qual foi projetado, evitando a extração de recursos naturais;

c) Reforma (ou manutenção), reparo e remanufatura: por consistirem na substituição de peças ou componentes defeituosos, possibilitam o aumento da vida útil do produto que está sendo reformado, reparado ou remanufaturado, em detrimento do seu descarte.

Por fim, o terceiro grupo consiste nos modelos baseados no acesso à funcionalidade do bem, representados pelas estratégias de Sistema Produto-Serviço e compartilhamento. Nestas inciativas circulares ocorre uma mudança dos padrões de uso dos produtos, uma vez que se baseiam no acesso ao uso do bem em

detrimento da sua propriedade, possibilitando a redução da quantidade produzida e, portanto, do consumo de recursos naturais.

Figura 52 - Estratégias de economia circular sistematizadas por modelo de ação



Fonte: elaboração própria (2024)

Sob a perspectiva do alcance da sustentabilidade por meio da adoção de estratégias circular, observa-se que as iniciativas descritas na Figura 52 apresentam restrições de eficácia.

As estratégias que promovem a maximização da eficiência no consumo de recursos naturais encontram limitações técnicas e econômicas após sucessivos ciclos de processamento. A reciclagem de 100% dos resíduos gerados não se apresenta viável porque não é possível coletar a totalidade dos produtos usados. Além disso, nem todos os materiais são passíveis de reciclagem, o que também inviabiliza a reciclagem integral dos bens gerados.

Sob a perspectiva do processamento, a cada ciclo de reciclagem, os custos são crescentes e uma quantidade menor de material é recuperada por meio da reciclagem, reduzindo a eficiência operacional. Os sucessivos processamentos

ocasionam, também, o aumento progressivo do consumo de água e energia envolvidos na fabricação do produto, além da geração crescente de resíduos e efluentes. Esse processo se repete até o momento em que não há mais viabilidade técnica e/ou econômica para a continuidade da reciclagem, e o descarte final passa a ser inevitável.

Da mesma forma como nenhum material é infinitamente reciclado, os insumos recirculados de atividades de reforma, reparo, reciclagem ou remanufatura, bem como os recursos recuperados, após sucessivos ciclos de processamento, encontram um ponto de inviabilidade técnica e/ou econômica para a utilização como matérias-primas para outras cadeias de produção.

A ideia de que a reciclagem é um processo finito encontra amparo sob a perspectiva da ecologia industrial, por se tratar de uma abordagem que aproxima o estudo dos sistemas industriais ao funcionamento dos sistemas naturais.

Em 1961, Hayflick e Moorhead demonstraram que as células humanas dividem-se entre 40 e 60 vezes até que, atingido esse marco, param. Conhecido como “Limite de Hayflick”, os sucessivos ciclos de divisão celular acarretam o encurtamento do comprimento dos telômeros de DNA, em um processo que acaba culminando na impossibilidade das células continuarem se dividindo, resultando no envelhecimento (Verma, Verma e Singh, 2020).

Desta forma, assim como o fenômeno de Hayflick explica por que o ser humano tem um tempo de vida máximo (não podendo, portanto, ter uma vida eterna, mediante a tecnologia atual), é possível concluir, por analogia, a finitude do processo de reciclagem após sucessivos ciclos de processamento.

No caso das roupas, a reciclagem encontra relevante limitação na variabilidade de mistura de fibras, o que dificulta a separação e reciclagem das peças. Além disso, como as fibras recicladas são curtas (e, portanto, apresentam baixa resistência e qualidade) faz-se necessário o acréscimo de fibras longas (isto é, novas) para a fabricação de tecidos reciclados. Desta forma, o aporte de materiais reciclados em uma peça de roupa é limitado, resultando no consumo de recursos naturais.

Já, na estratégia de virtualização de bens, se por um lado a migração da infraestrutura física por serviços digitais reduz a necessidade da produção física de bens, os processos de inteligência artificial são potencialmente geradores de impactos ambientais, uma vez que são intensivos no consumo de água e energia.

Ao analisar as estratégias que promovem a otimização do tempo de vida útil dos produtos e componentes, observa-se que tais iniciativas podem prolongar o tempo de vida de um bem, mas, inevitavelmente, após sucessivos ciclos, o produto seguirá para o descarte final. Além disso, em suas essências, os processos de reforma (ou manutenção), reparo e remanufatura resultam na geração de peças e componentes defeituosos que, ao serem descartados, podem gerar impactos adversos ao meio ambiente.

Analisando as estratégias de otimização da vida útil dos produtos, é possível verificar que a extensão de vida útil de roupas por meio da revenda em brechós, bem como a sua remanufatura são estratégias que prolongam o tempo de vida útil dos bens, adiando o seu descarte final, mas não o impedindo.

Além disso, no caso da remanufatura de máquinas de lavar, identificou-se que a ferramenta de Design for Remanufacturing é essencial para viabilizar esta estratégia. Desta forma, faz-se necessário projetar os equipamentos de forma a permitir a sua desmontagem não destrutiva e utilizando componentes modulares e intercambiáveis, que facilitem a troca das peças.

Ainda como estratégia de otimização da vida útil do produto, o reúso de máquinas de lavar, mesmo em cenários de elevadas taxas, demonstrou apresentar benefícios marginais sobre a redução dos impactos ambientais.

Por fim, as estratégias baseadas no acesso ou uso do bem podem até resultar em economia na extração de recursos naturais (uma vez que a necessidade de produção física diminui), mas a fase de produto continua consumindo recursos naturais como água e energia. Produtos que apresentam a fase de uso como a mais intensiva no consumo de recursos naturais (como no caso da máquina de lavar) e são submetidos a muitos ciclos de utilização por meio dessas estratégias podem experimentar o aumento da geração de impactos ambientais.

Desta forma, uma máquina de lavar compartilhada ou substituída pelo serviço de assinatura pode apresentar um efeito prejudicial, em detrimento do senso comum, em virtude do maior consumo de água e eletricidade, além de maior geração de efluentes líquidos.

A estratégia de substituição de produto por serviço no caso das máquinas de lavar encontra, ainda, a limitação de que os custos de reparo são crescentes com o aumento da quantidade de ciclos de uso, o que pode colocar em risco a sobrevivência

do negócio. Além disso, a máquina de lavar, como está hoje, não é projetada para suportar múltiplos e sucessivos ciclos de uso.

Já o compartilhamento de roupas apresenta-se como uma estratégia promissora no segmento de luxo, em que o indivíduo pode preferir o serviço de aluguel de um traje de festa, por exemplo, em detrimento da sua compra. Fora deste nicho de mercado, esta estratégia encontra limitação frente à facilidade de compra de produtos novos, devido à ampla oferta (em meios digitais e no comércio alternativo) a preços competitivos.

Ademais, o uso intensivo de equipamentos por múltiplos e variados usuários nos modelos de produto como serviço e compartilhamento pode acelerar a sua deterioração física e/ou funcional, resultando na antecipação do seu descarte final em aterros sanitários e, impulsionando a produção e venda de mais produtos em um fenômeno de efeito-rebote.

As estratégias de troca de produto por serviço e compartilhamento apresentam, ainda, uma limitação quanto à sua baixa aplicabilidade, uma vez que não são todos os produtos que podem ser substituídos por serviços ou compartilhados.

Desta forma, a análise das estratégias circulares segundo os seus atributos permite concluir que a economia circular pode auxiliar, mas, por si só, não é suficiente, para aprimorar a sustentabilidade de processos e atividades.

6.2.2 Análise quanto ao grau de circularidade

O presente trabalho propõe, também, um diagrama de classificação das estratégias de economia circular verificadas na literatura em função do nível de circularidade que apresentam, apresentado na Figura 53. Tais estratégias foram agrupadas em três fases distintas ao longo da cadeia de valor de um produto, a saber: projeto; uso; e fim de vida útil.

As estratégias relacionadas a decisões na fase de projeto compreendem a utilização de insumos circulares, virtualização e utilização de produtos como serviços. Já as estratégias identificadas na fase de uso do produto correspondem à extensão da vida útil, reforma ou manutenção, compartilhamento, reparo, reúso e remanufatura, isto é, atividades que promovam a ampliação da vida útil de um produto. Por fim, a reciclagem é a estratégia identificada na fase de fim de vida útil do produto.

Observa-se que, as estratégias localizadas na fase de projeto demandam menor consumo de matéria e energia, apresentando, ciclos mais curtos, em relação às demais fases.

Por sua vez, estratégias relacionadas à fase de fim da vida útil, como a reciclagem, apresentam ciclos maiores, com acréscimos no consumo de matéria e energia, e se aproximam do descarte em aterros, consistindo, portanto, em estratégias com menor impacto de circularidade.

Já as estratégias circulares correspondentes à fase de uso do produto apresentam níveis de demanda de matéria e energia intermediários, isto é, maiores que as soluções de projeto e inferiores às soluções de fim de vida útil.

Figura 53 - Estratégias da economia circular ao longo da cadeia de valor de valor

Fonte: elaboração própria (2024)

Desta forma, é possível concluir que o efeito positivo de estratégias circulares sob a sustentabilidade global diminui ao longo da cadeia de valor de um produto, sendo maior na fase de concepção (requerendo menor consumo de recursos naturais) e menor na fase de fim de vida útil (apresentando maior consumo de matéria e energia).

A estratégia da reciclagem está posicionada à jusante da cadeia de suprimentos dos produtos, mais precisamente, na etapa de fim de vida útil do bem. Observa-se que medidas tomadas nesta etapa tem influência limitada sob a mitigação de impactos ambientais, uma vez que o sucesso desta configuração depende de processos preliminares (como aqueles relacionados à coleta e processamento) que, muitas vezes, apresentam baixa eficiência de conversão.

Portanto, a fim de aumentar a eficácia das estratégias de circularidade, é necessário adotar medidas à montante da cadeia de valor, agregando valor ao longo da sua sequência. Atuam neste sentido ações como: i. redução dos níveis de produção e consumo; ii. desenvolvimento de rotas eficientes para coleta e logística reversa de produtos; iii. *redesign* de produtos para que favoreça a sua recuperação, remanufatura ou reciclagem, por meio de projetos que contemplem, desde a fase de concepção do produto, a facilidade na sua desmontagem, inspeção e reparação.

6.3 RECUPERAÇÃO DE RESÍDUOS: CUSTOS E TAXAS

A pesquisa bibliográfica acerca de custos e taxas de recuperação de resíduos têxteis e de equipamentos eletroeletrônicos a partir de estratégias de economia circular conduziu a resultados associados à estratégia de reciclagem de RSU.

Diante da restrição de informações de custos relativos aos dois grupos de produtos analisados, admitiu-se a utilização dos dados obtidos para a recuperação dos RSU. Esta aproximação apresenta-se válida uma vez que resíduos têxteis e de equipamentos eletroeletrônicos estão presentes na composição dos RSU.

Em relação às taxas de recuperação, foram obtidas informações relativas à recuperação dos dois grupos de produtos analisados, o que possibilitou uma análise comparativa aos índices de recuperação dos RSU.

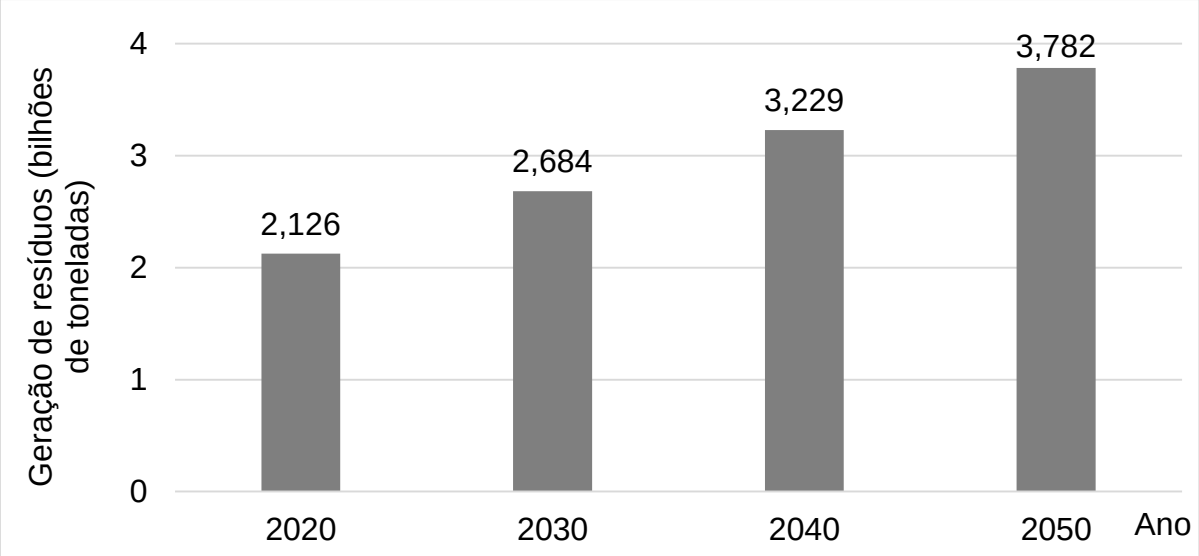
A seguir, são avaliados os custos de recuperação de RSU, as suas taxas de recuperação e as taxas de recuperação de resíduos têxteis e de equipamentos eletroeletrônicos, comparativamente aos índices de recuperação de RSU.

6.3.1. Custos de recuperação de RSU

O mundo gerou em torno de 2,1 bilhões de toneladas de RSU no ano de 2020, segundo estimativa contida no relatório Global Waste Managment Outlook 2024, emitido pela United Nations Environment Programme (UNEP, 2024).

As projeções acerca da geração global de RSU contidas no relatório da UNEP (2024) indicam o alcance de 3,8 bilhões de toneladas em 2050 (conforme pode ser observado na Figura 54), isto é, um aumento de 56% em 3 décadas.

Figura 54 - Projeções de geração global de RSU por ano em 2030, 2040 e 2050, na ausência de ações urgentes



Fonte: adaptado de UNEP (2024)

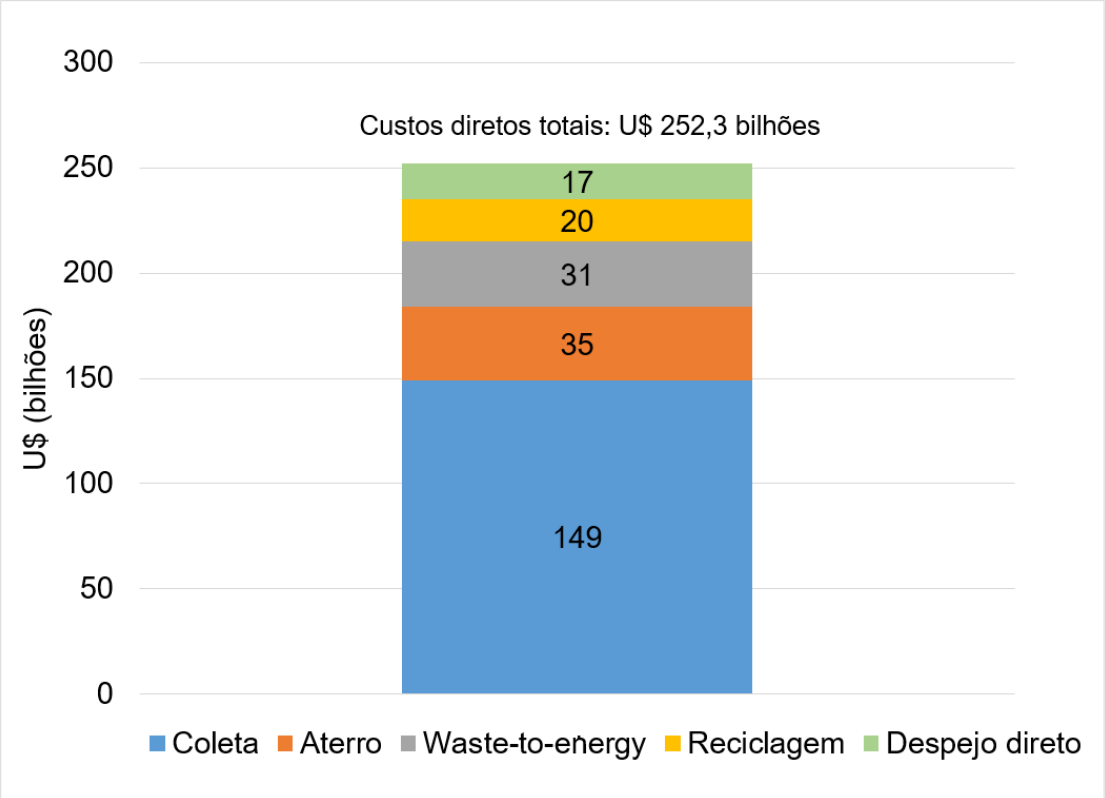
As quantidades crescentes de RSU motivadas por padrões insustentáveis de produção e consumo ocasiona o aumento de custos para a sociedade. O custo direto global do gerenciamento dos RSU foi estimado em US$ 252,3 bilhões no ano de 2020 (UNEP, 2024). A Figura 55 apresenta os custos diretos estimados da gestão dos RSU no mundo em 2020. A organização UNEP (2024) narra que estes custos diretos não incluem os custos de externalidades decorrentes das práticas inadequadas na gestão dos RSU.

A análise da Figura 55 permite observar que a maior parcela dos custos corresponde à etapa de coleta, com custos em torno de US$ 149 bilhões, isto é, aproximadamente 59% do custo total. O segundo maior custo na gestão dos RSU refere-se à destinação em aterro, respondendo por US$ 35 bilhões, ou seja, em torno de 14% do custo total. Na sequência, correspondente a cerca de 12% dos custos totais, tem-se US$ 31 bilhões de custos associados à transformação de resíduos em energia, conhecida como *waste-to-energy*, método descrito por UNEP (2024) como um tratamento por incineração com recuperação de energia utilizado por uma quantidade relativamente pequena de países. A organização UNEP (2024) destaca os significativos investimentos iniciais em infraestrutura necessários requeridos por aterros projetados em usinas *waste-to-enegy*, além dos elevados custos de operação e manutenção de ambos.

Já os custos de reciclagem de RSU são estimados em US$ 20 bilhões, isto é, cerca de 8% do custo total, uma vez que UNEP (2024) descreve que a reciclagem necessita de infraestrutura de triagem e processamento, além de apresentar custos operacionais contínuos.

Por fim, até mesmo o despejo direto (conhecido como “a céu aberto”) apresenta custos de US$ 17 bilhões, o que corresponde a cerca de 7% dos custos totais, uma vez que, conforme relatado por UNEP (2024), há perda do valor da terra.

Figura 55 - Custos diretos estimados da gestão de RSU no mundo em 2020



Fonte: adaptado de UNEP (2024)

Além dos custos diretos de gestão dos RSU de US$ 252,3 bilhões em 2020, a publicação da UNEP (2024) estima custos de externalidades de US$ 243,3 bilhões relacionados aos impactos à saúde e ao meio ambiente, além de custos de externalidades de US$ 134,6 bilhões, desta vez, associados a ganhos provenientes da reciclagem, totalizando, portanto, custos globais totais de US$ 361 bilhões com a gestão dos RSU em 2020 (UNEP, 2024).

Partindo das estimativas indicadas por UNEP (2024) quanto à geração mundial de RSU de 2,1 bilhões de toneladas no ano de 2020 e dos custos diretos associados à gestão dos RSU de US$ 252,3 bilhões em 2020, é possível inferir que o custo direto da gestão de RSU pode ser estimado em US$ 120,14/kg de RSU.

Ao se considerar os custos globais totais da gestão de RSU (isto é, abrangendo as externalidades positivas e negativas) estimados em US$ 361 bilhões em 2020, permite-se inferir um custo global total da gestão de RSU de US$ 171,90/kg de RSU.

Em termo de reciclagem, uma vez que a UNEP (2024) estima em US$ 20 bilhões os custos diretos de reciclagem de RSU em 2020, é possível inferir que o custo direto de reciclagem de RSU pode ser estimado em US$ 9,52/kg de RSU.

6.3.2 Taxas de recuperação de RSU

Dados da instituição Associação Nacional de Catadores e Catadoras de Materiais Recicláveis (ANCAT) a partir de informações de associações setoriais e indústrias, apresentados na Tabela 14 demonstram as taxas de reciclagem dos materiais reciclados presentes nos resíduos sólidos urbanos no Brasil. É possível verificar que são poucos os casos de sucesso de reciclagem de materiais. Mesmo o material que apresenta a maior taxa de reciclagem verificada, isto é, as latas de alumínio, ainda assim não apresenta reciclagem na sua totalidade, alcançando um índice de 98,7% no ano de 2021. Além do alumínio, o chumbo é outro material que, a despeito das elevadas taxas de reciclagem, ainda assim, não apresenta reciclagem da totalidade gerada.

As baterias de chumbo-ácido, utilizadas nos veículos automotores, apresentam taxa de reciclagem de 99% (ABREMA, 2024a). Segundo o Instituto Brasileiro de Energia Reciclável (IBER), entidade gestora do sistema de logística reversa desses materiais, o chumbo representa 52% da composição do peso das baterias, enquanto plástico e solução ácida representam 6% e 30%, respectivamente (ABREMA, 2023; IBER, 2022).

Tabela 14 - Taxas de reciclagem dos materiais reciclados presentes nos RSU

Ano	Latas de alumínio	Papel	Vidro	Plástico	PET	Latas de aço	Embalagens longa vida
2018	96,9%	69,8%	26,1%	22,1%	N.D.	N.D.	29,1%
2019	97,6%	66,9%	26,2%	24,0%	55,0%	47,1%	31,1%
2020	97,4%	70,3%	22,0%	23,1%	N.D.	47,0%	43,7%
2021	98,7%	N.D.	N.D.	N.D.	56,4%	N.D.	35,9%

Fonte: adaptado de ANCAT (2022)
Nota: A abreviação N.D. significa dados indisponíveis e/ou não informados pela indústria.

Observa-se que, mesmo em um cenário em que ocorra o aumento dos índices de reciclagem de materiais no contexto da economia circular, o problema da degradação ambiental está distante de ser resolvido, uma vez que os volumes de produção e consumo dos materiais são elevados e crescentes.

É possível verificar, ainda, a baixa magnitude no aumento dos índices de reciclagem dos materiais ao longo do período analisado. Embalagens longa vida, que constituem os materiais com a maior taxa de reciclagem observada, tiveram um aumento de somente 6,8% no seu índice no período de 2018 a 2021. Já as latas de alumínio, o papel, o plástico e o politereftalato de etileno (PET) apresentaram acréscimos em suas taxas de reciclagem, respectivamente, na ordem de 1,8% (de 2018 a 2021), 0,5% (de 2018 a 2020), 1,0% (de 2018 a 2020), 1,4% (de 2019 a 2021). A despeito destes baixos incrementos das taxas de reciclagem, há materiais que apresentaram redução dos seus índices, sendo eles o vidro (com uma diminuição de 4,1% no período de 2018 a 2020) e as latas de aço (com uma queda de 0,1% entre os anos de 2019 a 2020).

No caso específico da reciclagem de plástico, o baixo valor de mercado da sucata, os elevados custos de reciclagem e os baixos preços do petróleo conduzem a um cenário em que a reciclagem do plástico é mais cara do que a sua fabricação. Ademais, o plástico enfrenta uma barreira técnica na indústria da reciclagem uma vez que, mesmo plásticos altamente recicláveis (como o politereftalato de etileno ou o polietileno de alta densidade) têm sua qualidade degradada ao longo do tempo, apresentando processamentos limitados a dois ou três ciclos de reciclagem antes de não serem mais utilizáveis (Romuno, 2021).

Ao discorrer sobre a reciclagem de plásticos, Syberg (2022) alerta para o fato de que a reutilização de plásticos e outros materiais não é suficiente. Para concretizar a economia circular, o autor relata que é necessário, de início, reduzir a produção de bens.

A reciclagem de papel também passa por limitações técnicas, uma vez que a cada ciclo, as fibras vão se tornando mais curtas e ocorre a degradação da sua qualidade. Desta forma, em geral, o papel é reciclável somente seis vezes até não poder ser mais utilizado em produtos de papel. Já as fibras curtas, frequentemente, seguem para a fabricação de caixas de ovos ou papel higiênico, os quais saem do ciclo de reciclagem e se tornam resíduos (Romuno, 2021).

Além das barreiras técnicas de processamento, a reciclagem de materiais encontra uma restrição em termos logísticos. A ineficiência nos processos de coleta seletiva e os elevados custos logísticos com o transporte de grandes distâncias entre os pontos de geração de resíduos e as unidades de recuperação contribuem para as baixas taxas de reciclagem, impedindo que os materiais pós-consumo cheguem às unidades de processamento em quantidade e qualidade requeridas para a reciclagem sistemática dos materiais.

Desta forma, mesmo no caso de materiais com elevadas taxas de reciclagem, como alumínio e chumbo, ainda assim, a reciclagem não alcança o patamar de 100% porque nem todo os materiais são coletados e, ainda que fossem, nem todo os materiais são recicláveis. Além disso, no processo de reciclagem, a cada ciclo de processamento, os custos são crescentes com o aumento dos volumes processados. Já a eficiência diminui a cada ciclo de reciclagem, uma vez que o estoque de matéria vai sendo consumido e a demanda por energia vai aumentando, visto que a reciclagem é um processo que consome matéria e energia. Os ciclos de reciclagem vão se sucedendo até o momento em que não há mais viabilidade técnica e/ou econômica, e o descarte final passa a ser inevitável.

6.3.3 Taxas de recuperação de resíduos têxteis e eletroeletrônicos vs. RSU

Como uma medida para realizar um diagnóstico da situação dos resíduos no Brasil e propor metas de redução, reutilização e reciclagem dos materiais, dentre

outras medidas, a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) previu, ao ser instituída em 2010, a criação do Plano Nacional de Resíduos Sólidos.

Doze anos após, o Decreto Federal nº 11.043, de 13 de abril de 2022, aprovou o referido documento, chamado Planares (Brasil, 2022).

Em sua meta de número 4, o Planares estabelece a redução da quantidade de resíduos e rejeitos enviados para disposição final ambientalmente adequada. Para isso, o Índice Nacional de Recuperação de Resíduos (IRR) é um dos principais indicadores do plano e retrata o percentual da massa recuperada (Brasil, 2022).

O IRR é obtido mediante o seguinte cálculo, de acordo com o Sistema Nacional de Informações sobre a Gestão dos Resíduos Sólidos (SINIR, 2021):

$$\frac{\text{(Reutilização + Reciclagem + Recuperação energética)}}{\text{Geração de RSU}}$$

Dados do Relatório Nacional de Gestão de Resíduos Sólidos de 2019 (SINIR, 2021) indicam um IRR nacional de 1,67%.

A Tabela 15 apresenta as metas de recuperação de RSU ao longo dos anos, com um alcance projetado de IRR de 48,1% da massa total de RSU no Brasil até 2040.

Tabela 15 - Índices de recuperação de RSU

Regiões/Ano	2020	2024	2028	2032	2036	2040
Norte	1,2%	15,3%	18%	20,7%	23,5%	26,2%
Nordeste	1,6%	11,3%	15,1%	18,9%	22,8%	26,6%
Centro-Oeste	1,9%	13,4%	18,5%	23,6%	28,8%	33,9%
Sudeste	1,9%	14,3%	26,7%	39,1%	51,5%	63,9%
Sul	4,7%	17,1%	29,5%	41,9%	54,3%	66,7%
Brasil	2,2%	13,8%	22,4%	31%	39,6%	48,1%

Fonte: adaptado de Brasil, 2022

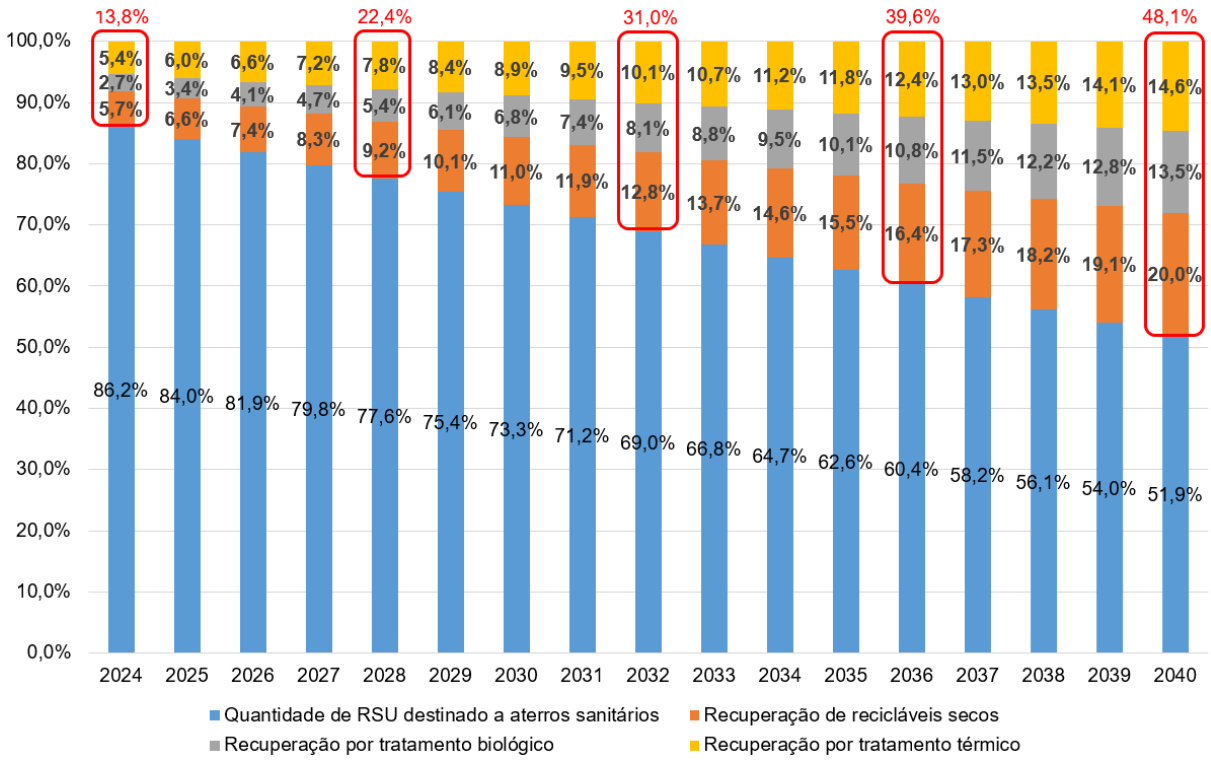
A meta de IRR estipulada em 48,1% até 2040 é oriunda do somatório dos seguintes fatores: 20% (correspondente à recuperação de materiais recicláveis), 13,5% (referente à massa total destinada para tratamento biológico) e 14.6% (relativa à recuperação energética) (Brasil, 2022).

A definição destas metas considerou ações que visem encerrar os lixões e aterros controlados, além de fortalecer as redes de logística reversa e incentivar a reciclagem, o tratamento biológico e a recuperação energética dos RSU (Brasil, 2022).

Em seu relatório Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2022, a então ABRELPE, atual ABREMA (2022) apresenta um detalhamento das metas do Planares por tipo de destinação final de RSU, demonstrado na Figura 56. Nesta estimativa, a instituição considera os seguintes fatores: eliminação de lixões e aterros controlados até 2024; recuperação da fração orgânica por tratamento biológico; recuperação da fração seca dos materiais recicláveis por processos de reciclagem; e recuperação e aproveitamento energético por tratamento térmico (ABREMA, 2022).

Neste cenário, a Figura 56 permite verificar a expectativa de aumento crescente das taxas de recuperação, reciclagem e aproveitamento energético (resultando em uma massa recuperada de 48,1% do total de RSU gerados) em detrimento da redução da destinação final em aterros sanitários para um patamar de 51,9% da massa total de RSU até o ano de 2040.

Figura 56 - Metas do Planares por tipo de destinação final de RSU



Fonte: adaptado de ABREMA (2022)

Adicionalmente, o documento Planares (Brasil, 2022) relata um índice de 2,2% de recuperação de materiais recicláveis no ano de 2020. O referido documento informa, ainda, que, segundo bancos de dados oficiais (não informados), o índice de recuperação de recicláveis secos não ultrapassa 3%.

Não foram identificados dados de literatura (tais como relatórios ou panoramas) acerca do atual IRR brasileiro nas bases de informações da ABREMA ou da ISWA (International Solid Waste Association). Já uma pesquisa livre no website Google resultou em variadas notícias informando que somente 4% dos RSU são reciclados no Brasil. Esta estimativa está presente, inclusive no site da ABREMA (2024b) reportando uma matéria creditada ao jornal Folha de São Paulo em 05 de julho de 2024.

Observa-se que a referida estimativa encontra-se abaixo da meta estimada no Planares (Brasil, 2022) de 5,7% de recuperação de materiais por processos de reciclagem.

As taxas de recuperação identificadas nos capítulos 4 e 5 do presente trabalho para os resíduos têxteis e os resíduos de equipamentos eletroeletrônicos são comparadas ao índice de recuperação de resíduos determinado no documento Planares (Brasil, 2022) e apresentadas na Figura 57.

Esta comparação foi realizada a partir da compreensão do conceito de resíduos sólidos urbanos expressa na PNRS, instituída pela Lei nº 12.305 de 02 de agosto de 2010 (Brasil, 2010), que os classifica quanto à origem, como resíduos domiciliares (sendo aqueles que têm origem em atividades domésticas em residências urbanas) e resíduos de limpeza urbana (aqueles que têm origem em varrição, limpeza de logradouros e vias públicas e demais serviços de limpeza urbana).

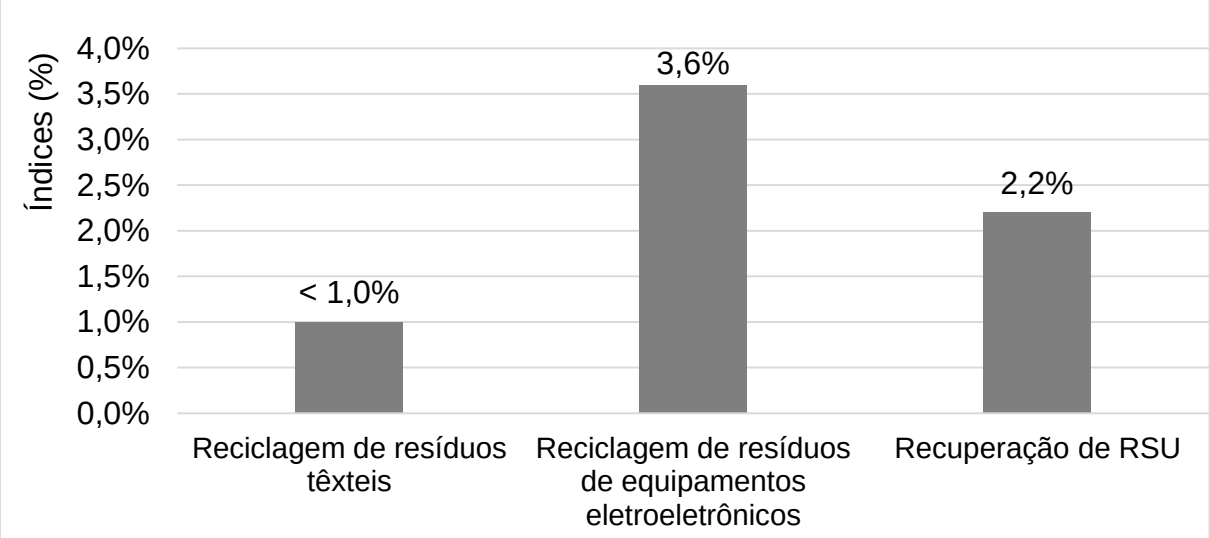
No âmbito dos resíduos têxteis, é utilizada a informação de Ellen MacArthur Foundation (2017a) de que menos de 1% do material utilizado para produção de roupas é reciclado em novas peças de vestuário, abrangendo a reciclagem após fabricação e uso.

Já em relação aos resíduos de equipamentos eletroeletrônicos, utilizou-se a taxa brasileira de reciclagem de aproximadamente 3,6% verificada por meio de Dias *et al.* (2022).

Uma vez que os anos de referência das informações não são os mesmos para os resíduos têxteis e os eletroeletrônicos, para permitir uma mesma base de

comparação, utilizou-se o índice de recuperação de resíduos disponível no documento Planares (Brasil, 2022) mais próximo dos dois casos, isto é, o ano de 2020.

Figura 57 - Comparativo entre os índices de reciclagem de resíduos têxteis e eletroeletrônicos e a recuperação de RSU



Fonte: elaboração própria (2024)

A análise da Figura 57 permite observar que o índice mundial de reciclagem de roupas em outras peças de vestuário (estimado em um patamar anual inferior a 1,0% do material utilizado para a fabricação de roupas) está consideravelmente abaixo do índice de recuperação de RSU no Brasil em 2020 (isto é, 2,2% do total gerado). Já a reciclagem de resíduos de equipamentos eletroeletrônicos no país (projetado em 3,6% ao ano) supera o índice de recuperação de RSU em 2020.

Uma possível explicação para este cenário reside no fato de que produtos eletroeletrônicos apresentam expressivas quantidades de metais em sua composição (conforme verificado na Tabela 5 demonstrada no Capítulo 5 do presente trabalho), o que pode incentivar as atividades de coleta e reciclagem destes bens. Adiciona-se a esta justificativa, a existência de uma cadeia informal de catadores de resíduos no Brasil, cujo predileção por materiais metálicos (os quais possuem maior valor agregado para a revenda para empresas de reciclagem) pode exercer influência direta no aumento das taxas de reciclagem de equipamentos eletroeletrônicos.

Ainda assim, os índices de reciclagem de roupas e de equipamentos eletroeletrônicos são muito baixos. Dentre as explicações possíveis, ressalta-se a

inviabilidade de coleta de 100% dos resíduos gerados. Desta forma, não é possível reciclar todos os resíduos gerados. Além da dificuldade de acessar as peças de roupa e os equipamentos eletroeletrônicos usados, os custos de reciclagem – crescentes – e a abundância de matérias-primas a preços mais baixos contribuem para a redução da atratividade econômica das estratégias circulares.

Assim como as taxas de reciclagem dos materiais reciclados presentes nos RSU, analisada na Tabela 14, mesmo que os índices de reciclagem de têxteis e equipamentos eletroeletrônicos aumentem, ainda assim não alcançaram a totalidade. Desta forma, mesmo reciclando uma quantidade maior de materiais, o problema da degradação ambiental não será resolvido. Para isso, faz-se necessária a redução significativa das escalas de produção e consumo, pois com os padrões atuais, a reciclagem não é suficiente.

6.4 LIMITAÇÕES DA ECONOMIA CIRCULAR COMO SOLUÇÃO MITIGADORA

Corroborando os resultados bibliométricos verificados nesta tese que demonstraram a reciclagem como a estratégia circular com maior quantidade de publicações científicas, Syberg (2022) discorre que o foco da União Europeia para uma nova economia do plástico está centrado majoritariamente no processo de reciclagem, gerando duas potenciais implicações.

Primeiramente, este direcionamento pode conduzir a um cenário em que os estados-membros implementem ações para ampliar a reciclagem e, desta forma, não atuem ativamente para o estabelecimento de metas de redução. Adicionalmente, pode desestimular os estados-membros a determinarem metas de redução, uma vez que estas podem dificultar o alcance das demandas de reciclagem (Syberg, 2022).

Desta forma, refuta-se o conceito da reciclagem como sendo a solução ideal, desenvolvida a partir da ideia de que é possível alcançar um sistema de circuito fechado quase perfeito e, que, se mantidos em uma cadeia de valor circular, os materiais poderiam ser usados de forma infinita (Syberg, 2022).

Corrobora para esta compreensão os dados do relatório Global Plastic Outlook, emitido pela OECD (2022) que relatam que, a despeito da geração de resíduos de plástico mais do que duplicar no período de 2000 para 2019, somente 15% dos resíduos foram coletados para reciclagem e apenas 9% foram, de fato, reciclados.

Portanto, assim como Syberg (2022) chama atenção, 40% dos resíduos plásticos são descartados do processo de reciclagem devido à baixa qualidade apresentada.

Syberg (2022) alerta para o risco de que investimentos elevados em reciclagem podem conduzir a um cenário de dependência da reciclagem no caso da maioria dos plásticos. O autor ilustra a situação de países que fizeram vultosos investimentos em usinas de incineração que realizam a combustão contínua de resíduos para a produção de energia. Como exemplo, narra o caso da Dinamarca, que passou a importar resíduos para assegurar o alcance das metas de produção de energia nos seus incineradores.

No discurso público, a proposta de uma economia circular, que não requer matérias-primas materiais ou energéticas, apresenta um relevante apelo no cenário dos limites planetários e dos recursos naturais limitados. Além de evitar a discussão acerca de alternativas sistêmicas, o mito de uma economia circular conquista parcelas do movimento ambientalista, apreensivas com mudanças radicais e transformadoras, principalmente nos centros urbanos de classe média, que usufruem dos privilégios da ordem social vigente (Eickhoff, 2024).

Em um de seus editoriais, a revista Nature (2022) discorre que, até o momento, as implementações práticas dos princípios da economia circular equivalem a "*tinkering at the edges",* o que, em tradução livre do inglês, pode corresponder a "mexidas ou ajustes nas bordas". A publicação defende que o investimento na economia circular não requer somente incentivo governamental para implementação de legislação e regulamentações, mas, também, uma reformulação total de como a sociedade percebe os recursos e constrói as atividades econômicas em torno deles.

Desta forma, a necessidade de reconfigurar os sistemas sociais de produção e consumo apontada na presente tese encontra sinergia com o relato da revista Nature (2022) quando a mesma defende que é necessário reformular totalmente a forma como a sociedade consome e produz bens.

Eickhoff (2024) relata que, a despeito da economia circular abranger variadas medidas específicas que devem ter seus méritos reconhecidos, o discurso que a envolve tem a tendência de dificultar a transformação sistêmica necessária. Neste sentido, o autor observa que a narração proferida não se reflete em alterações na dinâmica econômica de crescimento industrial nem exige mudanças individuais e sistêmicas radicais.

Portanto, Eickhoff (2024) reforça o argumento da presente tese ao ressaltar que o discurso da economia circular, tal como é proferido na atualidade, dificulta a transformação sistêmica necessária, isto é, a reconfiguração dos sistemas sociais de produção e consumo indicada na tese.

Para Eickhoff (2024), a utopia da circularidade aparentemente valida a manutenção de hábitos de consumo privilegiados que apregoam estilos de vida ditos verdes e comportamentos a favor do meio ambiente. O autor relata que esta estrutura reforça o cenário atual de insustentabilidade da exploração de recursos naturais, enquanto somente uma pequena – e descrecente – fração de materiais é submetida à reutilização ou reciclagem, e o consumo mundial permanece inabalável.

Essa constatação de Eickhoff valida o resultado da tese que aponta que, ainda que as taxas de reciclagem aumentem, ainda assim, esta ou outra estratégia de economia circular não será capaz de resolver o problema ambiental, sendo necessário, para isso, reduzir as escalas de produção e consumo envolvidas.

Mesmo em grupos e populações que apresentam elevados padrões morais e reconhecem a preocupação quanto à situação de degradação ambiental – principalmente quando seus membros usufruem dos privilégios econômicos que lhes permitem adotar um estilo de vida destrutivo ao meio ambiente –, mecanismos psicológicos, como o licenciamento moral, podem criar obstáculos à mudança de comportamento transformadora (Eickhoff, 2024).

Desta forma, excetuando-se parcelas marginais que não pertencem à população dominante e que são orientadas por elevados valores morais ou praticam estilos de vida diferenciados, o conflito atual entre o interesse individual, as normas sociais dominantes e o comportamento pró-ambiental vigente permanece sem solução enquanto não houver uma alteração de paradigma nos objetivos gerais da sociedade, enfatizando práticas sustentáveis e regenerativas (Eickhoff, 2024).

Como condição para o funcionamento da economia circular, faz-se necessário interromper o elo entre uma empresa produzindo mais bens e auferindo mais lucro. É preciso projetar, desde o princípio, ou redesenhar os negócios para serem circulares. Também é necessário reconhecer o valor intrínseco ao recurso natural, por meio, por exemplo, da desmontagem e o reaproveitamento de equipamentos eletroeletrônicos em mercado que não demandem modelos mais recentes. Além disso, é preciso que haja uma mudança, também, nas estruturas de preços, de modo a estimular a

produção de bens com vistas a propiciar sua reutilização, retendo o valor dos recursos em mais de um ciclo de uso (Nature, 2022).

Para o sucesso de uma economia circular, Stahel (2016) relata a excelência em ciências metalúrgicas e química como pré-condição, mas observa que há uma quantidade baixa de pesquisas acerca de como encontrar modos de desmontagem de misturas de materiais em nível atômico (Stahel, 2016). O editorial de Nature (2022) concorda com o entendimento de Stahel ao ressaltar que a reciclabilidade final reside na capacidade de aprender como dividir moléculas para possibilitar a reciclagem de átomos.

6.4.1 Economia circular não é a bala de prata para a degradação ambiental

Ao investigar o embate entre os discursos de transição e de solução final mediante a literatura disponível, verifica-se a existência de uma crença limitadora que coloca a economia circular como sendo a solução definitiva para a degradação ambiental, e de que ela, por si só, seria suficiente para resolver os problemas ambientais sem a necessidade de alterações na estrutura de trabalho. Este mito impede de discutir, na prática, soluções mais sustentáveis para a melhoria da relação entre ambiente e sociedade.

A adoção das estratégias de economia circular apresentou baixo impacto em termos de eficácia quando analisados os casos práticos dos produtos têxteis e de vestuário e de equipamentos eletroeletrônico. É possível que estimulem a redução de extração de matérias-primas, diminuindo o descarte final e, portanto, os impactos ambientais ao meio ambiente. No entanto, requer uma nova configuração dos sistemas sociais de produção e consumo para níveis mais sustentáveis. Desta forma, trata-se de uma resposta possível às questões ambientais atuais, mas que não se apresenta como a solução definitiva para os casos analisados.

A economia circular demonstrou ser uma possibilidade de caminho para a transição sustentável, podendo estar presente nos três níveis de repostas à degradação ambiental. Neste sentido, pode se apresentar por meio de ações individuais (em relações do tipo consumidor-consumidor), de mercado (isto é, como uma visão de negócio) ou como um mercado regulado (por meio do Estado).

No primeiro nível de respostas (que consiste na mitigação primária), microações ou ações individuais evitam o descarte prematuro dos produtos, mas apresentam baixo alcance, ou seja, restrito a pequenos grupos, e reforçam a crença popular de que ações neste nível seriam suficientes.

No segundo nível (isto é, sistemático), ações mitigadoras são adotadas por uma quantidade maior de indivíduos e/ou empresas, passando a ter um impacto maior e gerando uma mudança de comportamento, mas que ainda não tem o alcance necessário para se consolidarem como solução definitiva.

A ações mitigadoras podem ser compreendidas segundo dois enfoques: como uma solução definitiva, e como uma solução de transição.

Para a corrente que trata a economia circular como a solução final e definitiva para a degradação ambiental, a simples adoção de práticas de economia circular garantiria o alcance da sustentabilidade. Para seus defensores, bastariam ações como economia de recursos produtivos ou uso de tecnologia mais limpa como sendo suficientes para a melhoria ambiental. Esta premissa não é verdadeira, mas pode ensejar um caminho de transição cultural e de negócios, uma vez que as empresas podem iniciar, a partir deste ponto de partida, uma adaptação progressiva para novos modelos produtivos mais sustentáveis.

Já, sob a ótica da corrente que compreende a economia circular como uma solução de transição, se as pessoas se acostumarem a medidas como, trocar produtos em vez de comprá-los, ou consumir produtos reciclados em detrimento da aquisição de novos, cria-se, progressivamente, uma cultura orientada para a sustentabilidade, mas que não garante o seu alcance.

Por fim, ações desenvolvidas no terceiro nível de respostas à degradação ambiental são aquelas capazes de promover novas formas de organizar socialmente os sistemas de produção e consumo para patamares de volumes mais sustentáveis, como a desmercantilização dos bens, impulsionando respostas sistêmicas definitivas no enfrentamento dos problemas ambientais.

A regulação dos mercados privados é uma condição necessária para estimular o direcionamento de ações dos níveis 1 e 2 para o nível 3, aprimorando a sustentabilidade. Para isso, faz-se necessária a ação do Estado desenvolvendo mecanismos de regulação como, por exemplo: a criação de uma sistemática de apoio a empresários que desejem investir em estratégias circulares em seus negócios, ou o

desenvolvimento de políticas que promovam a criação de espaços públicos destinados à troca de produtos, entre outras medidas regulatórias de incentivo.

6.5 RECONFIGURAÇÃO DOS SISTEMAS SOCIAIS DE PRODUÇÃO E CONSUMO COMO RESPOSTA À DEGRADAÇÃO AMBIENTAL

A partir da constatação de que a economia circular, enquanto um fim em si mesma, não é capaz de gerar uma resposta consistente e sustentável para a solução da degradação ambiental, sendo, portanto, necessário associá-la à reconfiguração dos sistemas atuais de produção e consumo, a presente tese passou a investigar abordagens que possibilitem a implantação desta nova conformação social proposta.

Uma estratégia possível para a consolidação das ações no terceiro nível de resposta é a utilização de iniciativas de desmercantilização dos sistemas sociais de produção e consumo. Na lógica da propriedade privada, o objetivo central é a obtenção de lucro e a geração de riquezas. No entanto, muitas vezes, esse crescimento econômico ocorre às custas da degradação ambiental e de impactos à saúde humana.

Um caminho para o alcance da sustentabilidade é a migração da noção de produto, passando de uma natureza de mercadoria, para uma abordagem de valor de uso. Enquanto uma mercadoria é fabricada com o intuito de venda, um bem orientado pelo o seu valor de uso está baseado na sua função primária. Um exemplo é a diferença na utilização de roupas entre os países do mundo. Enquanto em muitas nações do Ocidente os indivíduos realizam a aquisição de peças de vestuário com base, primordialmente, em valores sociais como status e critérios visuais, a população muçulmana, em geral, adquire peças de roupa com pouca customização e basicamente pela função primária de proteção do corpo.

A noção de bem comum também se apresenta como uma estratégia de desmercantilização, uma vez que o produto pode ser usufruído por meio do compartilhamento entre os indivíduos, mas nenhum deles detém a propriedade privada do bem.

O geógrafo David Harvey analisa as contradições do sistema capitalista e propõe alternativas como a desmercantilização, propriedade comum, renda básica permanente, gratuidades, entre outras. O pesquisador relata que toda mercadoria

possui um valor de uso e um valor de troca. No caso de um alimento, o seu valor de uso consiste no fato de que um indivíduo pode comê-lo, enquanto o valor de troca desta mercadoria é quanto o indivíduo tem que pagar para comê-lo. A moradia é um exemplo pertinente. O seu valor de uso consiste na garantia de abrigo, privacidade, dentre outros benefícios. A partir do século XVIII, surge a construção de imóveis para venda, e as casas passam a ter valor de troca. A especulação gera uma bolha imobiliária que, ao estourar, faz com que os indivíduos percebam que não podem mais desfrutar do valor de uso da moradia, pois o sistema de valor de troca deteriorou o valor de uso (GPEA, 2013).

Uma importante característica da nova economia reside no seu esforço de conferir visibilidade aos fundamentos e às consequências das diferentes formas de produzir e medir a riqueza. Parte dessa riqueza passa por mercados e está sujeita a uma contabilidade de fluxos materiais e energéticos. Outra parte é oriunda de formas não mercantis de cooperação, sejam estas diretas (como no caso de cooperativas e grupos voluntários) ou indiretas (como no caso da sociedade da informação em rede) (Abramovay, 2012).

6.6 DESAFIOS PARA O AUMENTO DA EFICÁCIA DAS ESTRATÉGIAS DE ECONOMIA CIRCULAR QUANTO À SUSTENTABILIDADE

Embora as estratégias de economia circular representem uma mitigação dos impactos ambientais, sua implementação é dificultada por desafios técnicos e econômicos.

A sua viabilidade, enquanto possível solução sustentável, passa pela resolução de um conflito intrínseco ao capitalismo. Ao desenvolver formas para aumentar a vida útil dos produtos e reduzir a produção física de bens, a necessidade de comercialização de novas mercadorias diminui, colocando em risco a lucratividade das empresas e a sobrevivência dos negócios.

Há, ainda, estratégias de economia circular que podem sofrer competição de soluções de mercado já existentes, reduzindo a sua atratividade enquanto solução viável. É o caso do aluguel de roupas usadas, o qual, devido à faixa de preço praticado, pode concorrer com os produtos do comércio alternativo (conhecidos como

“camelôs”), ocasionando um efeito-rebote de incentivo à fabricação de produtos do comércio paralelo.

Ademais, a adoção sistemática de inciativas circulares requer uma mudança cultural que incentive a população a evitar o descarte dos produtos. Além disso, essa alteração cultural exige que a sociedade se acostume com a ideia de que não terá produtos novos o tempo todo.

Uma barreira adicional à viabilização das estratégias circulares parte do pressuposto de que a compra de produtos possui uma função social. Neste sentido, a compra de um bem atende não somente à demanda de uso, como também às demandas sociais relativas à necessidade de reforçar status, símbolos e questões antropológicas associadas ao sentimento de pertencimento a grupos sociais.

Soma-se, ainda, o fato de que, uma vez possuída a mercadoria, cria-se um valor de vínculo, que não existiria no caso de estratégias em que o indivíduo não detém a propriedade do bem (como nos modelos de produto como serviço e de compartilhamento), colocando em risco a sua aceitação pela sociedade.

Portanto, a partir do entendimento de que a tendência de mercado está orientada para empresas que promovam práticas como remanufatura, trocas de produtos por serviços, compartilhamento, dentre outras estratégias circulares, compreende-se que todas são promissoras, e o que se discute é a escala de processamento para viabilizar a economia circular.

Neste sentido, ações que podem ser desenvolvidas para aprimorar a sustentabilidade de roupas passam pelo enfoque da mudança dos padrões atuais de produção e consumo. Cabe ressaltar que os elevados volumes praticados requerem uma reflexão social acerca das necessidades de consumo. Do ponto de vista do material, o maior impacto abrange a lógica da produção do tipo *fast fashion*, em que os produtos não são feitos para durar.

Ainda sob a perspectiva do material, os avanços tecnológicos cumprem importante papel no aperfeiçoamento da sustentabilidade das roupas. Tendo em vista que o ciclo de vida de uma peça de roupas é intensivo no consumo de água, energia e produtos químicos para lavagem e passagem a ferro, a introdução de inovações capazes de produzir tecidos que não amarrotam ou que utilizam corantes naturais têm a capacidade de reduzir a demanda por recursos naturais e a geração de efluentes contaminados com pigmentos.

Desta forma, alterações nos padrões de produção e consumo (como aquelas baseadas na desmercantilização dos bens) e mudanças na tecnologia têxtil (como aumentar a oferta de roupas mais duráveis, que não necessitam de passagem e a substituição de tecidos sintéticos por fibras naturais, como o algodão), associadas a estratégias de incentivo à reciclagem podem conduzir a solução mais sustentáveis.

Em relação aos equipamentos eletroeletrônicos do tipo máquinas de lavar, estratégias que incentivem o design para a reciclagem e o design para remanufatura podem estimular o desenvolvimento sustentável. No entanto, mesmo estratégias de alongamento da vida útil, como a remanufatura, terão um fim em determinado momento, com os materiais seguindo para a reciclagem e, por fim, para descarte final.

Assim como no caso das peças de roupas, a conclusão a que se chega é que, mesmo aumentando os índices de recuperação dos produtos eletroeletrônicos por meio de estratégias de economia circular, o problema da degradação ambiental não estará resolvido, uma vez que as escalas de produção e consumo manter-se-ão extremamente elevadas.

Em ambos os casos analisados, possíveis resistências culturais por parte da sociedade podem dificultar a implementação de estratégia de economia circular, tendo em vista a possibilidade de estigmatização de produtos reciclados e remanufaturados, por exemplo.

A obsolescência programada, fenômeno intrínseco não somente à indústria de equipagens eletroeletrônicos como, também, à indústria têxtil (em particular, ao segmento *fast fashion*) também se apresenta como um relevante desafio à eficácia de estratégias de economia circular, uma vez que estimula o aumento do consumo de bens.

Um desafio adicional verificado é a garantia da manutenção de um mercado capaz de absorver os produtos secundários gerados, sejam eles, reciclados, remanufaturados ou submetidos a outra estratégia de economia circular.

7 CONCLUSÕES

A economia circular é tida, pelo senso comum, como uma revolução na sociedade, mas a discussão relevante, ainda pouco explorada na literatura, é se a sua aplicação gera, ou não, impactos de magnitude expressiva no combate à degradação ambiental.

Com o objetivo de empreender esta análise, foram selecionados dois grupos de produtos, procedendo-se, então, a investigação da abrangência das estratégias circulares nos segmentos de roupas e equipamentos eletroeletrônicos do tipo máquinas de lavar, os quais caracterizam-se, respectivamente, como bens de consumo não duráveis e duráveis.

Estes produtos da economia constituem uma amostra importante de aplicação da economia circular, em virtude dos elevados volumes de produção e consumo que apresentam. Ressalta-se ainda que estão inseridos no segmento de bens de consumo, os quais, segundo WWF (2022) são responsáveis por relevantes 15% do total da pegada ecológica da humanidade.

Em relação à execução da pesquisa, a hipótese formulada de que o conjunto de instrumentos que compõem a economia circular ajuda no enfrentamento do problema ambiental, mas não o resolve, foi testada nos dois setores representativos da economia selecionados, com o objetivo de verificar a eficácia dos resultados obtidos.

As baixas taxas de reciclagem e recuperação de resíduos têxteis e de equipamentos eletroeletrônicos quantificadas permitem concluir que o emprego de instrumentos da economia circular apresenta baixa eficácia no combate à degradação ambiental. Ainda que os índices de reciclagem aumentem, ainda assim, não será suficiente para combater o problema ambiental, em virtude das elevadas escalas de produção envolvidas.

Desta forma, foi possível validar a hipótese de que a economia circular é um conjunto de ferramentas que visam mitigar os impactos ambientais, mas que não se apresenta como a solução definitiva para a conservação ambiental.

As medidas de economia circular analisadas demonstraram ser soluções mitigadoras que, mesmo que sejam sistemáticas, não são suficientes para o embate à crise ambiental.

Portanto, a economia circular é compreendida segundo a corrente que a coloca como um caminho de transição que contribui para a mitigação dos impactos ambientais, mas que, pelas suas características, não se apresenta como uma solução definitiva para a conservação do meio ambiente. Trata-se, portanto, de uma alternativa vantajosa em termos de estratégia de adaptação aos fenômenos de mudanças climáticas, mas que se apresenta apenas mitigadora, não sendo capaz de ocasionar a reconfiguração dos sistemas atuais de produção e consumo.

Mesmo quando são sistemáticas, as medidas de economia circular não alcançam o nível de impacto suficiente do ponto de vista da economia de recursos ambientais e do combate à degradação ambiental. Assim, tais estratégias ajudam no enfrentamento do problema ambiental, mas não são suficientes para resolvê-lo, em virtude da baixa eficácia que apresentaram nas análises analisadas.

Desta forma, a investigação permitiu constatar que a economia circular é um conjunto de ferramentas que pode contribuir para a mitigação dos impactos ambientais, mas que, pelas suas características, não é uma solução definitiva para a degradação ambiental. Portanto, as soluções geradas a partir da adoção das estratégias circulares são mitigadoras, podendo, inclusive, mitigar sistematicamente, mas são incapazes de resolver, por si só, os problemas ambientais.

Enquanto uma solução apenas mitigadora, a economia circular auxilia no aprimoramento da sustentabilidade, mas não resolve os problemas de deterioração do meio ambiente e esgotamento dos recursos naturais, permanecendo distante de ser a solução total e definitiva.

Para resolver a problemática ambiental, faz-se necessária a migração para um nível superior de resposta à degradação ambiental. O terceiro nível de resposta requer ações que reconfigurem os sistemas sociais de produção e consumo, tais como são conhecidos hoje.

Para isso, são necessárias ações como: i. reduzir as elevadas escalas de produção; ii. promover mudanças nos hábitos de consumo da sociedade; iii. questionar a necessidade de se continuar produzindo, isto é, se um determinado consumo e produção devem permanecer existindo; iv. retirar produtos do mercado; v. ter produtos que não são comercializados, isto é, não ter produtos como mercadoria, tal como proposto na estratégia de desmercantilização.

Desta forma, o caminho para a sustentabilidade passa pela necessidade de reconfiguração dos níveis de produção e consumo para padrões mais sustentáveis, por meio da redução do uso e pela produção de bens que favoreçam a sua recuperação ao fim de vida útil. Para isso, é necessário projetar processos e produtos comprometidos, desde a fase de concepção, com a eliminação do desperdício e da poluição.

Conclui-se, portanto, que a possibilidade da economia circular ser um caminho de futuro, ambientalmente falando depende de como organizar socialmente essas condições de viabilidade. A reconfiguração social dos sistemas de sociais de produção e consumo trata, portanto, de uma transição para uma outra forma de organização de produtos e serviços na sociedade que ainda não está completamente estabelecida.

Portanto, a economia circular pode ser um caminho de transição que contribui para a mitigação dos impactos ambientais, mas pelas suas características não se apresenta como uma solução definitiva para a preservação do meio ambiente. É, portanto, uma alternativa vantajosa em termos de estratégia de adaptação aos fenómenos de alterações climáticas, mas é apenas mitigadora, não sendo capaz, por si só, de provocar a reconfiguração dos atuais sistemas de produção e consumo.

Assim, a economia circular apresenta benefícios ambientais, mas o seu impacto é muito baixo, dado os elevados volumes de produção de bens. Desta forma, ela não é suficiente para assegurar a sustentabilidade nos padrões atuais de produção e consumo, sendo incapaz de, por si só, resolver os problemas ambientais.

No entanto, a magnitude de impacto da economia circular pode aumentar à medida que à ela sejam associadas mudanças nos padrões de produção e consumo desses bens. Para isso, podem ser adotadas abordagens de desmercantilização e investimentos em peças de roupas mais duráveis, que dispensam passagem a ferro, e com menos materiais sintéticos, bem como equipamentos eletroeletrônicos produzidos segundo as práticas de design para reciclagem e design para remanufatura.

Uma vez que a tendência da economia capitalista de mercado é produzir cada vez mais bens e produtos a fim de maximizar a lucratividade, é possível concluir que, caso as restrições ambientais sejam mais severas, os custos sociais e ambientais podem alcançar níveis tão elevados que resultem no comprometimento da sobrevivência de muitas empresas.

Desta forma, a economia verde, âmbito em que a economia circular está inserida, apresenta-se como o limite das ações ambientais no sistema de produção capitalista. Neste contexto, além da discussão acerca da lógica capitalista de estímulo à produção e ao consumo e da própria noção de ética, as ferramentas de economia circular encontram severos limites para sua aplicação face à contradição essencial das empresas operando em livre mercado, onde sua sobrevivência depende de exploração do trabalho e da produção em grande escala, com a renovação constante dos produtos.

O terceiro nível de resposta à degradação ambiental questiona a possibilidade de implementação do desafio de reconfiguração de sistemas em organizações privadas. Espera-se que, para alguns grupos de produtos, seja possível manter a produção privada concomitantemente com a sustentabilidade. Contudo, para outros grupos de produtos, a reconfiguração pode não ser uma realidade possível.

7.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Dentre as limitações apresentadas pela economia circular, destaca-se a sua restrita viabilidade. A reciclagem por exemplo, é limitada à medida que nem todos os materiais são passíveis de reciclagem e não é possível reciclar 100% dos materiais porque não se consegue, nas condições atuais, coletar todo o montante de resíduos usados. A solução de substituição de produto por serviço também é restrita a determinados produtos, não sendo aplicável a todos. Desta forma, esta estratégia circular auxilia a promoção da sustentabilidade, mas não resolve os problemas ambientais em virtude da sua baixa aplicabilidade.

Portanto, em virtude dos volumes crescentes de produção de roupas e equipamentos eletroeletrônicos, constatou-se que, nos casos analisados, a economia circular se apresentou como uma solução possível, e, portanto, mitigadora dos impactos ambientais, mas não como a solução definitiva capaz de eliminar os problemas de degradação do meio ambiente. Desta forma, é uma resposta à degradação ambiental, mas com eficácia limitada e circunscrita.

Apesar de não resolver totalmente os problemas ambientais, a economia circular pode ser um dos pilares de uma economia mais sustentável, orientada para, mais serviços, mais trocas e menos produtos físicos.

Dentre as estratégias de economia circular avaliadas, a reciclagem apresentou intensa predominância na literatura, concentrando 67,1% das publicações identificadas na amostra analisada.

As baixas taxas anuais de reciclagem de roupas e equipamentos eletroeletrônicos verificadas (respectivamente, inferior a 1,0% e 3,6%) refletem as limitações que a tecnologia de reciclagem apresenta enquanto potencial estratégia de aumento da sustentabilidade. Como a coleta não alcança 100% dos produtos descartados, não é possível reciclar a totalidade gerada. Somam-se a esta restrição técnica, os elevados volumes produzidos, além dos custos crescentes de processamento da reciclagem e a falta de uma cultura social orientada para a reciclagem.

Ao analisar a iniciativa de reciclagem, foi possível verificar que a sua viabilidade ocorre somente até determinado volume processado, em virtude da existência de três problemas que limitam a sua eficácia enquanto solução sustentável.

Primeiramente, observou-se que, nas condições atuais, a inviabilidade de se coletar 100% dos produtos descartados, condição que já limita a reciclagem como solução definitiva para a degradação ambiental. Para aumentar as taxas de coleta de resíduos, faz-se necessária uma mudança de cultura orientada para a promoção da reciclagem, por meio, por exemplo, de empresas dotadas de equipamentos e tecnologia para coleta e processamento dos materiais.

O segundo ponto observado consiste no fato de que, após sucessivos ciclos de reciclagem, os custos dessa operação podem ser mais elevados do que os custos de aquisição de matérias-primas para a fabricação de um produto novo. Como o processo de reciclagem apresenta custos crescentes, em determinado momento, o custo passa a não ser mais competitivo em comparação com a compra de matéria-prima virgem.

Como terceiro ponto observado, constatou-se que a ausência de estrutura comercial robusta o suficiente para viabilizar a execução dos dois primeiros pontos elencados anteriormente, também se apresenta como uma relevante limitação à eficácia da reciclagem como resposta total à degradação ambiental.

Ainda que as baixas taxas de recuperação de produtos têxteis e de equipamentos eletroeletrônicos possam crescer, o avanço da economia circular enquanto possível solução ambiental é restrito, uma vez que nem todos os materiais

são recicláveis ou passíveis de recuperação. Além disso, o processo de reciclagem deixa de ser economicamente viável após um determinado momento, e o gasto energético para reciclagem passa a não ser mais competitivo em relação à fabricação de um produto novo.

A cada ciclo de processamento, os custos de reciclagem são crescentes, enquanto o estoque de matéria vai sendo consumido e a demanda por energia vai aumentando. Assim, a viabilidade do processo está condicionada ao volume processado, o que significa que, após determinada quantidade, a reciclagem torna-se um processo inviável.

Ademais, a inviabilidade de coletar 100% dos resíduos gerados impossibilita a reciclagem de todos os materiais produzidos. Assim, não é possível reciclar a totalidade dos materiais porque a coleta não alcança 100% dos resíduos gerados.

Ainda que fosse possível reciclar todos os materiais, a produção continuaria crescendo, uma vez que há pressões do mercado para aumentar os volumes produzidos.

Desta forma, observou-se que a extensão da economia circular nos dois grupos de produtos selecionados é muito limitada, tendo em vista que a produção tende a continuar aumentando, conduzindo ao potencial esgotamento das reservas naturais. Portanto, os baixos índices praticados de recuperação de têxteis e equipamentos eletroeletrônicos demonstram que as soluções de economia circular são apenas mitigadoras.

As soluções apresentadas pela economia circular analisadas neste trabalho mitigam os impactos ambientais gerados pelos atuais sistemas de produção e consumo. Podem mitigar sistematicamente, mas são incapazes, por si só, de gerar soluções sustentáveis que resolvam o atual problema da degradação ambiental.

As ferramentas circulares apresentam, assim, limitações na sua aplicação, não se apresentando como uma solução capaz de resolver a tendência geral das empresas privadas, que exigem escalas crescentes de fabricação de bens. Portanto, é possível que a manutenção de elevados volumes de produção de determinados bens seja insustentável do ponto de vista da conservação ambiental.

No entanto, a garantia da manutenção das empresas e da sobrevivência do sistema capitalista requer intensos volumes de produção. Este pré-requisito constitui

uma sensível contradição, uma vez que o Planeta está enfrentando problemas para suportar os efeitos da deterioração ambiental a que está submetido.

Contradizendo a lógica do sistema capitalista, a criação de uma forma de redução da produção física de bens pode comprometer a manutenção do sistema. A expansão deste novo sistema social pode resultar em escalas tão elevadas que culminará em uma situação de conflito, colocando em risco a lucratividade e sobrevivência das empresas.

Por este motivo, faz-se necessária a implementação de outro nível produtivo, orientado para a mudança dos padrões de produção e consumo. A reconfiguração dos sistemas de produção e consumo, que caracteriza o terceiro nível de respostas, exige a redução da geração e, consequentemente, do consumo de recursos naturais para volumes muito inferiores aos níveis atuais.

Desta forma, a redução dos volumes de produção de determinados bens e a inserção das preocupações com o consumo de recursos podem conduzir a um cenário de alcance da sustentabilidade. O desafio passa pelo fato de garantir a viabilidade da natureza privada de uma empresa, uma vez que as organizações capitalistas são orientadas pela lógica da maximização das margens de lucro.

Ainda que a diminuição dos volumes de produção e consumo possa proporcionar as bases para um caminho para a sustentabilidade ambiental, não é possível assegurar a sustentabilidade dos negócios, isto é a manutenção da solução privada (ou seja, mercantil) em coexistência com a sustentabilidade ambiental. É possível que alguns modelos de negócios assumam esta possibilidade, ao contrário de outros.

Uma solução possível para a implantação de ações no terceiro nível de resposta à degradação ambiental é a adoção de práticas de desmercantilização do bem, cenário em que o consumo restringe-se ao uso primário do produto, isto é, à sua funcionalidade. Nesta situação, a demanda é reduzida e, consequentemente, as organizações tendem a diminuir os volumes produzidos.

Portanto, somente a implementação de estratégias de circular não se apresenta como condição suficiente no combate à degradação ambiental. A transição para a sustentabilidade não demonstra viabilidade somente a partir da ampliação das taxas de reciclagem, reúso ou remanufatura. Faz-se necessário, também, promover a redução dos níveis de produção e consumo de bens.

7.2 LIMITAÇÕES DO ESTUDO

A seleção de duas amostras de setores econômicos é uma das limitações encontradas na pesquisa. Para trabalhos futuros, este conjunto de amostras pode ser maior, de forma a consolidar a generalização dos resultados obtidos.

Ademais, o fato de que os trabalhos críticos acerca da reconfiguração dos sistemas sociais de produção e consumo serem inexistentes ou muito recentes constitui outra limitação do estudo. Além disso, o trabalho também encontra limitação ao não explicitar como realizar a reconfiguração dos sistemas sociais de produção, mas sim, fornecer linhas gerais para tal.

7.3 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Recomenda-se a extensão desta análise para outros grupos de produtos cujos volumes de produção e consumo sejam significativos para a economia brasileira, de modo a investigar a aplicabilidade e eficácia da economia circular em outros setores. Como indicação de trabalhos futuros, destaca-se, no segmento de bens de consumo, a produção de veículos automotivos em função da intensa participação que apresentam na rotina da população brasileira e dos impactos ambientais gerados.

Dados do Inventário de Emissões Atmosféricas do Transporte Rodoviário de Passageiros no Município de São Paulo demonstram que os veículos automotores são responsáveis por 72,6% das emissões de GEE no setor de transporte de passageiros na cidade de São Paulo, embora transportem somente cerca de 30% do total de passageiros. Os impactos à saúde humana também são expressivos no transporte por veículos individuais. Nos horários mais críticos de circulação, os veículos podem ser responsáveis por mais de 80% das emissões de material particulado (MP), além de até 87% das emissões de hidrocarbonetos não metanos (NMHC), ambos associados à ocorrência de problemas respiratórios (ANTP, 2017).

No primeiro semestre de 2022, foram produzidos 1.091.700 veículos no Brasil, uma queda de 5% na produção comparada ao mesmo período do ano anterior. Ainda que essa diminuição da produção tenha sido influenciada pela crise dos semicondutores, além de por fatores externos como a Guerra da Ucrânia, e a

pandemia de Covid-19 que restringem a cadeia global de logística e suprimentos, o setor ainda projeta um aumento nos volumes produzidos (O Globo, 2022).

Diante dos elevados volumes de produção e dos relevantes impactos à saúde e ao meio ambiente, sugere-se o desdobramento dessa pesquisa investigando a eficácia das estratégias de economia circular quanto à sustentabilidade aplicadas aos veículos automotivos. Também recomenda-se testar a hipótese formulada em outros setores econômicos de significativa representatividade no Brasil, os quais movimentam elevadas escalas de produção e consumo, como a cadeia produtiva de plásticos.

Em relação à generalização dos resultados, uma vez que os dois setores selecionados nesta pesquisa são representativos da economia brasileira em função das suas elevadas escalas de produção e consumo, muito provavelmente, os resultados obtidos nesta tese irão se reproduzir nos outros segmentos econômicos sugeridos, confirmando a hipótese de a mitigação dos impactos ambientais, mesmo que seja sistemática, não é suficiente para a solução dos problemas ambientais nesses setores da economia.

REFERÊNCIAS

ABDI – Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial. MDIC – Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior. Inventa Consultoria Ltda**. Logística Reversa de Equipamentos Eletroeletrônicos**: Análise de viabilidade técnica e econômica. Brasília: ABDI, 2013. Disponível em: <https://www.gov.br/cetem/pt-br/pesquisa-e-desenvolvimento/reminare/central-de-conteudos/documentos/evte_residuos_eletronicos_abdi_2013.pdf>. Acesso: em 12 fev. 2025.

ABINEE – Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica. **Indicadores ABINEEE**: Cenário para a indústria eletroeletrônica. 2024. Disponível em: <https://www.abinee.org.br/arquivos/decon/dados/cesetora.pdf>. Acesso: em 14 ago. 2024.

_____. **O Brasil na Economia Digital**: Propostas do setor eletroeletrônico para presidenciáveis 2022. 2022. Disponível em: <https://www.abinee.org.br/arquivos/publicacoes/economiad/7/>. Acesso: em 14 ago. 2024.

ABIT – Associação Brasileira da Indústria Têxtil e de Confecção. **Perfil do setor**. 2022. Disponível em: <https://www.abit.org.br/cont/perfil-do-setor>. Acesso: em 04 out. 2022.

ABRAFAS – Associação Brasileira de Produtores de Fibras Artificiais e Sintéticas. **Processos produtivos**. s.d. Disponível em: <https://www.abrafas.org.br/processos-produtivos>. Acesso: em 31 dez. 2024.

ABRAMOVAY, Ricardo. **Muito além da economia verde.** São Paulo: Ed. Abril, 2012.

ABREE – Associação Brasileira de Reciclagem de Eletroeletrônicos e Eletrodomésticos. **Relatório Anual de Desempenho do Sistema de Logística Reversa (SLR) de Eletroeletrônicos e seus componentes de uso doméstico**. 2022. Disponível em: <https://portal-api.sinir.gov.br/wp-content/uploads/2024/04/RELATORIO_ANUAL_DE_DESEMPENHO_2022_-_ABREE.pdf >. Acesso: em 11 jul. 2024.

ABRELPE – Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. **Panorama de Resíduos Sólidos no Brasil 2021**. 2021. Disponível em: <https://abrelpe.org.br/panorama-2021/>. Acesso: em 29 jul. 2022.

ABREMA – Associação Brasileira de Resíduos e Meio Ambiente. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2022**. 2022. Disponível em: <https://www.abrema.org.br/download/90935/?tmstv=1718136285>. Acesso: em 05 jul. 2024.

_____. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2023**. 2023. Disponível em: <https://www.abrema.org.br/download/92323/?tmstv=1709314789>. Acesso: em 08 jul. 2024.

_____. **Falta legislação específica sobre reciclagem e descarte**. 2024a. Valor Econômico, 30 set. 2024. Disponível em: <https://www.abrema.org.br/2024/09/30/falta-legislacao-especifica-sobre-reciclagem-e-descarte/>. Acesso: em 11 fev. 2025.

_____. **Tributação favorece matérias-primas virgens em vez de recicladas, dizem especialistas**. 2024b. Folha de São Paulo, 05 jul. 2024. Disponível em: <https://www.abrema.org.br/2024/07/05/tributacao-favorece-materias-primas-virgens-em-vez-de-recicladas-dizem-especialistas/>. Acesso: em 08 jul. 2024.

ACCELERATING CIRCULARITY. **Research and Mapping Report. A Report on Circular Supply Chain Potential on the U.S. East Coast.** 2020. Disponível em: <https://www.acceleratingcircularity.org/research>. Acesso: em 06 out. 2022.

AGENCIA SEBRAE DE NOTÍCIAS. **Comércio de usados cresce 48,5% na pandemia.** 2021. Disponível em: <https://agenciasebrae.com.br/arquivo/comercio-de-usados-cresce-485-na-pandemia/>. Acesso: em 31 jul. 2022.

AGÊNCIA SENADO. **CMA exclui agronegócio e aprova projeto que regulamenta mercado de carbono**. 2023. Disponível em: <https://www12.senado.leg.br/noticias/materias/2023/10/04/cma-exclui-agronegocio-e-aprova-projeto-que-regulamenta-mercado-de-carbono>. Acesso em: 10 out. 2023.

ALTVATER, Elmar. **O fim do capitalismo como o conhecemos**. 1. ed. Brasil: Civilização Brasileira, 2010.

AMARAL, M. C.; ZONATTI, W. F.; SILVA, K. L.; JUNIOR, D. K.; NETO, J. A.; BARUQUE-RAMOS, J. **Industrial textile recycling and reuse in Brazil:** case study and considerations concerning the circular economy. Gestão & Produção, São Carlos, v. 25, n. 3, p. 431-443, 2018.

ANCAT – Associação Nacional de Catadores e Catadoras de Materiais Recicláveis **Atlas Brasileiro da Reciclagem** [livro eletrônico]. LIMA, Francisco de Paula Antunes [*et al*.] (coord.); LIMA, Francisco de Paula Antunes; RUTKOWSKI, Jaqueline E. (eds.). 1. ed. São Paulo: ANCAT, 2022. Disponível em: <https://atlasbrasileirodareciclagem.ancat.org.br/>. Acesso em: 25 set. 2024.

ANTP – Associação Nacional de Transportes Públicos. **Carros transportam 30% dos passageiros, mas respondem por 73% das emissões em SP.** 2017. Disponível em: <http://www.antp.org.br/noticias/clippings/carros-transportam-30-dos-passageiros-mas-respondem-por-73-das-emissoes-em-sp-.html>. Acesso em: 29 jul. 2022.

ARAÚJO, Edmar**. O mito da bala de prata**. Estadão, Fausto Macedo, 2020. Disponível em: <https://www.estadao.com.br/politica/blog-do-fausto-macedo/o-mito-da-bala-de-prata/>. Acesso em: 11 out. 2024.

ARAÚJO, Marcelo Guimarães; MAGRINI, Alessandra; MAHLER, Cláudio Fernando; BILITEWSKI, Bernd. **A model for estimation of potential generation of waste electrical and electronic equipment in Brazil**. Waste Management. v 32, p. 335-342, 2012.

ASHBY, M. F. **Materials and the Environment:** Eco-Informed Material Choice. 2nd edition. USA: Elsevier, 2013.

AVILA, Ana Paula S. de; MACIEL, Dulce Holanda; SILVEIRA, Icléia; RECH, Sandra. **Os resíduos têxteis sólidos no contexto de abordagens sustentáveis: ciclo de vida, economia circular e upcycling**. Solid textile waste in the context of sustainable approaches: life cycle design, circular economy and upcycling. Mix Sustentável, Florianópolis, v.4, n.3, p.17-24, out-mar. 2018. https://doi.org/10.29183/2447-3073.MIX2018.v4.n3.15-22. Disponível em: < https://ojs.sites.ufsc.br/index.php/mixsustentavel/article/view/2555>. Acesso em: 26 ago. 2024.

BALDÉ, Cornelis P.; KUEHR, Ruediger; YAMAMOTO, Tales; McDONALD, Rosie; D'ANGELO, Elena; ALTHAF, Shahan; BEL, Garam; DEUBZER, Otmar; FERNANDEZ-CUBILLO, Elena; FORTI, Vanessa; GRAY, Vanessa; HERAT, Sunil; HONDA, Shunichi; IATTONI, Giulia; KHETRIWAL Deepali S.; CORTEMIGLIA, Vittoria Luda di; LOBUNTSOVA, Yuliya; NNOROM, Innocent; PRALAT, Noémie; WAGNER, Michelle Wagner (2024). International Telecommunication Union (ITU) and United Nations Institute for Training and Research (UNITAR). 2024. **Global E-waste Monitor 2024**. Geneva/Bonn. Disponível em: <https://api.globalewaste.org/publications/file/297/Global-E-waste-Monitor-2024.pdf>. Acesso em: 05 ago. 2024.

BAN – Basel Action Network. **Scam Recycling:** e-Dumping on Asia by US Recyclers. The e-Trash Transparency Project. 2016. Disponível em: <https://wiki.ban.org/images/1/12/ScamRecyclingReport-web.pdf>. Acesso em: 12 fev. 2025.

BETIOL, Luciana Stocco; UEHARA, Thiago Hector Kanashiro; LALOË, Florence Karine; APPUGLIESE, Gabriela Alem; ADEODATO, Sérgio; RAMOS, Lígia; NETO, Ramos Mario Prestes Monzoni. **Compra sustentável:** a força do consumo público e empresarial para uma economia verde e inclusiva. 1. ed. São Paulo: Programa Gestão Pública e Cidadania, 2012.

BBC News Brasil. **O país da África que se tornou um 'cemitério de eletrônicos'**. 2016. Disponível em: <https://www.bbc.com/portuguese/noticias/2016/01/160109_lixao_eletronicos_ab>. Acesso em: 12 fev. 2025.

BOFF, Leonardo. **Sustentabilidade:** O que é – O que não é. Petrópolis, RJ: Vozes, 2012.

BOLDOCZKI, Sandra; THORENZ, Andrea; TUMA, Axel. **Does increased circularity lead to environmental sustainability?** The case ofwashing machine reuse in Germany. Journal of Industrial Ecology, v. 25, p. 864-876, 2021.

BRASIL. **Decreto nº 10.240, de 12 de fevereiro de 2020**. Regulamenta o inciso VI do caput do art. 33 e o art. 56 da Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, e complementa o Decreto nº 9.177, de 23 de outubro de 2017, quanto à implementação de sistema de logística reversa de produtos eletroeletrônicos e seus componentes de uso

doméstico. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2020/Decreto/D10240.htm#anexo1>. Acesso em: 11 jul. 2024.

_____. **Decreto nº 11.043, de 13 de abril de 2022.** Aprova o Plano Nacional de Resíduos Sólidos. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2022/decreto/d11043.htm>. Acesso em: 04 jul. 2024.

_____. **Lei nº 15.042, de 11 de dezembro de 2024**. Institui o Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões de Gases de Efeito Estufa (SBCE); e altera as Leis nºs 12.187, de 29 de dezembro de 2009, 12.651, de 25 de maio de 2012 (Código Florestal), 6.385, de 7 de dezembro de 1976 (Lei da Comissão de Valores Mobiliários), e 6.015, de 31 de dezembro de 1973 (Lei de Registros Públicos). Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2023-2026/2024/lei/L15042.htm>. Acesso em: 12 fev. 2025.

_____. **Lei nº 12.082, de 27 de junho de 2024**. Institui a Estratégia Nacional de Economia Circular. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2023-2026/2024/decreto/D12082.htm>. Acesso em: 07 jul. 2024.

_____. **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. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm>. Acesso em: 06 out. 2022.

_____, MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Protocolo de Quioto**. s.d. Disponível em: <https://antigo.mma.gov.br/clima/convencao-das-nacoes-unidas/protocolo-de-quioto.html>. Acesso em: 27 mar. 2024.

BUSI, Elena. MARANGHI, Simone; CORSI, Leopoldo; BASOSI, Riccardo. **Environmental sustainability evaluation of innovative self-cleaning textiles**. Journal of Cleaner Production, v. 133, p. 439-450, 2016.

CE100 BRASIL**. Uma economia circular no Brasil:** uma abordagem exploratória inicial. 2017. Disponível em: < https://archive.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/languages/Uma-Economia-Circular-no-Brasil_Uma-Exploracao-Inicial.pdf>. Acesso em: 15 jul. 2022.

CEBDS – Conselho Empresarial Brasileiro para o Desenvolvimento Sustentável. **O que é o Acordo de Paris?** 2019. Disponível em: <https://cebds.org/o-que-e-o-acordo-de-paris/#.YuPPlHbMKUk>. Acesso em: 29 jul. 2022.

CNI – Confederação Nacional da Industria. **Economia circular:** oportunidades e desafios para a indústria brasileira. Brasília: CNI, 2018.

CNN. **Brasil descarta mais de 4 milhões de toneladas de resíduos têxteis por ano.** 2022. Disponível em: <https://www.cnnbrasil.com.br/business/brasil-descarta-mais-de-4-milhoes-de-toneladas-de-residuos-texteis-por-ano/>. Acesso em: 31 jul. 2022.

COLUCCI, Mariachiara; VECCHI Alessandra. **Close the loop:** Evidence on the implementation of the circular economy from the Italian fashion industry. Business Strategy and the Environment. Business Strategy and the Environment, v. 30, n. 2, p. 856–873, 2021.

COMMON OBJECTIVE CO DATA. **Volume and Consumption:** How Much Does The World Buy. 2018. Disponível em: <https://www.commonobjective.co/article/volume-and-consumption-how-much-does-the-world-buy>. Acesso em: 24 jan. 2023.

COPERNICUS. Programme of the European Union. **Copernicus Global Climate Report 2024 confirms last year as the warmest on record, first ever above 1.5°C annual average temperature**. 2025. Disponível em: <https://www.copernicus.eu/en/news/news/copernicus-global-climate-report-2024-confirms-last-year-warmest-record-first-ever-above>. Acesso em: 12 fev. 2025.

CORREA, Rafaela Gomes; SERRA, Eduardo Gonçalves; FREIRE, Estevão. **Remanufatura sistemática de máquinas de lavar: uma análise abrangente de sua viabilidade**. Brazilian Journal of Development, Curitiba, v. 6, n. 11, p. 91710-91728, 2020.

COSTA, Edwaldo; FEREZIN, Nataly Bueno. **ESG (Environmental, Social And Corporate Governance) e a comunicação:** o tripé da sustentabilidade aplicado às organizações globalizadas. Revista Alterjor. Grupo de Estudos Alterjor: Jornalismo Popular e Alternativo (ECA-USP). Ano 11, vol. 02, ed. 24, julho-dezembro 2021. Cidade Universitária, São Paulo.

COSTA, Ana Cristina Rodrigues da; ROCHA, Érico Rial Pinto da. **Panorama da cadeia produtiva têxtil e de confecções e a questão da inovação**. BNDES Setorial, Rio de Janeiro, n. 29, p. 159-202, mar. 2009.

DELTA MÁQUINAS TÊXTEIS. **Upcycling:** o que é e o seu impacto no futuro da produção. 2019. Disponível em: <https://deltamaquinastexteis.com.br/upcycling/>. Acesso em: 04 set. 2024.

DEVOLDERE, Tom; DEWULF, Wim; WILLEMS, Barbara; DUFLOU, Joost R. **The Eco-Efficiency of Reuse Centers Critically Explored** - The Washing Machine Case. International Journal of Sustainable Manufacturing, v. 1, n. 3, p. 2019-226, 2009.

DIAS, Pablo; PALOMERO, João; CENCI, Marcelo Pilotto; SCARAZZATO, Tatiana; BERNARDES, Andréa Moura. **Electronic waste in Brazil:** Generation, collection, recycling and the covid pandemic. Cleaner Waste Systems, v. 3, 2022.

DICIO – Dicionário Online de Português. **Significado de Sustentabilidade**. Disponível em: <https://www.dicio.com.br/sustentabilidade/>. Acesso em: 31 jan. 2025.

DVG TÊXTIL. **Aditivo Têxtil**. 2024. Disponível em: <https://dvgtextil.com.br/glossario/aditivo-textil/>. Acesso em: 12 fev. 2025.

EICKHOFF, Hans. **The appeal of the circular economy revisited: on track for transformative change or enabler of moral licensing?** Humanities and Social Sciences CommunicationsSci Commun, v. 11, n. 301, 2024.

LIY, Macarena Vidal. El País. Economia. Clima e meio ambiente**. China fecha definitivamente suas fronteiras ao lixo de outros países.** 2020. Disponível em: <https://brasil.elpais.com/economia/2020-12-16/china-fecha-definitivamente-suas-fronteiras-ao-lixo-de-outros-paises.html/>. Acesso em: 12 fev. 2025.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. **A new textiles economy:** Redesigning fashion's future, 2017a. Disponível em: <https://ellenmacarthurfoundation.org/a-new-textiles-economy>. Acesso em: 03 fev. 2023.

_____. **Economia Circular**. 2017b. Disponível em: <https://archive.ellenmacarthurfoundation.org/pt/>. Acesso em: 14 jul. 2022.

_____. **O diagrama de borboleta:** visualizando a economia circular. Disponível em: <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/pt/o-diagrama-de-borboleta>. Acesso em: 11 fev. 2025.

_____. **Rumo à economia circular:** o racional de negócio para acelerar a transição. 2015.

_____. **Schools of thought that inspired the circular economy**. 2023. Disponível em: <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/schools-of-thought-that-inspired-the-circular-economy>. Acesso em: 04 nov. 2024.

_____. **Towards the circular economy: Economic and business rationale for an accelerated transition.** Vol 1, 2013. Disponível em: <https://emf.thirdlight.com/file/24/xTyQj3oxiYNMO1xTFs9xT5LF3C/Towards%20the%20circular%20economy%20Vol%201%3A%20an%20economic%20and%20business%20rationale%20for%20an%20accelerated%20transition.pdf>. Acesso em: 1 out. 2024.

ERKMAN, Suren**. Industrial ecology**: a new perspective on the future of the industrial system. Biomedical intelligence. Swiss Med Wkly. v. 131, n. 3738, p. 531-538, 2001.
EUROPEAN UNION. **Directive 2008/98/EC of the European Parliament and of the Council of 19 November 2008 on waste and repealing certain Directives (Text with EEA relevance).** 2008. Disponível em: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=CELEX%3A32008L0098>. Acesso em: 15 out. 2024.

_____. **Directive 2012/19/EU of the European Parliament and of the Council of 4 July 2012 on waste electrical and electronic equipment (WEEE) (recast) Text with EEA relevance**. Official Journal of the European Union. 2012. Disponível em: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A32012L0019>. Acesso em: 10 jul. 2024.

_____. **Directive (EU) 2018/851 of the European Parliament and of the Council of 30 May 2018 amending Directive 2008/98/EC on waste (Text with EEA**

relevance). Official Journal of the European Union. 2018. Disponível em: < https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2018/851/oj>. Acesso em: 24 mar. 2023.

EUROSTAT. Statistics Explained. **Glossary: Preparing for Reuse**. Disponível em: <https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Glossary:Preparing_for_reuse>. Acesso em: 15 out. 2024.

EXAME. **Malwee amplia linha de roupas feitas com um copo d'água**. 2022. Disponível em: <https://exame.com/esg/malwee-amplia-linha-de-roupas-feitas-com-apenas-um-copo-dagua/>. Acesso em: 31 mar. 2023.

FARHANA, K.; KADIRGAMA, K.; MAHAMUDE, A. S. F.; MICA, M. T**. Energy consumption, environmental impact, and implementation of renewable energy resources in global textile industries:** an overview towards circularity and Sustainability. Materials Circular Economy, v. 4, n. 15, 2022.

FAROOQ, Assad; NAQVI, Sohail Ali; KAMIL, Ifrah. **Life Cycle Assessment of Reuse and Recycle of Denim Fabric in the Textile Industry**. WWF-Pakistan, 2022.

FAVA TÊXTIL. **Desfibrado mil cores.** 2020. Disponível em: <https://www.favatextil.com.br/produtos/desfibrado-mil-cores>. Acesso em: 07 out. 2022.

FEBRATEX GROUP. **Você sabe a diferença entre jeans e denim?** Venha descobrir agora! 2019. Disponível em: <https://fcem.com.br/noticias/diferenca-entre-jeans-e-denim/>. Acesso em: 27 dez. 2024.

FIBRAN DO BRASIL. **Desfibrado Poliéster.** s.d. Disponível em: <https://www.fibran.com.br/desfibrado-poliester>. Acesso em: 07 out. 2022.

FLANDERS D. C. **Close The Loop** – A guide towards a circular fashion industry. 2023. Disponível em: <https://www.close-the-loop.be/en>. Acesso em: 15 mar. 2023.

FORTI, V.; BALDÉ, C. P.; KUEHR, R. **E-waste Statistics:** Guidelines on Classifications, Reporting and Indicators, second edition. United Nations University, ViE – SCYCLE, Bonn, Germany, 2018. Disponível em: <https://collections.unu.edu/eserv/unu:6477/RZ_EWaste_Guidelines_LoRes.pdf>. Acesso em: 25 jul. 2024.

FORTI, Vanessa; BALDÉ, Cornelius Peter; KUEHR, Ruediger; BEL, Garam. **The Global E-waste Monitor 2020:** Quantities, flows and the circular economy potential. United Nations University (UNU)/United Nations Institute for Training and Research (UNITAR) – co-hosted SCYCLE Programme, International Telecommunication Union (ITU) & International Solid Waste Association (ISWA), Bonn/Geneva/Rotterdam, 2020. Disponível em: <https://ewastemonitor.info/wp-content/uploads/2020/11/GEM_2020_def_july1_low.pdf>. Acesso em: 23 jul. 2024.

GENG, Yong; SARKIS, Joseph; BLEISCHWITZ, Raimund. **How to globalize the circular economy**. Nature, v. 565, p. 153-155, 2019.

GLOBAL FOOTPRINT NETWORK. **Earth Overshoot Day**. 2024. <https://www.footprintnetwork.org/our-work/earth-overshoot-day/>. Acesso em: 29 out. 2024.

_____. **Earth Overshoot Day creeps back to July 29.** 2021. Disponível em: <https://overshoot.footprintnetwork.org/newsroom/press-release-june-2021-english/>. Acesso em: 18 ago. 2022.

_____. **The Stockholm Syndrome.** 2022. Disponível em: <https://www.footprintnetwork.org/2022/05/26/50-years-stockholm-syndrome/>. Acesso em: 18 ago. 2022.

GLOBAL FOOTPRINT NETWORK, YORK UNIVERSITY e FOOTPRINT DATA FOUNDATION. **Country Trends**. 2023. Disponível em: <https://data.footprintnetwork.org/#/countryTrends?cn=5001&type=BCpc,EFCpc>. Acesso em: 14 dez. 2023.

GNONI, Maria Grazia; MOSSA, Giorgio; MUMMOLO, Giovanni; TORNESE, Fabiana; VERRIELLO, Rossella. **Supporting circular economy through use-based business models:** the washing machines case. Procedia CIRP, v. 64, p. 49-54, 2017.

GPEA – Grupo Pesquisador em Educação Ambiental, Comunicação e Arte. **A importância da imaginação pós-capitalista**. Programa de Pós-Graduação em Educação, Universidade Federal de Mato Grasso. 2013. Disponível em: < https://gpeaufmt.blogspot.com/2013/08/a-importancia-da-imaginacao-pos.html>. Acesso em: 28 jul. 2022.

GRAÇA, Fernanda Faes e; SERRA, Eduardo Gonçalves. **O discurso hegemônico na educação ambiental.** 2020. IBEAS – Instituto Brasileiro de Estudos Ambientais. XI Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental. Vitória/ES, 23 a 26/11/2020. Disponível em: <https://www.ibeas.org.br/congresso/Trabalhos2020/VII-019.pdf>. Acesso em13 jun. 2024.

GÜLSERLILER, Ece G; BLACKBURN, Joseph D.; WASSENHOVE, Luk N. Van. **Consumer acceptance of circular business models and potential effects on economic performance:** The case of washing machines. Journal of Industrial Ecology, v. 26, p. 509-521, 2021.

HALL, Robert E; LIEBERMAN, Marc. **Microeconomia** - Princípios e Aplicações. Tradução Luciana Penteado Miquelino; Revisão técnica Carlos Roberto Martins Passos. São Paulo: Cengage Learning, 2003.

HARVEY, David. **Os limites do capital** [recurso eletrônico]. Tradução Magda Lopes. 1. ed. São Paulo: Boitempo, 2013.

HATCHER, Gillian D.; IJOMAH, W.L.; WINDMILL, J.F.C. **Design for remanufacture:** a literature review and future research needs. Journal of Cleaner Production, v. 19, n. 17-18, p. 2004-2014, 2011.

HIRATUKA, Célio; VIANA, Cristiane; Pesquisadores e bolsistas do NEIT/IE/Unicamp; ARAÚJO, Rogério Dias da; MELLO, Carlos Henrique; ULHARUZO, Caetano Glava. **Relatório de Acompanhamento Setorial – Têxtil e Confecção**. Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial – ABDI e Núcleo de Economia Industrial e da Tecnologia do Instituto de Economia da Universidade Estadual de Campinas – Unicamp, volume I, jun. 2008.

IBER – Instituto Brasileiro de Energia Reciclável. **Saiba como funciona o processo de reaproveitamento do plástico e do ácido das baterias chumbo-ácido**. 2022. Disponível em: <https://iberbrasil.org.br/blog/2022/07/10/saiba-como-funciona-o-processo-de-reaproveitamento-do-plastico-e-do-acido-das-baterias-chumbo-acido/>. Acesso em: 12 fev. 2025.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censo 2022 Panorama**. 2022a. Disponível em: <https://censo2022.ibge.gov.br/panorama/>. Acesso em: 22 jul. 2024.

____. **Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios Contínua (PNAD Contínua)**. Características gerais dos domicílios e dos moradores 2022. 2024. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv102004_informativo.pdf>. Acesso em: 15 jul. 2024.

____. **PIA-Produto – Pesquisa Industrial Anual - Produto**. 2022b. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/industria/9044-pesquisa-industrial-anual-produto.html?edicao=40478&t=downloads>. Acesso em: 22 ago. 2024.

IEMI – Inteligência de Mercado. Brasil Têxtil 2021. **Relatório Setorial da Indústria Têxtil Brasileira**. Vol, 21. nº 21. São Paulo, 2021.

IPEA – Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. **O lado B da economia verde**. Desafios do Desenvolvimento. Ano 9, edição 72, 2012. Disponível em: <https://www.ipea.gov.br/desafios/index.php?option=com_content&view=article&id=2762:catid=28&Itemid=23>. Acesso em: 11 out. 2023.

IRP. **Re-defining Value** – The Manufacturing Revolution. Remanufacturing, Refurbishment, Repair and Direct Reuse in the Circular Economy. Nabil Nasr, Jennifer Russell, Stefan Bringezu, Stefanie Hellweg, Brian Hilton, Cory Kreiss, and Nadia von Gries. A Report of the International Resource Panel. United Nations Environment Programme, Nairobi, Kenya, 2018. Disponível em: <https://www.resourcepanel.org/file/1105/download?token=LPqPM9Bo> Acesso em: 16 jan. 2024.

JOHNSON, Michael, MCMAHON, Kathleen; FITZPATRICK, Colin. **A Preparation for Reuse Trial ofWashing Machines in Ireland**. Sustainability, 12(3), 1175, 2020.

JUNIOR, Biagio de Oliveira Mendes. **Setor Têxtil – Produção, Comércio Internacional e Perspectivas para Brasil, Nordeste, Ceará e Pernambuco em 2021**. Caderno Setorial ETENE, ano 6, n. 185, set. 2021.

KANT. R. **Textile dyeing industry an environmental hazard**. Natural Science, vol. 4, n. 1, p. 22-26, 2012.

KAZA, Silpa; YAO, Lisa; BHADA-TATA, Perinaz; WOERDEN, Frank Van. **What a Waste: 2.0:** A Global Snapshot of of Solid Waste Management to 2050. Urban Development Series. Washington, DC: World Bank

KLINT, Erik; PETERS, Gregory. **Sharing is caring - the importance of capital goods when assessing environmental impacts from private and shared laundry systems in Sweden**. The International Journal of Life Cycle Assessment, v. 26, p. 1085-1099, 2021.

LIFSET, Reid, GRAEDEL, Thomas E. **A Handbook of Industrial Ecology**. Chapter 1: Industrial ecology: goals and definitions. Ayres RU, Ayres, LW (Eds.), 704 p., 2002.

LOON, Patricia Van; WASSENHOVE, Luk N. Van; MIHELIC, Ales. **Designing a circular business strategy:** 7 years of evolution at a large washing machine Manufacturer. Business, Strategy and the Environment, v. 31, n. 3, p. 1030–1041, 2021.

LÖWY, Michael. **Ecossocialismo:** o que é, por que precisamos dele, como chegar lá. Germinal: marxismo e educação em debate, Salvador, v.13, n.2, p.471-482, ago. 2021.

LU, Sheng. **WTO Reports World Textiles and Clothing Trade in 2021**. 2022. Disponível em: <https://shenglufashion.com/2022/12/02/world-textiles-and-clothing-trade-in-2021-a-statistical-review/>. Acesso em: 24 jan. 2023.

MAJUMDAR, Abhijit; SINHA, Sanjib. **Modeling the barriers of green supply chain management in small and medium enterprises** - A case of Indian clothing industry. Management of Environmental Quality: An International Journal vol. 29 n. 6, pp. 1110-1122, 2018.

MALINS, C., Galarza, S., BARAL, A., BRANDT, A., HOWORTH, G. **The Development of a Greenhouse Gas Emissions Calculation Methodology for the Fuel Quality Directive**. Report to the Directorate General for Climate Action of the European Commission. Washington D.C.: The International Council on Clean Transportation (ICCT). 2014. Disponível em: <https://theicct.org/wp-content/uploads/2021/06/ICCT_Crude-GHG-calculation-methodology_Dec2014.pdf>. Acesso em: 04 nov. 2024.

MALTHUS, Thomas. **Ensaio sobre a População**. Coleção Economia Política. Brasil: Lebooks editora, 2017.

MARQUES, António D.; MARQUES, Anastasia; FERREIRA, Fernando**. Homo Sustentabilis:** circular economy and new business models in fashion industry. SN Applied Sciences, a Springer Nature Journal. 2020.

MARQUES, Carla. **Bala de prata contra a imortalidade**. Cyber dúvidas da língua portuguesa. ISCTE-IUL – Instituto Universitário de Lisboa. 15 de novembro de 2020. Disponível em: <https://ciberduvidas-ql.iscte-iul.pt/artigos/rubricas/idioma/bala-de-prata-contra-a-imortalidade/4319>. Acesso em: 11 out. 2024.

MARTINS, Antônio. Outras Palavras. FST**: Boaventura vê capitalismo e suas sete ameaças**. 2012. Disponível em: <https://outraspalavras.net/sem-categoria/fst-boaventura-santos-ve-capitalismo-e-suas-sete-amecas/>. Acesso em: 11 out. 2023.

MASANET, Eric; HORVATH, Arpad. **Assessing the benefits of design for recycling for plastics in electronics:** A case study of computer enclosures. Materials and Design, v. 28, n. 6, p. 1801-1811, 2007.

MAXIMIANO, Antônio César Amaru. **Introdução à administração**. 5. ed. revista e ampliada. São Paulo: Atlas, 2000.

MCKINSEY. **Style that's sustainable:** A new fast-fashion formula. 2016. Disponível em: <https://www.mckinsey.com/capabilities/sustainability/our-insights/style-thats-sustainable-a-new-fast-fashion-formula>. Acesso em: 24 jan. 2023.

MCKINSEY & COMPANY; GLOBAL FASHION AGENDA (GFA). **Fashion on Climate: how the fashion industry can urgently act imate to reduce its greenhouse gas emissions**. 2020. Disponível em: <https://www.mckinsey.com/~/media/mckinsey/industries/retail/our%20insights/fashion%20on%20climate/fashion-on-climate-full-report.pdf>. Acesso em: 29 jul. 2022.

MEDEIROS, Ivan L de; VIEIRA, Alessandro; BRAVIANO, Gilson; GONÇALVES, Berenice, S. **Canvas for Systematic review and Bibliometrics: literature review facilitated by information visualization**. Revista Brasileira de Design da Informação / Brazilian Journal of Information Design, v. 12, n. 1, p. 93 -10, 2015. São Paulo, Brazil.

MESSMANN, Lukas; BOLDOCZKI, Sandra; THORENZ, Andrea; TUMA, Axel. **Potentials of preparation for reuse: A case study at collection points in the German state of Bavaria**. Journal of Cleaner Production, v. 211, p. 1534-1546, 2019.

MICHAELIS. Dicionário Brasileiro da Língua Portuguesa. **Sustentabilidade**. Disponível em: <https://michaelis.uol.com.br/busca?r=0&f=0&t=0&palavra=sustentabilidade>. Acesso em: 31 jan. 2025.

MODEFICA; FGVces; REGENERATE. **Fios da Moda:** Perspectiva Sistêmica Para Circularidade. São Paulo, 2020.

MOREIRA, Kênia Hilda; GOIS, Marcos Lucio de Sousa. **Influência de Boaventura de Sousa Santos em Pesquisas em Educação no Brasil**. Revista Travessias - Pesquisas em Educação, Cultura, Linguagem e Arte. Cascavel, Brasil, v.1, n.1, p. e2742, 2007. Disponível em: <https://e-revista.unioeste.br/index.php/travessias/article/view/2742>. Acesso em: 11 out. 2023.

NAÇÕES UNIDAS BRASIL **Acordo de Paris sobre o Clima**. 2015. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/node/88191>. Acesso em: 29 jul. 2022.

_____. **Sobre o nosso trabalho para alcançar os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável no Brasil**. 2022. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>. Acesso em: 15 jul. 2022.

NAHAR, Nilesh Jayantilal. **The future of washing as a sevice in a circular economy**. Master Thesis. MSc. Integrated Product Design. Faculty of Industrial Design Engineering. TUDelft – Delft. The Netherlands, 2019. Disponível em: <https://repository.tudelft.nl/record/uuid:466ea0b5-49da-43ea-8346-81c4e61f4953>. Acesso em: 18 out. 2024.

NARS, Nabil. **Remanufacturing and the circular economy**. *In*: LOVINS, Hunter; FRANCONI, Ellen; WEBSTER, Ken. A New Dynamic 2: Effective Systems in a Circular Economy. Ellen MacArthur Foundation Publishing, 212 p., 2016. Disponível em: <https://emf.thirdlight.com/link/4rwk76wgihd4-pax5g2/@/preview/1?o> e <https://books.google.com.br/books/about/A_New_Dynamic_2_Effective_Systems_in_a_C.html?id=cizOjwEACAAJ&redir_esc=y>. Acessos em 04 set. 2024.

NATURE Editorials. **How to make an economy circular**, v. 612, p.190, 2022.

NICHOLSON, Walter. **Teoría microeconómica** - Principios básicos y ampliaciones. 9a. ed. México: Cengage Learning Editores, S.A, 2008.

NICHOLSON, Walter; SNYDER, Christopher. **Microeconomic Theory:** Basic Principles and Extension. Eleventh Edition. South-Western, USA: Cengage Learning, 2012.

O GLOBO. **Mercado de créditos de carbono é um avanço para o Brasi**l. 2023. Disponível em: < https://oglobo.globo.com/opiniao/editorial/coluna/2023/10/mercado-de-creditos-de-carbono-e-um-avanco-para-o-brasil.ghtml>. Acesso em: 10 out. 2023.

_____. **Produção de veículos cai 5% no 1º semestre de 2022 e Brasil deverá vender (ainda) menos carros no ano.** 2022. Disponível em: < https://autoesporte.globo.com/industria/noticia/2022/07/producao-de-veiculos-cai-5percent-no-1o-semestre-de-2022-e-brasil-devera-vender-ainda-menos-carros-no-ano.ghtml>. Acesso em: 31 jul. 2022.

OECD – Organisation for Economic Co-operation and Development. **A Caminho do Crescimento Verde:** Um Sumário para os Decisores Políticos. Maio de 2011. Disponível em: <https://www.oecd.org/greengrowth/48536946.pdf>. Acesso em: 24 jul. 2022.

_____. **Global Plastics Outlook:** Policy Scenarios to 2060. OECD Publishing, Paris, 2022. Disponível em: <https://www.oecd.org/en/publications/global-plastics-outlook_aa1edf33-en.html>. Acesso em: 31 jul. 2022.

PALHARES, Julio Cesar Pascale. **Pegada hídrica na produção de carne e leite bovino no Brasil**. *In* Anais das palestras / IV Simpósio Brasileiro de Produção de Ruminantes no Cerrado: Eficiência produtiva e impacto ambiental na produção de ruminantes; Gilberto de Lima Macedo Junior, Simone Pedro da Silva (Coordenadores). Uberlândia, MG: UFU, 2018. 97 p. Disponível em:

<http://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/1098277>. Acesso em: 24 nov. 2024.

PAULETTI, Leonardo Miscow. **Aquecimento Global:** Externalidades e Oportunidades para o Brasil. Monografia. Departamento de Economia, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2007.

PETERS, Greg; SWEET, Susanne; GRANBERG, Hjalmar. The role of science and technology in sustainable fashion. In Fletcher, Kate. & Tham, Mathilda (Eds). **The Handbook of Sustainable Fashion**. London: Routledge, 2014.

PFISTER, Stephan; KOEHLER, Annette; HELLWEG, Stefanie**. Assessing the Environmental Impacts of Freshwater Consumption in LCA**. Environmental Science & Technology, v. 43, n.11, p. 4098-4104, 2009.

PORTAL DA INÚSTRIA. **CNI promove oficina sobre o tema Economia Verde.** 2012. Disponível em: <https://noticias.portaldaindustria.com.br/noticias/sustentabilidade/cni-promove-oficina-sobre-o-tema-economia-verde/>. Acesso em: 24 jul. 2022.

_____. **O que é economia verde?** s.d. Disponível em: <https://www.portaldaindustria.com.br/industria-de-a-z/economia-verde/>. Acesso em 24 jul. 2022.

ROMUNO, Joe. **Is recycling worth it?** A look at the costs and benefits of recycling. 2021. Disponível em: <https://www.rts.com/blog/is-recycling-worth-it/>. Acesso em 22 out. 2024.

ROOS, Sandra; SANDIN, Gustav; ZAMANI, Bahareh; PETERS, Greg; SVANSTRÖM, Magdalena. Will Clothing Be Sustainable? Clarifying Sustainable Fashion. *In*: MUTHU, Subramanian Senthilkannan (Ed.). **Textiles and Clothing Sustainability**: Implications in Textiles and Fashion. Textile Science and Clothing Technology. Singapura: Springer, 2017.

RREUSE – The Reuse and Recycling EU Social Enterprises network. **Investigation into the repairability of Domestic Washing Machines, Dishwashers and Fridges**. 2013. Disponível em: <https://rreuse.org/investigation-into-the-repairability-of-domestic-washing-machines-dishwashers-and-fridges/>. Acesso em: 23 ago. 2024.

RÜDENAUER, Ina; GENSCH, Carl-Otto; QUACK, Dietlinde. **Eco-Efficiency Analysis of Washing machines** – Life Cycle Assessment and determination of optimal life span. Öko-Institut e.V. Freiburg, 2005. Disponível em: <https://www.oeko.de/publikation/eco-efficiency-analysis-of-washing-machines/>. Acesso em 25 out. 2024.

SEBRAE – Serviço Brasileiro de Apoio às Micros e Pequenas Empresas. **Comércio de artigos usados segue em alta no país**. 2022. Disponível em: <https://agenciasebrae.com.br/modelos-de-negocio/comercio-de-artigos-usados-segue-em-alta-no-pais/>. Acesso em: 08 fev. 2023.

_____. **Retalhos de tecidos: no lugar de desperdício, negócios sustentáveis**. 2014. Disponível em: <https://respostas.sebrae.com.br/retalhos-de-tecidos-no-lugar-do-desperdicio-negocios-sustentaveis/>. Acesso em: 07 out. 2022.

SENADO FEDERAL. **Projeto de Lei nº 1874, de 2022**. 2024. Disponível em: <https://www25.senado.leg.br/web/atividade/materias/-/materia/153918>. Acesso em: 13 jun. 2024.

SCHLAGWEIN, Daniel; SCHODER; Detlef; SPINDELDREHER, Kai. **Consolidated, systemic conceptualization, and definition of the "sharing economy"**. Journal of the Association for Information Science and Technology, v. 71, n. 7, p. 817-838, 2020.

SCHRÖDER, Patrick; BENGTSSON, Magnus; COHEN, Maurie; DEWICK, Paul; HOFSTETTER, Joerg; SARKIS, Joseph. **Degrowth within** – Aligning circular economy and strong sustainability narratives. Resources, Conservation & Recycling, v. 146, p. 190-191, 2019.

SEI – Stockholm Environment Institute; CEEW – Council On Energy, Environment and Water. **Stockholm50+:** Unlocking a Better Future, 2022. Disponível em: <https://www.stockholm50.report/unlocking-a-better-future.pdf>. Acesso em: 28 jun. 2022.

SINIR – Sistema Nacional de Informações sobre a Gestão dos Resíduos Sólidos. **Acordo Setorial para Implantação de Sistema de Logística Reversa de Produtos Eletroeletrônicos de Uso Doméstico e seus Componentes**. 2022a. Disponível em: <https://portal-api.sinir.gov.br/wp-content/uploads/2022/05/Acordo_Setorial_-_Eletroeletro%CC%82nicos__sem_anexos.pdf>. Acesso em: 11 jul. 2024.

_____. **Anexo VII – Cronograma de implantação da fase 2**. 2022b. Disponível em: <https://portal-api.sinir.gov.br/wp-content/uploads/2022/05/ANEXO_VII.pdf>. Acesso em: 11 jul. 2024.

_____. **Eletroeletrônicos e seus componentes de uso doméstico**. s.d. Disponível em: <https://sinir.gov.br/perfis/logistica-reversa/logistica-reversa/eletroeletronicos/>. Acesso em: 11 jul. 2024.

_____. **Relatório Nacional de Gestão de Resíduos Sólidos 2019**. 2021. Disponível em: <https://sinir.gov.br/relatorios/nacional/>. Acesso em: 04 jul. 2024.

LINHARES, Henrique. Só Hélices. **O que é TNT – Tecido não tecido**. 2023. Disponível em: <https://sohelices.com.br/o-que-e-tnt-tecido-nao-tecido/?srsltid=AfmBOoqCWH6ESBf_v9C85avF6WycBQNZ21zMQTYa28zmWdZ57wWozhNb>. Acesso em: 12 fev. 2025.

STAHEL, Walter R. **Langlebigkeit und Material recycling** - Strategien zur Vermeidung von Abfällen im Bereich der Produkte; Vulkan Verlag, Essen; 2nd edition, 1992. Disponível em: <http://www.product-life.org/en/archive/case-studies/washing-machines>. Acesso em: 04 nov. 2024.

_____. **The circular economy**. Nature, v. 531, p. 435-438, 2016.

STEP INITIATIVE; UNU – United Nations University. **One Global Definition of E-waste**. Solving the E-waste Problem (Step) Initiative White Paper. Bonn, Alemanha, 2014. Disponível em: <https://www.step-initiative.org/files/_documents/whitepapers/StEP_WP_One%20Global%20Definition%20of%20E-waste_20140603_amended.pdf>. Acesso em: 18 jul. 2024.

STERN, Nicholas. **The Economics of Climate Change:** The Stern Review. UK: Cambridge University Press, 2007.

SUNDIN, Erik. **An economical and technical analysis of a household appliance remanufacturing process**. Proceedings Second International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing. Tóquio, Japão, p. 536-541, 2001.

SUNDIN, Erik; JACOBSSON, Nicholas; BJÖRKMAN, Mats. **Analysis of service selling and design for remanufacturing**. IEEE International Symposium on Electronics and the Environment (IEEE-00), São Francisco, Califórnia, EUA. 2000.

SUNDIN, Erik; TYSKENG, Sara. **Refurbish or Recycle Household Appliances? An Ecological and Economic study of Electrolux in Sweden**. Proceedings of EcoDesign 2003. Third International Symposion on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing. Tóquio, Japão, p. 348-355, 2003.

SYBERG, Cristiano. **Path to sustainability**. Nature, v. 611, S6, 2022.

TECCHIO, Paolo; ARDENTE, Fulvio; MATHIEUX, Fabrice. **Analysis of durability, reusability and reparability** - Application to washing machines and dishwashers. EUR 28042. Luxembourg (Luxembourg): Publications Office of the European Union; 2016. JRC102632. Disponível em: <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC102632>. Acesso em: 17 out. 2024.

TEXTILE EXCHANGE. **International Cotton Advisory Committee (ICAC)**. 2024. Disponível em: <https://textileexchange.org/conference/international-cotton-advisory-committee-icac/>. Acesso em 19 dez. 2024.

_____. **Materials Market Report**. 2023. Disponível em: <https://textileexchange.org/app/uploads/2023/11/Materials-Market-Report-2023.pdf>. Acesso em 21 mar. 2024.

_____. **Viscose**. 2024. Disponível em: <https://textileexchange.org/glossary/viscose/>. Acesso em 31 dez. 2024.

TEXTILE INDUSTRY. **3 Tecidos Eco-Friendly Feitos No Brasil Para Uma Produção Mais Sustentável.** Indústria Têxtil e do Vestuário - Textile Industry - Ano XV. 2016. Disponível em: <http://textileindustry.ning.com/m/discussion?id=2370240%3ATopic%3A758302>. Acesso em: 07 out. 2022.

THREDUP. **Resale Report**. 2022. Disponível em: <https://www.thredup.com/resale/static/2022-resaleReport-full-92a77020598ceca50f43227326100cc2.pdf>. Acesso em: 09 fev. 2023.

UN ALLIANCE FOR SUSTAINABLE FASHION. **What is the UN Alliance for Sustainable Fashion?** s.d. Disponível em: <https://unfashionalliance.org/>. Acesso em: 19 fev. 2023.

UNEP – United Nations Environment Programme. **Basel Convention on the Control of Transboundary Movements of Hazardous Wastes and their Disposal**. 2020. UNEP/BRS/2014/3/Rev.2. Disponível: < https://www.basel.int/TheConvention/Overview/TextoftheConvention/tabid/1275/Default.aspx> Acesso em: 16 jan. 2024.

_____. **Cleaning up couture:** what's in your jeans? 2018a. Disponível em: <https://www.unep.org/news-and-stories/story/cleaning-couture-whats-your-jeans>. Acesso em: 06 mar. 2023

_____. **Conference of the Parties to the Basel Convention on the Control of Transboundary Movements or Hazardous Wastes and Their Disposal Thirteenth meeting**. 2017. UNEP/CHW.13/4/Add.2. Disponível: <https://www.basel.int/Portals/4/download.aspx?d=UNEP-CHW.13-4-Add.2.English.pdf>. Acesso em: 16 jan. 2024.

_____. **Global Waste Management Outlook 2024:** Beyond an age of waste – Turning rubbish into a resource. Nairobi. 2024. Disponível em: <https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/44939/global_waste_management_outlook_2024.pdf?sequence=3>. Acesso em: 27 ago. 2024.

_____. **Putting the brakes on fast fashion**. 2018b. Disponível em: <https://www.unep.org/news-and-stories/story/putting-brakes-fast-fashion>. Acesso em: 07 mar. 2023.

_____. **What is an "Inclusive Green Economy"?**. 2025. Disponível em: <https://www.unep.org/explore-topics/green-economy/why-does-green-economy-matter/what-inclusive-green-economy>. Acesso em: 13 fev. 2025.

UNITED NATIONS. **UN launches drive to highlight environmental cost of staying fashionable.** 2019. Disponível em: <https://news.un.org/en/story/2019/03/1035161>. Acesso em: 04 mar. 2023.

_____. Department of Economic And Social Affairs, Population Divison. **World Population Prospects 2024: Summary of Results**. UN DESA/POP/2024/TR/NO. 9, New York, United Nations, 2024. Disponível: < https://desapublications.un.org/publications/world-population-prospects-2024-summary-results>. Acesso em: 25 set. 2024.

VASQUES, Rosana; ONO, Maristela Mitsuko. **When Sharing Is (Almost and/or Possibly) Better than Owning**: A Case Study on a "Full Service" Collective Laundry. Gestão Org, v. 14, p. 97-105, Edição Especial, 2016.

VERMA, Anju; VERMA, Megha; SINGH, Anchal. Chapter 14 - Animal tissue culture principles and applications. *In*: VERMA, Ashish S.; SINGH, Anchal. **Animal Biotechnology** (Second Edition). Academic Press, 2020, Pages 269-293

WANG Siyan; SALMON Sonja. **Progress toward Circularity of Polyester and Cotton Textiles.** Sustainable Chemistry, v. 3, p. 376-403, 2022.

WEETMAN, Catherine. **Economia circular:** conceitos e estratégias para fazer negócios de forma mais inteligente, sustentável e lucrativa. Tradução de Afonso Celso da Cunha Serra. 1. ed. São Paulo: Autêntica Business, 2019.

WORLD BANK**. How Much Do Our Wardrobes Cost to the Environment?** 2019. Disponível em: <https://www.worldbank.org/en/news/feature/2019/09/23/costo-moda-medio-ambiente>. Acesso em: 19 fev. 2023.

WRI BRASIL. **O saldo da COP26: o que a Conferência do Clima significou para o Brasil e o mundo**. 2021. Disponível em: <https://wribrasil.org.br/noticias/o-saldo-da-cop26-o-que-conferencia-do-clima-significou-para-o-brasil-e-o-mundo>. Acesso em: 29 jul. 2022.

WWF – World Wide Fund for Nature**. Acordo de Paris completa cinco anos com lições aprendidas.** 2020. Disponível em: <https://www.wwf.org.br/?77471/Acordo-de-Paris-completa-cinco-anos-com-licoes-aprendidas>. Acesso em: 27 jul. 2022.

_____. **Living Planet Report 2024** – A System in Peril. WWF, Gland, Switzerland, 2024. Disponível em: <https://wwfeu.awsassets.panda.org/downloads/lpr-fullreport.pdf>. Acesso em: 03 jan. 2025.

_____. **Relatório Planeta Vivo 2022** – Construindo uma sociedade positiva para a natureza. 2022. Almond, R. E. A. Grooten, M; Juffe Bignoli, D. & Petersen, T. (Eds). WWW, Gland, Suíça. Disponível em: <https://wwfbrnew.awsassets.panda.org/downloads/relatorio_planeta_vivo_2022_portugues_caderno.pdf>. Acesso em: 12 dez. 2023.

WWF-Brasil. **Pegada Ecológica**: que macas queremos deixar no planeta. Texto: Mônica Pilz Borba; Coordenação: Larissa Costa e Mariana Valente; Supervisão: Anderson Falcão. Brasília: WWF-Brasil, 2007. Disponível em: < https://d3nehc6yl9qzo4.cloudfront.net/downloads/19mai08_wwf_pegada.pdf>. Acesso em: 11 fev. 2025.

YORK UNIVERSITY ECOLOGICAL FOOTPRINT INITIATIVE & GLOBAL FOOTPRINT NETWORK. **Public Data Package of the National Footprint and Biocapacity Accounts**, 2023 edição produzida para a Footprint Data Foundation and distribuída por Global Footprint Network. Disponível em: <https://www.footprintnetwork.org/licenses/public-data-package-free/?>. Acesso em: 14 dez. 2023.

YUAN, Zengwei; ZHANG, You; LIU, Xin. **Life cycle assessment of horizontal-axis washing machines in China**. The International Journal of Life Cycle Assessment, v. 21, n.1, p. 15-28, 2016.

ZALEWSKA, Osvaldo Luiz. **Economia circular:** uma proposta de estrutura para mapeamento de estratégias circulares em estudos de casos. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Processos Tecnológicos e Ambientais, Universidade de Sorocaba, 2021. Disponível em: <https://uniso.br/mestrado-doutorado/pta/dissertacoes/2021/osvaldo-luiz-zaleswska.pdf>. Acesso em: 14 dez. 2023.

ZANOTTI. **Conheça os diferentes tipos de fibras têxteis!** 2024. Disponível em: <https://zanotti.com.br/blog/conheca-os-diferentes-tipos-de-fibras-texteis/>. Acesso em: 10 fev. 2025.

ZINK, Trevor; GEYER, Roland. **Circular Economy Rebound**. Journal of Industrial Ecology, v. 21, n. 3, p. 593-602, 2017.

ZINK, Trevor; GEYER, Roland; STARTZ, Richard. **A Market-Based Framework for Quantifying Displaced Production for Recycling ou Reuse**. Journal of Industrial Ecology, v. 20, n. 4, p. 719-729, 2015.