



MARTIM CORREIA ESTEVES

Licenciado em Ciências de Engenharia do Ambiente

DESENVOLVIMENTO DE ARQUÉTIPOS CAUSAIS PARA A ANÁLISE SISTÉMICA DE ESTRATÉGIAS DE CIRCULARIDADE NO SETOR DOS EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS E ELETRÓNICOS

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA DO AMBIENTE

Universidade NOVA de Lisboa

Outubro, 2025

DESENVOLVIMENTO DE ARQUÉTIPOS CAUSAIS PARA A ANÁLISE SISTÉMICA DE ESTRATÉGIAS DE CIRCULARIDADE NO SETOR DOS EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS E ELETRÓNICOS

MARTIM CORREIA ESTEVES

Licenciado em Ciências de Engenharia do Ambiente

Orientador: Professor Doutor Nuno Videira,
Professor Associado, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade NOVA de Lisboa

Júri:

Presidente: Prof.^a Doutora Maria Paula Baptista da Costa
Antunes,
Professora Catedrática, NOVA FCT

Arguentes: Prof.^a Doutora Rita João Duarte Lopes Gouveia,
Professora Auxiliar, NOVA FCT

Orientador: Prof. Doutor Nuno Miguel Ribeiro Videira Costa,
Professor Associado, NOVA FCT

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA DO AMBIENTE

Universidade NOVA de Lisboa
Outubro, 2025

Desenvolvimento de arquétipos causais para a análise sistémica de estratégias de circularidade no setor dos equipamentos elétricos e eletrónicos

Copyright © Martim Correia Esteves, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade NOVA de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade NOVA de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Despacho Nº29/2025 - Utilização de Inteligência Artificial Generativa na NOVA FCT

No presente trabalho foram utilizadas ferramentas de inteligência artificial generativa, nomeadamente *ChatGPT-5*, para revisão gramatical, estrutura do documento e síntese de informação proveniente de artigos científicos previamente selecionados pelo autor. As ferramentas foram empregues sob a supervisão do autor e todos os conteúdos gerados foram verificados quanto à sua precisão. A autoria e a validação dos conteúdos permanecem inteiramente sob a responsabilidade do autor, estando a utilização da inteligência artificial em conformidade com as normas institucionais de integridade académica.

AGRADECIMENTOS

Quero começar por agradecer ao Prof. Nuno Videira, pela orientação e disponibilidade ao longo de todo este processo. O seu feedback, foi essencial para que pudesse evoluir, aprender e chegar a este ponto, e por isso deixo aqui o meu sincero reconhecimento.

Agradeço muito aos meus pais, irmãos e avós, por terem sido os principais responsáveis por eu estar onde estou hoje. Por terem sido as pessoas com quem passei mais tempo e por estarem sempre dispostos a ajudar-me, deixo o meu mais profundo agradecimento. Sem o vosso amor e incentivo, este caminho teria sido muito mais difícil.

Por fim, mas não menos importante, quero agradecer aos meus amigos e a todas as pessoas que a faculdade me deu e me proporcionou conhecer. Sem cada um de vocês estes 5 anos realmente não teriam sido tão engraçados e divertidos. Obrigado por todos os momentos de tertúlia e pelas distrações necessárias. Vou guardar para sempre todas as memórias com cada um de vocês, especialmente aquelas mais difíceis de explicar. Obrigado por se tornarem o padrão de amizade que tornou esta etapa da minha vida tão especial.

"You must expect great things of yourself
before you can do them."

RESUMO

O setor dos equipamentos elétricos e eletrônicos enfrenta desafios crescentes associados ao consumo intensivo de recursos, à obsolescência programada dos produtos e à produção contínua de resíduos. A natureza complexa e interligada destes problemas tem evidenciado a necessidade de abordagens analíticas que permitam compreender as dinâmicas que moldam o comportamento do sistema e identificar as causas estruturais que limitam a transição para modelos circulares.

Neste contexto, a presente dissertação tem como objetivo analisar de forma integrada as estratégias de circularidade no setor, desenvolvendo arquétipos sistêmicos que representem os principais pontos de intervenção da adoção de estratégias ao longo do ciclo de vida dos produtos. A investigação baseia-se numa abordagem de pensamento sistémico e de dinâmica de sistemas, combinando análise documental e contributos de partes interessadas para identificar relações causais, ciclos de retroação e efeitos secundários indesejados, barreiras e oportunidades à adoção de estratégias circulares.

Os resultados obtidos permitem compreender de que forma as políticas e estratégias de circularidade interagem entre si e podem afetar a eficácia das medidas de transição. Conclui-se que a análise sistémica fornece uma perspetiva integrada e útil para o planeamento e avaliação de políticas públicas e de estratégias empresariais, ao evidenciar interdependências e resistências que permanecem invisíveis em abordagens lineares, contribuindo assim para a conceção de estratégias mais coerentes e eficazes de circularidade no setor dos equipamentos elétricos e eletrônicos.

Palavras-chave: Economia circular; Dinâmica de sistemas; Arquétipos causais; Equipamentos elétricos e eletrônicos; Políticas de economia circular.

ABSTRACT

The electrical and electronic equipment sector faces growing challenges associated with intensive resource consumption, planned obsolescence of products, and continuous waste production. The complex and interconnected nature of these problems has highlighted the need for analytical approaches that allow for an understanding of the dynamics that shape the behavior of the system and identify the structural causes that limit the transition to circular models.

In this context, this dissertation aims to analyze circularity strategies in the sector in an integrated method, developing systemic archetypes that represent the main points of intervention for the adoption of strategies throughout the product life cycle. The research is based on a systemic thinking and systems dynamics approach, combining documentary analysis and stakeholder contributions to identify causal relationships, feedback loops, and unintended side effects, barriers, and opportunities for the adoption of circular strategies.

The results obtained provide an overview of how circularity policies and strategies interact with each other and can affect the effectiveness of transition measures. It is concluded that systemic analysis provides an integrated and useful perspective for the planning and evaluation of public policies and business strategies, by highlighting interdependencies and resistances that remain invisible in linear approaches, thus contributing to the design of more coherent and effective circularity strategies in the electrical and electronic equipment sector.

Keywords: Circular economy; System dynamics; Causal archetypes; Electrical and electronic equipment; Circular economy policies.

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Enquadramento.....	1
1.2	Objetivos.....	2
1.3	Estrutura e organização da dissertação	3
2	REVISÃO DE LITERATURA	5
2.1	Padrões de produção e consumo e economia circular.....	5
2.2	Desafios do setor dos equipamentos elétricos e eletrónicos.....	9
2.3	Enquadramento regulamentar do setor EEE.....	12
2.4	Estratégias empresariais para a circularidade no setor dos EEE.....	15
2.5	Barreiras e oportunidades à circularidade no setor dos EEE.....	16
2.6	Ferramentas de análise sistémica no estudo de políticas e estratégias de circularidade	21
3	METODOLOGIA	27
3.1	Abordagem metodológica geral	27
3.2	Análise sistemática da literatura	28
3.2.1	Fontes de dados.....	28
3.2.2	Análise sistemática.....	29
3.2.3	Codificação da amostra de artigos.....	29
3.2.4	Construção dos diagramas causais preliminares	32
3.2.5	Integração com o modelo dos 9 R's	33

3.3	Consulta a partes interessadas do setor dos EEE	35
3.3.1	Análise de <i>stakeholders</i>	35
3.3.2	Recolha de perceções dos <i>stakeholders</i> entrevistados	39
3.3.3	Tratamento dos dados	40
3.4	Elaboração dos arquétipos e análise de resultados	41
4	ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS	43
4.1	Arquétipo do sistema " <i>take–make–waste</i> "	43
4.2	Arquétipos sistémicos por grupos de estratégias R.....	46
4.2.1	Arquétipo causal para as estratégias do grupo R0–R2	46
4.2.2	Arquétipo causal para as estratégias do grupo R3–R7	53
4.2.3	Arquétipo causal para as estratégias do grupo R8–R9	59
4.3	Aplicação dos arquétipos na análise de políticas.....	66
4.3.1	Políticas associadas ao grupo de estratégias R0-R2.....	67
4.3.1.1	Diretiva RoHS.....	67
4.3.2	Políticas associadas ao grupo de estratégias R3-R7	68
4.3.2.1	Direito à reparação	68
4.3.2.2	Plano de ação para a economia circular.....	71
4.3.2.3	<i>Clean Industrial Deal</i>	73
4.3.3	Políticas associadas ao grupo de estratégias R8-R9	75
4.3.4	Política transversal - ESPR.....	77
4.3.4.1	Rótulos de Sustentabilidade	77
4.3.4.2	Contratos públicos ecológicos	79
4.3.4.3	Requisitos ecológicos	80
4.3.4.4	Passaporte Digital do Produto	82
4.3.5	Síntese da aplicação dos arquétipos na análise das políticas	84
4.3.6	Avaliação da eficácia das medidas.....	86

4.3.7	Síntese dos arquétipos propostos	87
5	CONCLUSÃO	89
5.1	Síntese.....	89
5.2	Limitações da investigação	90
5.3	Recomendações para investigações futuras	91
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	93
	ANEXOS	101

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Diagrama 'borboleta' da economia circular. Fonte: Ellen Macarthur Foundation (2019).	7
Figura 2.2 – Estratégias circulares R. Fonte: Potting et al. (2017).	9
Figura 2.3 – Evolução global da colocação de EEE no mercado, da produção de REEE e da fração formalmente recolhida e reciclada (2010-2030). Fonte: Baldé et al. (2024).	10
Figura 3.1 – Fluxograma do processo metodológico desenvolvido na dissertação.	28
Figura 3.2 - Exemplificação de um diagrama causal conceptual.	33
Figura 3.3 - Principais agentes da cadeia de valor do setor dos EEE. Fonte: Adaptado de Evans and Vermeulen (2021).	36
Figura 4.1 - Diagrama causal " <i>take-make-waste</i> ".	43
Figura 4.2 – Comportamento dinâmico de referência associado a um modelo " <i>take-make-waste</i> " no setor dos EEE.	45
Figura 4.3 - Arquétipo causal para as estratégias do grupo R0–R2.	46
Figura 4.4 - Comportamento dinâmico de referência associado a um cenário de adoção das estratégias R0-R2.	47
Figura 4.5 - Arquétipo causal para as estratégias do grupo R0–R2 com as principais barreiras à sua adoção.	51
Figura 4.6 - Arquétipo causal para as estratégias do grupo R0–R2 com as principais oportunidades que facilitam a sua adoção.	52
Figura 4.7 - Arquétipo causal para as estratégias do grupo R3–R7.	53
Figura 4.8 - Comportamento dinâmico de referência associado a um cenário de adoção das estratégias R3-R7.	54
Figura 4.9 - Arquétipo causal para as estratégias do grupo R3–R7 com as principais barreiras à sua adoção.	58

Figura 4.10 - Arquétipo causal para as estratégias do grupo R3–R7 com as principais oportunidades que facilitam a sua adoção.	59
Figura 4.11 - Arquétipo causal para as estratégias do grupo R8–R9.	60
Figura 4.12 - Comportamento dinâmico de referência associado a um cenário de adoção das estratégias R8-R9.....	61
Figura 4.13 - Arquétipo causal para as estratégias do grupo R8–R9 com as principais barreiras à sua adoção.	65
Figura 4.14 - Arquétipo causal para as estratégias do grupo R8–R9 com as principais oportunidades que facilitam a sua adoção.	66
Figura 4.15 - Arquétipo causal R0-R2 aplicado à política RoHS.....	68
Figura 4.16 - Arquétipo causal R3-R7 aplicado à política Direito à reparação.	70
Figura 4.17 - Arquétipo causal R3-R7 aplicado ao PAEC.	72
Figura 4.18 - Arquétipo causal R3-R7 aplicado ao <i>Clean Industrial Deal</i>	74
Figura 4.19 - Arquétipo causal R8-R9 aplicado à Diretiva REEE.	76
Figura 4.20 - Arquétipo causal R0-R2 aplicado à medida da implementação de rótulos do ESPR.	78
Figura 4.21 - Arquétipo causal R0-R2 aplicado à medida da criação de contratos públicos ecológicos do ESPR.	80
Figura 4.22 - Arquétipo causal R3-R7 aplicado à medida da criação de requisitos ecológicos do ESPR.....	82
Figura 4.23 - Arquétipo causal R3-R7 aplicado à medida da implementação do PDP do ESPR.	83

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 – Síntese das principais barreiras e oportunidades identificadas na literatura.....	17
Tabela 3.1 - Exemplificação da lista de relações causais do argumento principal.....	31
Tabela 3.2 - Estratégias circulares R. Fonte: Adaptado de Potting et al. (2017)	34
Tabela 3.3 - Nível de influência e interesse na adoção das estratégias de circularidade dos principais atores da cadeia de valor de EEE.	38
Tabela 4.1 - Síntese das respostas dos entrevistados relativamente aos efeitos genéricos das estratégias R0-R2 na cadeia de valor dos EEE.....	48
Tabela 4.2 - Síntese dos efeitos secundários não desejados resultantes da adoção das estratégias R0-R2 mencionados pelos entrevistados.....	49
Tabela 4.3 - Síntese das principais barreiras e oportunidades associadas à adoção de estratégias R0-R2 identificadas pelos entrevistados.....	50
Tabela 4.4 - Síntese das respostas dos entrevistados relativamente aos efeitos genéricos das estratégias R3-R7 na cadeia de valor dos EEE.....	55
Tabela 4.5 - Síntese dos efeitos secundários não desejados resultantes da adoção das estratégias R3-R7 mencionados pelos entrevistados.....	56
Tabela 4.6 - Síntese das principais barreiras e oportunidades associadas à adoção de estratégias R3-R7 identificadas pelos entrevistados.....	57
Tabela 4.7 - Síntese das respostas dos entrevistados relativamente aos efeitos genéricos das estratégias R8-R9 na cadeia de valor dos EEE.....	62
Tabela 4.8 - Síntese dos efeitos secundários não desejados resultantes da adoção das estratégias R8-R9 mencionados pelos entrevistados.....	63
Tabela 4.9 - Síntese das principais barreiras e oportunidades associadas à adoção de estratégias R8-R9 identificadas pelos entrevistados.....	64
Tabela 4.10 - Síntese do grau de associação dos arquétipos às políticas.....	84

Tabela 4.11 - Síntese dos arquétipos de estratégias de circularidade.....88

SIGLAS

ACV	Análise de ciclo de vida.
DS	Dinâmica de sistemas.
EEE	Equipamentos elétricos e eletrónicos.
ESPR	<i>Ecodesign for Sustainable Products Regulation.</i>
IVA	Imposto sobre Valor Acrescentado.
PAEC	Plano de Ação para a Economia Circular.
PDP	Passaporte digital do produto.
PME	Pequenas e médias empresas.
RAP	Responsabilidade alargada do produtor.
REEE	Resíduos de equipamentos elétricos e eletrónicos.
RoHS	<i>Restriction of Hazardous Substances.</i>
UE	União Europeia.
VAT	<i>Value Added Tax.</i>

INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento

O setor dos produtos elétricos e eletrónicos tem registado um crescimento acelerado nas últimas décadas, impulsionado pela inovação tecnológica e pela crescente digitalização da sociedade. No entanto, este crescimento tem resultado num aumento significativo do consumo de materiais, bem como da produção de resíduos com um crescimento anual de 3% a 5% (Shittu et al., 2021). Estas tendências de evolução sublinham a importância dos desafios ambientais e de sustentabilidade neste setor.

A substituição rápida de dispositivos, a baixa taxa de reparação e reutilização e a dependência de matérias-primas críticas têm contribuído para a prevalência de um modelo de consumo linear e insustentável. Apesar da crescente preocupação ambiental e dos esforços de regulamentação, a literatura existente foca-se maioritariamente no lado da produção, explorando desafios tecnológicos, regulamentares e de design, enquanto os efeitos da adoção de práticas de circularidade têm sido ainda relativamente pouco explorados (Sonego et al., 2022).

Nas últimas décadas, a legislação europeia para os equipamentos elétricos e eletrónicos tem evoluído com o objetivo de reduzir os impactos ambientais e fomentar a circularidade. No entanto, continuam a verificar-se dúvidas quanto à sua eficácia prática e ao ponto exato de intervenção ao longo do ciclo de vida dos produtos. Vários estudos mostram que, embora exista um conjunto diversificado de políticas em vigor, persistem lacunas significativas relacionadas com a aplicação das regras, a transparência nas cadeias de valor e a definição de requisitos claros de circularidade (Rizos & Bryhn, 2022). A evolução legislativa mostra uma

preocupação crescente com a durabilidade dos produtos, a reparação e a redução da incorporação de substâncias perigosas, mas o impacto efetivo destas medidas é frequentemente condicionado por barreiras práticas, custos acrescidos para empresas e uma fraca resposta dos consumidores (Baldassarre et al., 2022).

A literatura sobre circularidade no setor dos equipamentos elétricos e eletrónicos evidencia ainda limitações relevantes. Persistem lacunas no entendimento de como os consumidores evitam aquisições desnecessárias ou substituições precoces, assim como sobre a real predisposição para reutilizar e adquirir produtos reconicionados (Corsini et al., 2020). Do lado da produção, as empresas enfrentam obstáculos na integração de princípios da economia circular, em grande parte pela falta de ferramentas sistémicas que orientem a definição de estratégias e planos de implementação (Bressanelli et al., 2021).

Ao mesmo tempo, a investigação tem privilegiado sobretudo soluções centradas na reciclagem, enquanto outras estratégias circulares permanecem ainda pouco exploradas. Esta concentração restringe a compreensão dos efeitos das políticas e práticas industriais ao longo do ciclo de vida dos produtos, reforçando a urgência de análises mais integradas que consigam relacionar medidas regulamentares específicas com diferentes estratégias de circularidade (Hunger et al., 2024).

Neste contexto, coloca-se a necessidade de compreender de forma sistémica e integrada como os diferentes atores – empresas, consumidores, administração pública e organizações não-governamentais – interagem entre si e influenciam a adoção efetiva de estratégias de circularidade. A existência de regulamentação ou de soluções técnicas não garante a sua implementação eficaz, sendo essencial identificar as barreiras estruturais, culturais, económicas e comportamentais que limitam a transição circular. Simultaneamente, importa mapear as oportunidades que podem acelerar esse processo.

1.2 Objetivos

A presente dissertação tem como objetivo geral realizar uma análise sistémica dos efeitos de diferentes estratégias de circularidade no setor dos equipamentos elétricos e eletrónicos. Pretende compreender-se de que forma estas estratégias interagem com o sistema tradicional designado "*take-make-waste*", e quais as perceções de diferentes partes interessadas na circularidade do sistema. O estudo procura, assim, contribuir para uma visão integrada sobre os impactos, barreiras e oportunidades da transição para a economia circular neste setor,

reconhecendo a complexidade e interdependência dos fatores que influenciam o seu desempenho ambiental e económico.

Definiram-se como objetivos específicos: (i) mapear e tipificar as relações causais associadas à implementação de diferentes estratégias de circularidade no setor, recorrendo a ferramentas de análise de sistemas para o desenvolvimento de arquétipos; (ii) identificar as barreiras e oportunidades à concretização das estratégias de circularidade, analisando as relações causa-efeito de políticas de economia circular ao longo do ciclo de vida dos produtos e desenvolvendo diagramas causais que representem as interações entre regulamentação, comportamento dos consumidores e estratégias empresariais; (iii) recolher e analisar as perceções de partes interessadas do setor, de forma a validar as propostas de arquétipos desenvolvidas, bem como compreender as suas visões, desafios e recomendações relativamente à adoção e eficácia das estratégias de circularidade.

1.3 Estrutura e organização da dissertação

A presente dissertação encontra-se estruturada da seguinte forma:

1. Introdução, onde se procede ao enquadramento do tema, definidos os objetivos gerais e a estrutura do estudo.
2. Revisão de literatura, que apresenta uma análise aprofundada da produção científica existente.
3. Metodologia, onde se descreve a abordagem adotada para a investigação, bem como os métodos e ferramentas de investigação aplicadas.
4. Análise e discussão de resultados.
5. Conclusões e considerações finais, que sintetizam os principais contributos da investigação, articulando os resultados com os objetivos propostos.
6. Anexos, onde se encontra o guião final das entrevistas aos *stakeholders*.

REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Padrões de produção e consumo e economia circular

Os níveis atuais de exploração de recursos naturais, associados a modelos lineares de organização económica a nível global, estão a provocar impactos ambientais significativos e a colocar o planeta sob uma pressão cada vez maior (Roberts et al., 2023). Ao operar numa lógica linear, onde os recursos naturais são extraídos, transformados, consumidos e descartados de forma acelerada, este modelo económico conduz a um aumento contínuo das emissões de gases com efeito de estufa e à ultrapassagem dos limites planetários. Estimativas indicam ainda que, caso a população mundial atinja os 9.6 mil milhões de pessoas até 2050, poderá ser necessário o equivalente a quase três planetas para fornecer os recursos naturais necessários para sustentar os atuais estilos de vida (Glavič, 2021).

As atividades de produção e consumo deixaram de ser apenas uma resposta a necessidades materiais básicas, tornando-se numa utilização excessiva de bens e serviços que se baseia na falsa crença de que possuir e utilizar uma grande quantidade de bens é uma motivação normal e um desejo cultural aceitável (Castano Garcia et al., 2021). Neste contexto, práticas como a produção em massa de bens descartáveis, a obsolescência programada ou a destruição de produtos ainda utilizáveis tornaram-se parte integrante das cadeias de valor, refletindo um sistema que privilegia a rentabilidade e a rotatividade sobre a durabilidade e a sustentabilidade dos bens (Glöser-Chahoud et al., 2019). A ligação entre consumo e prestígio social perpetua ciclos de excesso, nos quais os estilos de vida de grupos de elevado rendimento se tornam modelos aspiracionais para a restante população, amplificando os impactos ambientais e consolidando padrões insustentáveis (Castano Garcia et al., 2021).

A resposta a este modelo passa necessariamente pela reformulação profunda das práticas de produção e consumo e dos princípios que sustentam a economia. O conceito de consumo sustentável surge como um instrumento crítico e transformador, que implica uma modificação estrutural dos padrões sociais, económicos e culturais que moldam as práticas quotidianas dos indivíduos e das instituições (Fuchs & Lorek, 2005). Neste âmbito, a noção de suficiência representa um dos pilares essenciais dessa transformação. Para além de tornar o consumo mais eficiente, a suficiência propõe uma redução absoluta da intensidade material dos estilos de vida, com particular foco nas classes com maior rendimento, cujos padrões são ambientalmente mais impactantes (Sandberg, 2021).

A literatura também demonstra que os ganhos de eficiência na produção nem sempre têm tido sucesso para diminuir os impactos ambientais relacionados com a atividade humana (Sandberg, 2021). Esta resposta sublinha a necessidade de ir além de soluções tecnológicas e repensar os modelos de desenvolvimento, os incentivos económicos e os padrões culturais que sustentam os níveis de produção e consumo atuais.

A persistência de um modelo linear de desenvolvimento, baseado na lógica "*take-make-waste*", constitui assim um dos principais entraves à sustentabilidade. A economia linear caracteriza-se pela dependência de matérias-primas virgens, pela rápida obsolescência dos produtos e pela ausência de mecanismos eficazes de regeneração dos sistemas naturais (Leitão et al., 2023). Este sistema conduz a um uso ineficiente dos recursos e à produção de resíduos em escala crescente.

Estudos recentes estimam que devido ao crescimento económico, o total de recursos naturais extraídos anualmente é cerca de quatro vezes superior ao que é poupado por estratégias de economia circular existentes (Bianchi & Cordella, 2023). Isto demonstra que, apesar das melhorias incrementais, o modelo dominante continua a exercer uma pressão insustentável sobre os limites planetários (Sala et al., 2020). A superação deste modelo exige uma abordagem sistémica que repense as interligações entre produção, consumo e sustentabilidade, substituindo o paradigma do crescimento contínuo por uma lógica de regeneração e circularidade.

A *economia circular* tem sido assim apresentada como alternativa regenerativa à lógica linear. Ao promover a reutilização, reparação, acondicionamento e reciclagem, visa manter os produtos, componentes e materiais em circulação durante o máximo de tempo possível, minimizando a extração de novos recursos e a produção de resíduos (Roberts et al., 2023; Shahidzadeh & Shokouhyar, 2023).

A economia circular é assim cada vez mais entendida como um modelo económico restaurativo e regenerativo (Leitão et al., 2023). Neste sentido, a transição para sistemas mais circulares é considerada essencial para desacoplar o crescimento económico da utilização de recursos naturais, reduzindo a pressão sobre ecossistemas e a dependência de matérias-primas finitas (Bianchi & Cordella, 2023). Iniciativas de circularidade, como o aumento do uso de materiais secundários e a expansão do emprego em setores ligados à economia circular, contribuem para mitigar a extração de recursos primários, ainda que esse efeito seja frequentemente limitado quando comparado com o impacto do crescimento económico (Bianchi & Cordella, 2023).

Este sistema é ilustrado na Figura 2.1 através do diagrama da economia circular desenvolvido pela Ellen MacArthur Foundation, que distingue dois ciclos fundamentais de fluxo de materiais. O ciclo biológico (representado a verde) privilegia processos regenerativos, nos quais os recursos retornam ao sistema natural através de estratégias como compostagem, digestão anaeróbia, produção de biogás ou cascatas de utilização de biomassa. Já o ciclo técnico (representado a azul) procura manter produtos e componentes em circulação durante o maior tempo possível, através de estratégias como partilha, manutenção, reutilização, acondicionamento, remanufactura e reciclagem. O objetivo central é minimizar a perda sistemática de valor e reduzir as externalidades negativas, assegurando que os materiais se mantêm em circulação e que a extração de novos recursos é progressivamente reduzida.

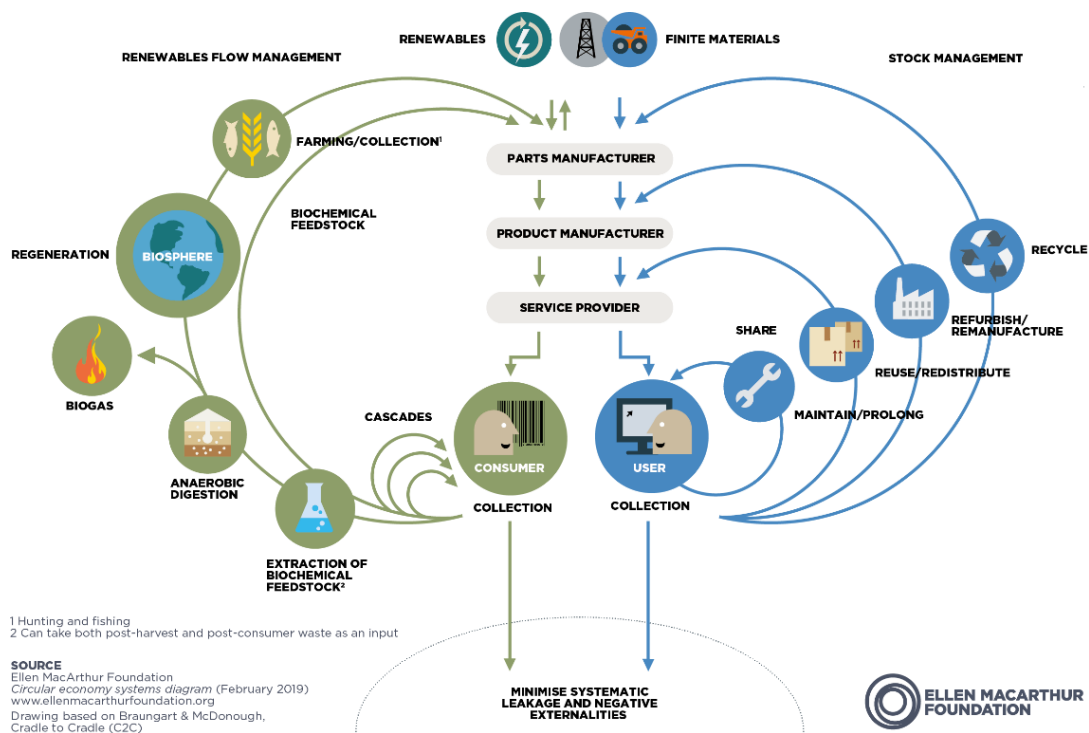


Figura 2.1 – Diagrama 'borboleta' da economia circular. Fonte: Ellen Macarthur Foundation (2019).

O diagrama 'borboleta' da Ellen MacArthur Foundation apresenta uma visão sistémica dos ciclos biológicos e técnicos, a qual pode ser complementada por instrumentos que hierarquizam as diferentes estratégias de circularidade. Entre estes, destaca-se o modelo conceptual dos 9 R's, proposto por Potting et al. (2017), que estabelece uma hierarquia de opções segundo o seu potencial de circularidade e impacte ambiental.

A hierarquia dos 9 R's (Figura 2.2) representa uma das estruturas atuais mais completas para compreender a profundidade e a eficácia de diferentes estratégias de circularidade. Este modelo organiza as opções de intervenção de acordo com o seu potencial de reduzir o consumo de recursos e os impactes ambientais, estabelecendo uma ordem de prioridade desde estratégias mais radicais, como Recusar (R0) e Repensar (R1), até soluções mais incrementais para a circularidade, como a Reciclagem (R8) ou a Recuperação energética (R9) (Potting et al., 2017)

Assim, ações situadas nos níveis superiores da hierarquia (R0–R2) têm maior capacidade de evitar a necessidade de produção de novos bens, por exemplo, através da recusa de consumo ou da conceção de produtos multifuncionais, reduzindo de forma significativa a extração de recursos e a geração de resíduos. Num nível intermédio encontram-se estratégias como Reutilizar (R3), Reparar (R4), Recondicionar (R5), Remanufactura (R6) e Reaproveitar (R7) que prolongam a vida útil dos produtos e componentes, assegurando a manutenção do valor durante mais tempo nos ciclos de utilização. Por fim, as opções situadas na base, embora contribuam para evitar a deposição em aterro, são consideradas menos eficazes, pois implicam a perda parcial do valor incorporado nos materiais e frequentemente requerem consumo energético adicional para os processos de transformação. Este enquadramento fornece, assim, um instrumento analítico para hierarquizar políticas e práticas empresariais e de consumo, permitindo avaliar até que ponto uma estratégia promove uma verdadeira circularidade ou apenas soluções de carácter mais próximo da lógica linear.

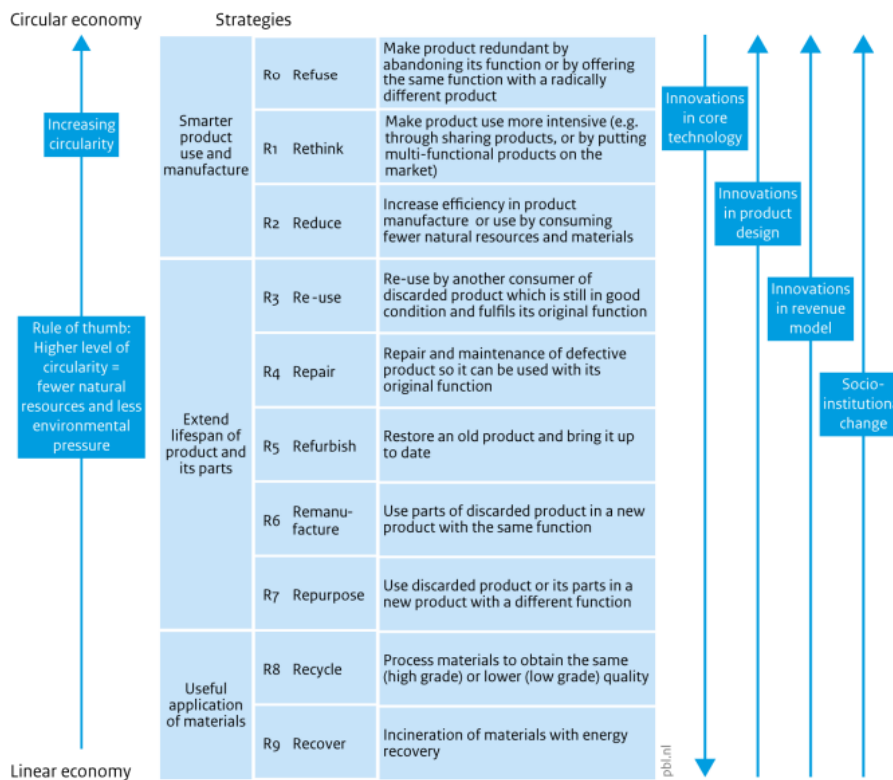


Figura 2.2 – Estratégias circulares R. Fonte: Potting et al. (2017).

Neste contexto, a literatura consultada permite questionar a maior atenção que tem vindo a ser dedicada a um conjunto restrito de estratégias de circularidade, com predominância para a reciclagem. Apesar da reutilização e a reparação também serem frequentemente mencionadas, outras estratégias da hierarquia dos 9 R's permanecem pouco exploradas (Hunger et al., 2024). Isto evidencia a necessidade de uma investigação mais abrangente, que permita avaliar de forma sistemática e sistémica todas as possibilidades de circularidade ao longo do ciclo de vida dos produtos elétricos e eletrónicos.

2.2 Desafios do setor dos equipamentos elétricos e eletrónicos

O setor dos Equipamentos Elétricos e Eletrónicos (EEE) é hoje um dos que mais contribui para a produção de resíduos a nível global (May & Steuer, 2025). A aceleração dos ciclos tecnológicos, aliada à redução do tempo de vida útil dos equipamentos, tem conduzido a uma produção crescente de Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrónicos (REEE). Este fluxo de resíduos é já considerado o de crescimento mais rápido no mundo (Shittu et al., 2021).

Na Figura 2.3 é possível observar que a quantidade de EEE colocada no mercado global cresceu de 62 mil milhões de kg em 2010 para 96 mil milhões de kg em 2022, com a previsão

que aumente para 120 mil milhões de kg em 2030. Ao mesmo tempo, a quantidade de REEE está prevista que atinga os 82 mil milhões de kg em 2030. Apesar do surgimento de novas tecnologias e de uma maior atenção a este problema, os REEE formalmente recolhidos são ofuscados pelo rápido crescimento da quantidade total de resíduos eletrónicos (Baldé et al., 2024).

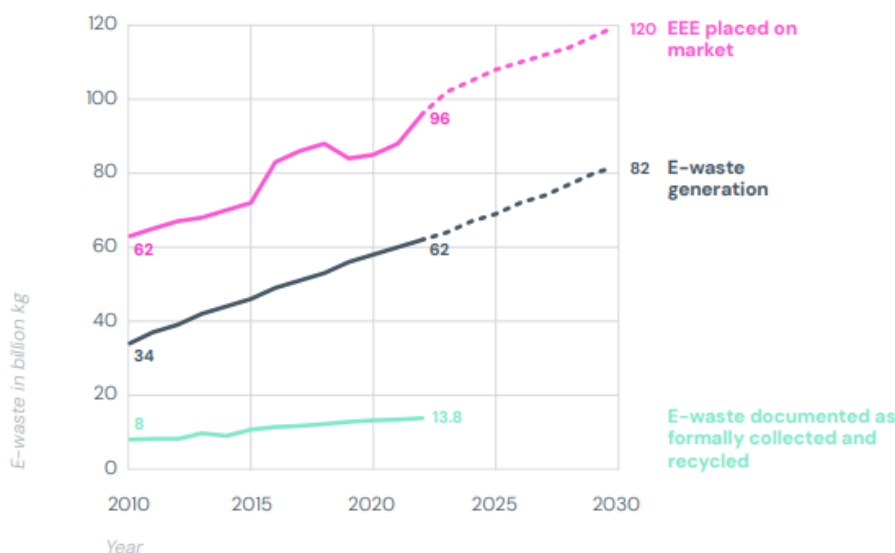


Figura 2.3 – Evolução global da colocação de EEE no mercado, da produção de REEE e da fração formalmente recolhida e reciclada (2010–2030). Fonte: Baldé et al. (2024).

Este fenómeno deve-se, não apenas ao aumento do consumo de eletrónicos, mas também à curta duração da sua utilização efetiva, ao armazenamento doméstico após desuso, e às baixas taxas de reparação e reutilização (Glöser-Chahoud et al., 2019). Estes resíduos, quando não tratados adequadamente, representam uma ameaça significativa ao ambiente e à saúde humana devido à presença de substâncias tóxicas como mercúrio e outros metais pesados (Shittu et al., 2021).

O impacto ambiental deste setor resulta, assim, não apenas da produção em si, mas da lógica linear que estrutura o seu funcionamento "*take–make–waste*" (Hunger et al., 2024). Grande parte deste problema está relacionado com o facto de os EEE serem concebidos de forma a ter uma vida útil limitada, seja por motivos técnicos ou por decisões estratégicas de design (Glöser-Chahoud et al., 2019).

A obsolescência programada e a obsolescência percebida são conceitos e mecanismos amplamente difundidos neste setor. A primeira refere-se à incorporação deliberada de fragilidades técnicas ou limitações de atualização que conduzem à avaria ou desatualização

do produto; enquanto a segunda decorre da percepção por parte do consumidor de que um produto está ultrapassado, mesmo que ainda funcione adequadamente (Indrawati et al., 2024).

A rápida evolução da tecnologia, aliada à pressão estética e à normatividade do consumo de novidade, acentua este processo. Além disso, a redução deliberada na reparabilidade dos dispositivos como a colagem de componentes, a não disponibilização de peças de substituição, ou a ausência de manuais técnicos constitui um entrave à extensão da vida útil dos produtos (Roskladka et al., 2025). Estas práticas resultam num volume crescente de equipamentos descartados prematuramente, enquanto dificultam estratégias de circularidade ((Ipaki & Hosseini, 2025).

Outro fator central que contribui para a linearidade do setor prende-se com a taxa de reaproveitamento efetiva dos dispositivos eletrónicos após a sua utilização (Yamamoto & Murakami, 2022). Apesar da existência de políticas públicas em vários países da União Europeia, a reparação e reutilização continuam a representar uma fatia reduzida do destino dos produtos eletrónicos (Svensson-Hoglund et al., 2023).

Além disso, uma percentagem relevante dos dispositivos que deixam de ser usados não é imediatamente descartada, mas permanece armazenada nas casas dos consumidores durante vários anos (Dhir et al., 2021). Este tempo em armazenamento é outro dos motivos que afeta a eficiência dos fluxos de recolha e reduz a eficácia dos sistemas de reciclagem e acondicionamento (Mihai et al., 2019). Acresce ainda que muitas das práticas de reutilização atuais não ocorrem no país de origem, mas em cadeias além-fronteiras pouco transparentes, o que dificulta o controlo de qualidade e o acompanhamento do destino final dos produtos reaproveitados (Shittu et al., 2021).

A investigação sobre a gestão deste setor tem revelado limitações significativas, nomeadamente pela ausência de uma abordagem integrada que considere simultaneamente fatores regulamentares, sociais, culturais e técnicos. A literatura permanece fragmentada, focando-se muitas vezes em aspetos isolados, sem produzir uma visão sistémica capaz de articular comportamentos de consumo, intervenções políticas e dinâmicas de mercado numa mesma análise (Newaz & Appolloni, 2024). Isto revela a necessidade de pensar o ciclo de vida dos produtos desde a conceção, promovendo o design para reparação, a modularidade e o acesso facilitado a componentes.

2.3 Enquadramento regulamentar do setor EEE

A problemática dos resíduos de equipamentos elétricos e eletrónicos tornou evidente a necessidade de um enquadramento regulamentar robusto que consiga englobar todo o ciclo de vida dos produtos, desde o design até à gestão do fim de vida (Patil & Ramakrishna, 2020). A legislação desempenha assim um papel fundamental na criação de incentivos e obrigações que promovam o eco design, a extensão da vida útil dos produtos e a redução dos impactos ambientais ao longo do ciclo de vida (Bressanelli et al., 2021). Além disso, constitui um motor de inovação, uma vez que evolui em paralelo com o aparecimento de novas tipologias de produtos e com a aceleração tecnológica (Shittu et al., 2021).

Apesar de cerca de dois terços da população mundial já estar abrangida por legislação sobre *e-waste*, a implementação prática permanece insuficiente (Mihai et al., 2019). Persistem lacunas significativas na recolha e reciclagem efetiva, bem como um grande volume de fluxos informais e ilegais que escapam aos sistemas oficiais (Shittu et al., 2021). Embora exista um conjunto vasto de propostas e recomendações, a investigação empírica sobre o impacto efetivo de medidas de política de economia circular na eficiência global dos sistemas continua insuficiente. Esta fragilidade teórica e prática compromete a compreensão de como os modelos de cadeia fechada contribuem para aumentar a circularidade no setor dos eletrónicos (Miao et al., 2017)

Com isto, é importante perceber a que níveis do ciclo de vida dos produtos as várias medidas atuam, uma vez que a legislação é essencial não apenas para estabelecer metas, mas também para garantir mecanismos de monitorização, responsabilização e fiscalização.

É neste contexto que surgem os principais instrumentos regulamentares que estruturam a política de circularidade no setor dos equipamentos elétricos e eletrónicos. Estas regulamentações, ao mesmo tempo complementares e interdependentes, estabelecem metas de recolha e tratamento, limitam o uso de substâncias perigosas, reforçam a segurança química, criam direitos de reparação e promovem requisitos de eco design. A sua análise permite compreender de que forma a União Europeia procura alinhar inovação tecnológica, sustentabilidade e competitividade industrial, bem como identificar lacunas e desafios de implementação que condicionam a efetiva transição para uma economia circular.

A Diretiva 2012/19/EU (Diretiva REEE) constitui a base da política europeia para enfrentar o fluxo crescente de resíduos de equipamentos elétricos e eletrónicos. Estabelece como objetivos a prevenção da produção de resíduos, a promoção da reutilização, reciclagem e

outras formas de valorização, bem como a melhoria do desempenho ambiental de todos os agentes envolvidos no ciclo de vida dos produtos (Diretiva 2012/19/UE do Parlamento Europeu e do Conselho, 2012). Assente no princípio da responsabilidade alargada do produtor (RAP), obriga os fabricantes a financiar e organizar a recolha seletiva e gestão dos equipamentos no final da sua vida útil. Para garantir resultados concretos, define metas obrigatórias de recolha, como 65% do peso médio dos equipamentos colocados no mercado nos três anos anteriores ou 85% dos REEE gerados, e impõe objetivos de valorização e reciclagem diferenciados por categorias. Além disso, proíbe a eliminação de resíduos recolhidos sem tratamento adequado, incentivando a preparação para reutilização e a segregação de substâncias perigosas (Diretiva 2012/19/UE do Parlamento Europeu e do Conselho, 2012).

Complementarmente, A Diretiva 2011/65/EU, *Restriction of Hazardous Substances* (RoHS) estabelece limites rigorosos para a presença de substâncias perigosas em equipamentos elétricos e eletrónicos, procurando reduzir os riscos ambientais e para a saúde humana associados ao seu uso e descarte (Diretiva 2011/65/UE, 2011). Restringe, por exemplo, a utilização de chumbo, mercúrio, crómio hexavalente e cádmio acima de concentrações específicas, reduzindo riscos ambientais e para a saúde humana, enquanto facilita os processos de reciclagem (Diretiva 2011/65/UE, 2011). Ao aplicar-se a uma ampla gama de categorias de produtos, reforça a ligação entre design seguro, inovação tecnológica e circularidade, embora preveja isenções em casos em que a substituição imediata não seja tecnicamente viável.

Mais recentemente, surge a Diretiva (UE) 2024/1799 (Direito à Reparação), concebida para reforçar a durabilidade dos produtos e tornar a reparação uma alternativa real ao descarte prematuro. Esta legislação obriga os fabricantes a assegurar a reparação de bens mesmo fora do período de garantia, bem como a disponibilizar peças sobresselentes, ferramentas e informações técnicas a reparadores independentes (Diretiva (UE) 2024/1799, 2024). Complementarmente, prevê a criação de uma plataforma europeia de reparação que facilitará a ligação entre consumidores, reparadores e iniciativas comunitárias, fomentando a confiança e o acesso a serviços de reparação. E ainda incentiva o consumidor a escolher a reparação através da extensão da garantia pós-reparação. Assim, esta diretiva constitui um passo decisivo para reduzir o desperdício e prolongar a vida útil dos equipamentos eletrónicos (Diretiva (UE) 2024/1799, 2024).

Já o *Clean Industrial Deal* apresenta-se como uma estratégia macroeconómica que articula competitividade industrial, descarbonização e circularidade (Comissão Europeia, 2025b). O documento reconhece a circularidade como pilar fundamental para maximizar os recursos limitados da União Europeia, reduzir dependências externas e reforçar a resiliência.

Propõe medidas como a adoção de um *Circular Economy Act* para harmonizar regras sobre resíduos, matérias-primas secundárias e produtos circulares, bem como critérios de sustentabilidade em contratos públicos e privados. Inclui ainda instrumentos como os *Trans-Regional Circularity Hubs*, destinados a promover a especialização regional, e o Green VAT, destinado aos produtos em segunda mão. Para o setor eletrónico, estas medidas significam condições estruturais que reforçam a coerência entre inovação, competitividade e sustentabilidade (Comissão Europeia, 2025b).

O Plano de Ação para a Economia Circular (PAEC), integrado no Pacto Ecológico Europeu, reforça esta visão ao propor uma estratégia para dissociar o crescimento económico da utilização de recursos e garantir a neutralidade climática até 2050 (Comissão Europeia, 2020). O plano defende um modelo de crescimento regenerativo, estabelecendo metas como duplicar a taxa de utilização de materiais circulares na próxima década. Para o setor eletrónico, prevê uma Iniciativa sobre Eletrónica Circular, que inclui medidas como a introdução de um carregador comum, a extensão do direito à reparação e atualização de software e a criação de sistemas de retoma para reforçar a recolha e o tratamento de REEE. Além disso, prevê a revisão da legislação sobre substâncias perigosas, garantindo coerência com o RoHS (Comissão Europeia, 2020).

Finalmente, o Regulamento (UE) 2024/1781, *Ecodesign for Sustainable Products Regulation* (ESPR), foi adotado em julho de 2024 e constitui um marco legislativo central na transição para uma economia circular. Considerada um pilar estratégico do *Clean Industrial Deal*, o ESPR tem o potencial de consolidar a posição da União Europeia como referência global em circularidade, reforçando a competitividade industrial e reduzindo a dependência de matérias-primas críticas (Comissão Europeia, 2025a).

Este regulamento substitui a antiga Diretiva 2009/125/CE relativa à conceção ecológica de produtos que utilizam energia, expandindo significativamente o seu âmbito de aplicação. Define requisitos ecológicos obrigatórios, que incluem durabilidade, reparabilidade, reciclabilidade e teor de materiais reciclados, enquanto introduz o Passaporte Digital do Produto (PDP), uma ferramenta fundamental para assegurar rastreabilidade ao longo da cadeia de valor e facilitar o acesso a informações sobre composição, reparação e reciclagem. A regulamentação incentiva também as entidades públicas a adotar critérios de sustentabilidade nas suas aquisições através de contratos públicos verdes, promovendo a compra de eletrónicos que cumpram os requisitos de eco design estabelecidos (Regulamento (UE) 2024/1781 do Parlamento Europeu e do Conselho, 2024).

2.4 Estratégias empresariais para a circularidade no setor dos EEE

As empresas do setor dos EEE têm vindo a adotar modelos de negócio circulares com o objetivo de prolongar a vida útil dos produtos e reduzir a pressão sobre os recursos naturais (Wan & Jiang, 2025). Estes modelos incluem estratégias como o acondicionamento e a revenda de dispositivos, sistemas de leasing e programas de devolução (*trade-in*), sendo todos sustentados por processos de logística reversa que permitem a recuperação de valor a partir de produtos em fim de vida (Ellen MacArthur Foundation, 2018). Estes modelos baseiam-se na retenção do valor económico contido nos produtos e componentes, evitando ao máximo a extração de novos recursos, o que os torna fundamentais para a transição para uma economia circular no setor dos eletrónicos (Shahidzadeh & Shokouhyar, 2023). Os fabricantes que mantêm a propriedade dos produtos conseguem também obter taxas mais elevadas de recuperação e reutilização, especialmente em equipamentos como modems, laptops e smartphones (Ellen MacArthur Foundation, 2018).

O acondicionamento e a revenda de dispositivos usados são estratégias centrais para muitas empresas no setor, que visam capturar valor após o uso primário do produto. Empresas como a Lexmark e a Samsung já implementam com sucesso programas que recolhem, inspecionam e acondicionam produtos para venda em mercados secundários, enquanto outras exploram o valor crescente associado ao acondicionamento técnico e estético de produtos como smartphones e portáteis (Ellen MacArthur Foundation, 2018).

A evolução tecnológica tem contribuído para melhorar o desempenho dos dispositivos acondicionados, o que aumenta o seu valor residual e torna o modelo mais viável economicamente (Ellen MacArthur Foundation, 2018). Além disso, alguns consumidores já demonstram uma crescente abertura a este tipo de produtos, especialmente quando comercializados com garantia e em pontos de venda confiáveis, o que contribui para alterar a perceção negativa ainda associada a artigos de segunda mão Baldassarre et al., 2022.

O *leasing* é um dos modelos que tem ganho atenção como alternativa à compra tradicional, permitindo aos consumidores aceder a produtos eletrónicos mediante pagamento pela sua utilização. Esta abordagem reduz o desperdício e motiva os fabricantes a conceber produtos mais duráveis e de fácil manutenção, já que continuam a deter a responsabilidade pelo equipamento durante o seu ciclo de vida (Bressanelli et al., 2021; Tasaki et al., 2006). Apesar disso, a adesão generalizada a este modelo de negócio ainda é limitada, especialmente em mercados onde os produtos eletrónicos são relativamente baratos, o que reduz o incentivo económico para alugar em vez de comprar o equipamento (Stevens, 2023).

Programas de devolução e *trade-in* também têm vindo a tornar-se práticas comuns para garantir o retorno de produtos ao ciclo produtivo e facilitar operações de remanufatura e reciclagem (Ellen MacArthur Foundation, 2018). Estes programas tem o objetivo de recolher produtos usados ou produtos que chegaram ao fim da sua vida útil e reintroduzi-los no ciclo original de processamento e fabrico. Normalmente, estas iniciativas são acompanhadas por incentivos financeiros que visam aumentar a taxa de participação dos consumidores, enquanto reforçam a fidelização à marca (Corsini et al., 2020). A quantidade e a qualidade dos produtos devolvidos influenciam diretamente a decisão das empresas entre remanufatura ou reciclagem, com impacto na viabilidade económica do processo (Shahidzadeh & Shokouhyar, 2023) A eficácia destes sistemas depende, no entanto, da existência de parcerias ao longo da cadeia de valor, bem como de infraestruturas de logística reversa adaptadas à natureza dos EEE (Bressanelli et al., 2021).

2.5 Barreiras e oportunidades à circularidade no setor dos EEE

Com base na análise da literatura, é possível identificar um conjunto de barreiras e oportunidades que condicionam a adoção de estratégias de circularidade no setor dos EEE. Estas barreiras estão associadas a diferentes dimensões, que vão desde fatores estruturais, como a ausência de normas técnicas harmonizadas ou os elevados custos de reparação, até questões comportamentais e psicológicas ligadas ao consumidor. Em contrapartida, emergem também oportunidades que podem acelerar a transição, destacando-se o papel das políticas públicas, a digitalização, os modelos de negócio circulares e a crescente consciencialização ambiental dos consumidores.

A Tabela 2.1 sintetiza as barreiras e oportunidades identificadas por diversos autores, organizando-as por categorias analíticas que facilitam a sua compreensão e comparação.

Tabela 2.1 – Síntese das principais barreiras e oportunidades identificadas na literatura.

Categoria	Barreiras	Oportunidades
Instrumentos e políticas	<ul style="list-style-type: none"> - Falta de instrumentos de apoio para identificar potencial de circularidade (Bressanelli et al., 2021). - Ausência de normas técnicas harmonizadas e padrões internacionais (Rizos & Bryhn, 2022). - Divergência regulamentar entre países e requisitos legais contraditórios (Baldassarre et al., 2022). - Ausência de políticas públicas que limitem práticas de obsolescência (Malinauskaite & Erdem, 2021). 	<ul style="list-style-type: none"> - Regulamentações claras e critérios de ecodesign mais robustos (Rizos & Bryhn, 2022). - Inclusão de requisitos de circularidade em concursos públicos (Rizos & Bryhn, 2022). - Políticas de incentivo como garantias alargadas, subsídios públicos e eco-modulação (Da Silva et al., 2024; McGloin et al., 2024).
Custos e recursos	<ul style="list-style-type: none"> - Custos elevados de reparação e de logística reversa (Stevens, 2023). - Investimentos significativos em rastreabilidade e tecnologias de suporte, inacessíveis a pequenas empresas (Rizos & Bryhn, 2022). 	<ul style="list-style-type: none"> - Incentivos económicos que reduzem percepções de risco e custos iniciais (Newaz & Appolloni, 2024). - Subsídios e programas de apoio a empresas para adoção de práticas circulares (Rizos & Bryhn, 2022).
Consumidor	<ul style="list-style-type: none"> - Baixa aceitação de produtos reconicionados e exigência de preços muito reduzidos (Rizos & Bryhn, 2022; Svensson-Hoglund et al., 2021). - Percepções negativas quanto à qualidade, fiabilidade e durabilidade (Newaz & Appolloni, 2024; Svensson-Hoglund et al., 2021). - Escassez de conhecimento sobre reparação e falta de literacia ambiental/tecnológica (Corsini et al., 2020). - Barreiras emocionais e psicológicas (identidade social, aversão ao risco, hábitos de consumo) (Cox et al., 2013; Yamamoto & Murakami, 2022). - Pressões de marketing e inovação que reforçam ciclos de substituição rápida (Indrawati et al., 2024). 	<ul style="list-style-type: none"> - Incentivos como garantias estendidas e programas de sensibilização (Da Silva et al., 2024; McGloin et al., 2024; Rizos & Bryhn, 2022). - Rotulagem de sustentabilidade (conteúdo reciclado, pegada de carbono) (Da Silva et al., 2024). - Maior consciencialização ambiental em determinados grupos de consumidores (McGloin et al., 2024).
Cadeia de valor e operações	<ul style="list-style-type: none"> - Limitações de escala e financiamento em PME (Stevens, 2023). - Falta de coordenação transnacional em cadeias de recolha e reutilização (Rizos & Bryhn, 2022). 	<ul style="list-style-type: none"> - Redes colaborativas e plataformas de partilha de informação (Rizos & Bryhn, 2022).
Tecnologia e inovação	<ul style="list-style-type: none"> - Adoção de tecnologias digitais implica custos elevados e barreiras de entrada (Bressanelli et al., 2021). 	<ul style="list-style-type: none"> - Digitalização (big data, cloud computing) permite rastreabilidade, manutenção preditiva e otimização de fluxos (Bressanelli et al., 2021). - Design modular e fornecimento de peças como oportunidades de prolongamento de vida útil (Da Silva et al., 2024).

Verifica-se que as empresas continuam a enfrentar dificuldades na implementação de estratégias de economia circular. Em particular, nota-se a falta de instrumentos de apoio que permitam identificar o potencial da circularidade, bem como desenvolver planos concretos para a sua adoção, revelando a distância entre objetivos políticos e práticas industriais (Bressanelli et al., 2021).

Outra das barreiras para adoção de estratégias circulares são os custos de reparação e de logística reversa. Estes custos representam entraves financeiros relevantes, especialmente para pequenas e médias empresas (PME) que enfrentam maiores limitações de acesso a financiamento e escala operacional (Stevels, 2023). Em países com mão-de-obra técnica dispendiosa, o custo de reparação pode até ultrapassar o preço de compra de um novo equipamento, o que desincentiva práticas circulares por parte dos consumidores e dos retalhistas (Stevels, 2023).

Adicionalmente, a implementação de sistemas de rastreabilidade e a integração de tecnologias para suporte à circularidade implicam investimentos significativos, frequentemente inacessíveis para operadores de menor dimensão (Rizos & Bryhn, 2022).

A ausência de normas técnicas harmonizadas nos processos de reparação, reutilização e reciclagem também constitui uma barreira estrutural à expansão dos modelos circulares no setor dos EEE (Rizos & Bryhn, 2022). A diversidade de exigências regulamentares entre países e a inexistência de padrões internacionais claros dificultam a circulação de componentes e equipamentos reconicionados em mercados globais (Baldassarre et al., 2022). Empresas têm reportado dificuldades relacionadas com requisitos legais contraditórios, designações incoerentes de resíduos perigosos e exigências administrativas excessivas para transporte entre países da UE, o que limita significativamente a eficiência das operações circulares transnacionais (Rizos & Bryhn, 2022).

A aceitação dos consumidores é uma das barreiras mais persistentes à adoção de estratégias circulares, especialmente no que diz respeito a produtos reconicionados (Rizos & Bryhn, 2022). Muitos consumidores continuam a ter uma expectativa generalizada de que os produtos reconicionados devem ter preços significativamente mais baixos, o que pressiona as empresas que operam nesse segmento. Estes fatores refletem uma mentalidade de consumo enraizada que favorece a compra de produtos novos, mesmo quando os usados ainda estão funcionalmente operacionais (Baldassarre et al., 2022; Rizos & Bryhn, 2022).

A perceção do consumidor em relação a produtos circulares continua a ser marcada por dúvidas quanto à sua qualidade, fiabilidade e valor percebido, o que compromete

significativamente a sua adoção no mercado. Embora existam consumidores dispostos a considerar produtos reconicionados, a maioria mantém receios sobre o desempenho e a durabilidade, que afetam a sua disposição para comprá-los (Newaz & Appolloni, 2024). A ausência de normas padronizadas e de certificações confiáveis para produtos circulares contribui para esta percepção negativa, levando muitos consumidores a desconfiar da segurança e eficácia desses produtos (May & Steuer, 2025).

As barreiras emocionais e psicológicas associadas à circularidade decorrem de fatores como identidade social, aversão ao risco e apego a hábitos de consumo convencionais. Vários estudos identificam uma lacuna entre atitudes pró-ambientais declaradas e comportamentos efetivos, frequentemente atribuída à percepção de esforço necessário ou à falta de conveniência associada a práticas circulares (Corsini et al., 2020).

A resistência emocional ao uso prolongado de EEE é intensificada pela constante exposição a mensagens de marketing que associam inovação e atualidade tecnológica ao prestígio social, criando pressões para substituição antecipada mesmo quando o produto está funcional (Indrawati et al., 2024). Para além disso, o valor simbólico associado à posse de tecnologia de ponta alimenta decisões de consumo pouco sustentáveis, refletindo-se no desejo de atualização constante e no descarte prematuro (Cox et al., 2013). Por outro lado, consumidores que demonstram uma maior compreensão das alterações climáticas e do seu impacto, são mais prováveis a participarem numa sociedade de consumo mais sustentável (McGloin et al., 2024).

A influência de tendências de mercado, publicidade e ciclos rápidos de inovação reforça a percepção de que manter um dispositivo antigo é tecnicamente arriscado ou socialmente ultrapassado. Além disso, fatores psicológicos como o desejo de experimentar novas funcionalidades ou o medo de perder compatibilidade com novas aplicações contribuem para reduzir a duração de uso efetiva (Yamamoto & Murakami, 2022).

Paralelamente, na literatura é destacada que a ausência de políticas públicas que limitem práticas de obsolescência e incentivem o prolongamento da vida útil dos produtos cria um ambiente permissivo ao descarte (Malinauskaite & Erdem, 2021). A soma destes fatores resulta em decisões de substituição que, do ponto de vista ambiental, são frequentemente injustificadas.

A escassez de conhecimento sobre o tema e a dificuldade de acesso a serviços de reparação são barreiras críticas à adoção de práticas circulares por parte dos consumidores. Estudos apontam que muitos consumidores desconhecem onde reparar os seus dispositivos ou assumem à partida que o custo será proibitivo (Svensson-Hoglund et al., 2021), e que, por

outro lado, o *greenwashing*, os preços elevados, a falta de informação e a deficiência do produto secundário atuam como obstáculos à tentativa de reparar (Newaz & Appolloni, 2024). Em particular, consumidores com níveis baixos de literacia ambiental e tecnológica sentem-se desencorajados por não compreenderem os processos ou por desconfiarem da eficácia da intervenção (Puzzo & Prati, 2024). Para colmatar este défice, são necessárias campanhas e programas de sensibilização (Rizos & Bryhn, 2022).

Existem diversas oportunidades que podem ser exploradas para ajudar à adoção de estratégias circulares. Por exemplo, os mecanismos de incentivo, como garantias estendidas e subsídios públicos, têm demonstrado potencial para alterar comportamentos de consumo e prolongar a vida útil dos produtos (Da Silva et al., 2024; McGloin et al., 2024). Estas medidas podem reduzir a perceção de risco associada à adoção de novos modelos de negócio e facilitar a criação de redes colaborativas entre empresas (Rizos & Bryhn, 2022). A disponibilização de incentivos económicos cria um ambiente propício à adoção de práticas circulares (Newaz & Appolloni, 2024).

A circularidade na conceção e rotulagem também pode melhorar o desempenho ambiental dos produtos e fornecer aos consumidores informações sobre a sustentabilidade, como o seu conteúdo reciclado ou a sua pegada de carbono. Estes mecanismos são particularmente eficazes quando integrados em políticas públicas que responsabilizam também os fabricantes, exigindo um design modular e o fornecimento contínuo de peças (Da Silva et al., 2024).

Outra oportunidade-chave é a digitalização, na medida em que tecnologias e ferramentas como *big data* e *cloud computing* permitem monitorizar o desempenho dos equipamentos, otimizar fluxos de materiais e implementar estratégias de manutenção preditiva. Estas soluções digitais não aumentam apenas a eficiência operacional, como também contribuem para prolongar a vida útil dos equipamentos e para reduzir o desperdício (Bressanelli et al., 2021).

Por fim, destaca-se o papel das políticas públicas como catalisadores de oportunidades. Regulamentações mais claras, critérios robustos de ecodesign e a inclusão de requisitos de circularidade em concursos públicos têm sido identificados como instrumentos capazes de acelerar a implementação de práticas circulares no setor (Rizos & Bryhn, 2022). Assim a atuação simultânea sobre consumidores, empresas e políticas públicas é essencial para criar um sistema favorável à circularidade.

2.6 Ferramentas de análise sistêmica no estudo de políticas e estratégias de circularidade

Os desafios do setor dos EEE têm motivado a procura de metodologias capazes de captar as relações causais e ciclos de retroação que marcam o comportamento deste tipo de sistemas complexos. As abordagens de pensamento sistêmico e modelação em Dinâmica de Sistemas (DS) têm sido exploradas como ferramentas para apoiar a representação das interações entre produção, consumo, políticas e fluxos de materiais e resíduos, através de estruturas de stocks e fluxos, identificando padrões de comportamento de longo prazo que dificilmente são visíveis em análises lineares (Georgiadis & Besiou, 2008; Guzzo et al., 2022a).

O pensamento sistêmico constitui uma abordagem analítica que procura compreender os fenómenos a partir das inter-relações e dos padrões de retroação que moldam o comportamento de um sistema ao longo do tempo. A dinâmica de sistemas é uma vertente do pensamento sistêmico que utiliza o conceito de variáveis de estado, fluxos e retroalimentações para representar a estrutura subjacente e explicar o comportamento dinâmico dos sistemas complexos. Esta metodologia tem como objetivo explorar como a estrutura de um sistema influencia a sua evolução temporal, recorrendo a ferramentas de análise que integram tanto abordagens qualitativas como quantitativas (Lane, 2008).

No domínio qualitativo, os diagramas causais são ferramentas utilizadas para conceptualizar e comunicar as relações causa-efeito entre variáveis, permitindo identificar ciclos de reforço e de equilíbrio; já no domínio quantitativo, os modelos de simulação baseados em equações diferenciais possibilitam testar de forma rigorosa as consequências comportamentais dessas relações, revelando os efeitos não lineares que emergem da interação entre múltiplos ciclos de retroação (Lane, 2008). Assim, o pensamento sistêmico e a dinâmica de sistemas oferecem um quadro integrador que combina a representação conceptual com a simulação computacional, promovendo a aprendizagem sobre a estrutura e o comportamento de sistemas socioeconómicos e ambientais complexos.

Uma das principais vantagens da aplicação da DS é a sua capacidade para lidar com problemas de complexidade dinâmica e de resistência a políticas (Forrester, 2016). A DS consegue explicar como as respostas de um sistema podem divergir das intenções iniciais das políticas, revelando efeitos contraintuitivos e desfasados no tempo (Georgiadis & Besiou, 2008). A utilidade desta abordagem na área da produção e consumo sustentáveis também tem sido reforçada com a sua aplicação a estudos sobre cadeias de abastecimento e processos de

reciclagem, mostrando que a inclusão de diferentes modos de recolha permite testar cenários que não seriam captados por abordagens tradicionais (Miao et al., 2017).

A literatura demonstra consenso em torno da necessidade de uma visão sistémica para compreender os impactos das políticas e estratégias de circularidade. Estudos chamam a atenção para o papel do setor informal, determinante para o funcionamento dos sistemas de gestão de REEE. Indicando que ao integrar estas atividades informais em modelos dinâmicos se torna possível perceber não só as falhas dos sistemas formais, mas também as oportunidades de maior sustentabilidade através da sua articulação (Ardi & Leisten, 2016).

Outro contributo importante é a capacidade das ferramentas de pensamento sistémico e de modelação dinâmica permitirem captar num modelo ciclos de retroação ligados à produção de EEE e a comportamentos dos consumidores. Um exemplo disso é o fenómeno da hibernação de produtos eletrónicos, em que equipamentos funcionais permanecem armazenados nas casas durante longos períodos. Este comportamento, invisível em modelos lineares, reduz o impacto de medidas de extensão de vida útil. A simulação de diferentes cenários de uso e armazenamento permitiu demonstrar em estudos recentes que utilizaram ferramentas de DS que tais dinâmicas comprometem a eficácia de estratégias de reparação e reutilização (Glöser-Chahoud et al., 2019).

Ao mesmo tempo, a DS tem sido utilizada para avaliar políticas nacionais e industriais de economia circular. O estudo de Guzzo et al. (2022b), mostra que a modelação dinâmica possibilita simular acordos setoriais e regulamentares, permitindo observar não apenas os fluxos de materiais, mas também os efeitos no cumprimento de metas legais e na competitividade industrial. Este resultado aproxima-se de outros estudos, que defendem a DS como ferramenta para estruturar políticas de participação pública e explorar *trade-offs* entre objetivos económicos e ambientais (Georgiadis & Besiou, 2008).

As ferramentas de DS são também particularmente úteis para analisar desfasamentos temporais na implementação de regulamentos. Atrasos na conformidade legislativa ou na adoção de inovações de design podem reduzir substancialmente o impacto esperado das políticas. Ao introduzir estas variáveis nos modelos, torna-se evidente que resultados ambientais ou económicos podem demorar vários anos a materializar-se, mesmo após a introdução de medidas regulamentares (Georgiadis & Besiou, 2008).

Esta abordagem também tem sido relevante na comparação entre diferentes processos de reciclagem. Miao et al. (2017) testaram cadeias dominadas por fabricantes, retalhistas ou terceiros, mostrando que a eficiência varia significativamente consoante o ator principal do

processo. Esta abordagem permite às autoridades avaliar qual o modelo mais eficaz em termos de custos, taxas de recolha e impactos ambientais, reforçando a utilidade da DS para apoiar decisões políticas baseadas em evidência.

Um ponto de convergência entre os vários autores é a ideia de que a DS não substitui, mas complementa outras metodologias quantitativas, tais como a Análise de Ciclo de Vida (ACV). Enquanto a ACV permite medir impactos, a modelação em DS mostra como esses impactos emergem de relações causais e de comportamentos coletivos. Assim, a literatura sugere que os dois métodos são complementares para apoiar a definição e análise de políticas e estratégias de circularidade robustas (Georgiadis & Besiou, 2008).

Os modelos dinâmicos permitem observar não apenas resultados imediatos, mas também consequências futuras e cumulativas. Georgiadis e Besiou (2008) destacam que políticas de reciclagem podem ter efeitos indiretos sobre a procura de matérias-primas virgens, influenciando preços de mercado e competitividade. Sem um modelo dinâmico, estas interações tenderiam a passar despercebidas, comprometendo a eficácia de políticas públicas.

Em termos metodológicos, uma das principais vantagens da DS é tornar visíveis ciclos de retroação que de outra forma permaneceriam ocultos. Isto é particularmente relevante para os EEE, onde a interação entre inovação tecnológica, padrões de consumo e regulamentação cria ciclos que podem reforçar ou enfraquecer objetivos de circularidade (Ardi & Leisten, 2016).

Neste contexto, a utilização de diagramas causais tem vindo a ganhar destaque como instrumento de análise qualitativa, complementar às simulações quantitativas, permitindo representar graficamente as relações de causa-efeito e os ciclos de retroação que caracterizam sistemas complexos. No estudo de Bassi et al. (2021), a utilização de diagramas causais possibilitou mapear dinâmicas locais da economia circular a partir de seis casos de estudo europeus, permitindo identificar ciclos de retroação positiva associados à inovação e ao comportamento dos consumidores, bem como ciclos de retroação negativa ligados a desafios institucionais e de governança. Este tipo de modelação qualitativa revelou-se eficaz para traduzir dados heterogéneos e percepções de diferentes atores em estruturas causais coerentes, contribuindo para a formulação de estratégias mais adaptadas aos contextos territoriais (Bassi et al., 2021).

De forma semelhante, Hettiarachchi et al. (2022) demonstram que os diagramas causais podem ser aplicados para analisar ligações entre tecnologias emergentes, como a manufatura aditiva, e estratégias de circularidade, destacando as contingências e os mecanismos de retroação que condicionam os resultados esperados. Assim, a análise qualitativa com base em diagramas causais constitui uma ferramenta poderosa para explorar cenários de política,

inovação e comportamento organizacional em sistemas onde predominam múltiplos ciclos de retroação (Hettiarachchi et al., 2022).

Entre os diferentes tipos de diagramas causais, destacam-se os arquétipos sistêmicos (*system archetypes*), que são estruturas genéricas e recorrentes que permitem compreender como determinados padrões de comportamento emergem de ciclos de retroação subjacentes (Branz et al., 2021). Os arquétipos traduzem de forma visual a lógica interna dos sistemas e tornam explícitas as conexões entre as suas variáveis principais. O seu principal contributo consiste em revelar as semelhanças estruturais entre sistemas aparentemente distintos, mostrando que muitos problemas organizacionais, sociais ou ambientais partilham dinâmicas semelhantes que se repetem ao longo do tempo (Kim & Anderson, 1998). Esta abordagem tem as suas origens nos trabalhos de Jay Forrester, Donella Meadows e Peter Senge, que identificaram nos anos 1960-1980 certas estruturas repetitivas que explicavam fenómenos de crescimento, colapso, competição e resistência a políticas (Kim & Anderson, 1998).

A literatura descreve diversos arquétipos centrais amplamente reconhecidos, cada um associado a um padrão de comportamento específico. O arquétipo "*Limits to Growth*" representa situações em que um processo de crescimento é eventualmente travado por restrições internas do sistema; "*Tragedy of the Commons*" descreve a sobreexploração de um recurso comum motivada pelo interesse individual; "*Fixes that Fail*" ilustra a implementação de soluções rápidas que geram efeitos colaterais negativos a longo prazo; "*Shifting the Burden*" evidencia a tendência de resolver sintomas em vez das causas estruturais; e "*Success to the Successful*" mostra como pequenas vantagens iniciais podem conduzir a desigualdades cumulativas (Branz et al., 2021).

Estes modelos genéricos permitem antecipar comportamentos recorrentes, compreender resistências a políticas e apoiar a conceção de intervenções mais eficazes e sustentáveis (Branz et al., 2021). O seu valor reside, assim, em proporcionar uma linguagem comum para interpretar problemas complexos e em servir de base para o desenvolvimento de diagramas causais específicos a cada contexto.

Com isto, a literatura analisada converge em destacar que a dinâmica de sistemas é uma ferramenta central para compreender e projetar políticas eficazes de circularidade no setor dos EEE. A sua capacidade de integrar fatores sociais, técnicos, económicos e ambientais num quadro único permite identificar barreiras e oportunidades de forma mais completa do que metodologias isoladas. Ao mesmo tempo, oferece um espaço participativo de diálogo entre

stakeholders, fortalecendo a legitimidade e a eficácia das soluções propostas (Ardi & Leisten, 2016).

METODOLOGIA

3.1 Abordagem metodológica geral

A metodologia adotada neste trabalho procura responder a lacunas identificadas na revisão de literatura. Como foi observado, os estudos sobre circularidade no setor dos EEE revelam de forma ténue as ligações entre políticas, práticas produtivas, comportamentos de consumo e estratégias de gestão de resíduos (Bressanelli et al., 2021; Newaz & Appolloni, 2024; Miao et al., 2017). Para ultrapassar estas limitações, serão desenvolvidas propostas de arquétipos sistémicos que permitam mapear relações causais de forma holística e relacioná-las com diferentes estratégias de circularidade.

O primeiro passo metodológico baseou-se na proposta de Kim e Andersen (2012), que apresentam um guia para a codificação de mapas causais a partir de dados textuais. Esta abordagem permitirá identificar, organizar e representar graficamente relações de causa e efeito descritas nos documentos analisados, assegurando uma maior clareza e consistência na construção de modelos qualitativos.

Em complemento, será utilizado o modelo dos 9 R's de Potting et al. (2017), que define uma hierarquia de estratégias de circularidade. Este enquadramento permitirá classificar as medidas e relações causais identificadas, oferecendo uma visão estruturada sobre os níveis de circularidade em que cada intervenção se insere.

Para validar e enriquecer os resultados obtidos a partir da análise documental, foi ainda realizada uma consulta a um conjunto de atores-chave. Neste âmbito, foram realizadas entrevistas com *stakeholders* relevantes do setor dos EEE, de modo a validar os diagramas causais preliminares com conhecimento prático e perceções das partes interessadas. Este processo permitiu apoiar a validação dos resultados e a sua relevância para a realidade do

setor, ao incorporar as perspectivas de atores diretamente envolvidos na produção, consumo e gestão de EEE.

Em conjunto, estas três abordagens - análise sistemática de documentos para construção de diagramas causais, enquadramento conceptual dos 9 R's e recolha de perceções dos *stakeholders* – estruturaram a abordagem metodológica da dissertação, de modo a produzir resultados consistentes e aplicáveis, contribuindo para apoiar a compreensão das dinâmicas de circularidade no setor.

No diagrama de fluxos da Figura 3.1, encontram-se ilustrados os principais passos da abordagem metodológica geral adotada no trabalho.

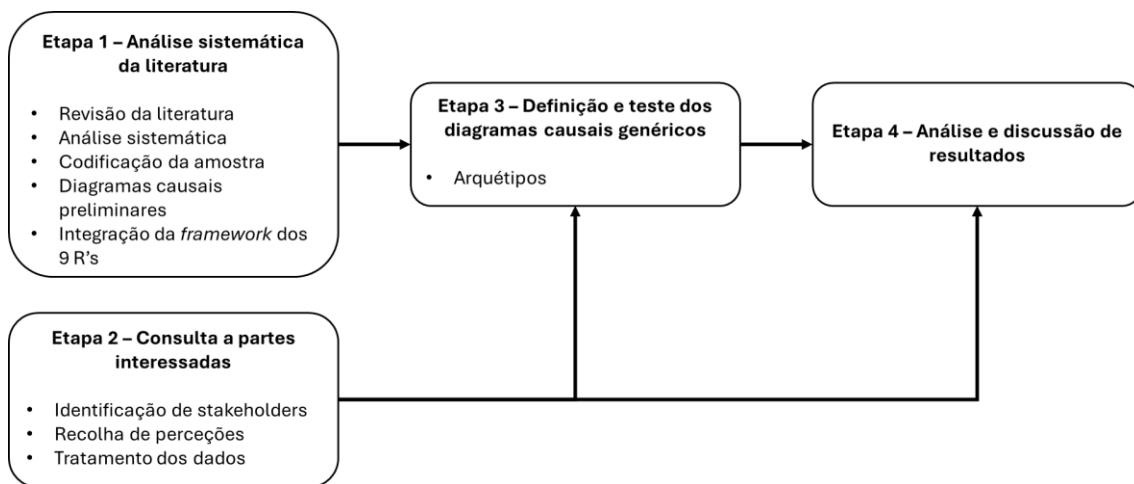


Figura 3.1 – Fluxograma do processo metodológico desenvolvido na dissertação.

3.2 Análise sistemática da literatura

3.2.1 Fontes de dados

Os dados utilizados nesta investigação provêm de documentos científicos e de política diretamente relacionados com a economia circular e o setor dos equipamentos elétricos e eletrónicos. Foram incluídos artigos académicos obtidos através do Google Scholar e relatórios institucionais.

Foi realizada uma procura no título, resumo e palavras-chave dos artigos pelas palavras "circular economy" AND "electrical and electronic equipment" AND "waste electrical and electronic equipment" AND "system dynamics". A seleção destas fontes justifica-se pela sua

relevância para a compreensão dos desafios e oportunidades da circularidade, pela atualidade das contribuições e pelo vínculo direto ao setor em análise e abordagem adotada.

3.2.2 Análise sistemática

O estudo assume natureza qualitativa e exploratória, apoiando-se em técnicas de modelação sistémica. Esta abordagem permite captar a complexidade das interações entre produção, consumo, impactos ambientais, regulamentação e estratégias circulares, algo que dificilmente seria compreendido apenas por métodos descritivos. O recurso à análise sistemática possibilita organizar de forma coerente a literatura e extrair relações causais que sustentam a construção dos diagramas (Georgiadis & Besiou, 2008). Sendo os sistemas em estudo dinâmicos, com várias interações de causa e efeito, torna necessário recorrer a ferramentas capazes de analisar a sua evolução ao longo do tempo.

Esta abordagem sistémica é considerada essencial para identificar o ponto de intervenção das estratégias de circularidade ao longo do ciclo de vida e avaliar o papel das políticas em todo o sistema.

A análise sistemática incluiu 43 documentos que seguiram para a fase seguinte da metodologia.

3.2.3 Codificação da amostra de artigos

A codificação da amostra de artigos desempenha um papel estruturante na metodologia adotada, pois permite transformar informação qualitativa que se encontra dispersa em representações simbólicas de relações causa-efeito entre elementos (variáveis) do sistema em análise. Esta etapa é particularmente relevante em estudos que se apoiam na análise de textos, onde os argumentos são apresentados de forma narrativa e não quantificada.

A literatura sublinha que a codificação constitui a ligação crítica entre a recolha de dados e a explicação dos seus significados, funcionando como a ponte entre descrição e teoria (Mohajan & Mohajan, 2022). Trata-se, assim, de um processo que ultrapassa a simples organização da informação: codificar implica interpretar, reduzir a complexidade textual e destacar conceitos-chave que sustentam a construção de modelos causais.

O processo de leitura e codificação realizado nesta investigação foi conduzido de forma iterativa e sistemática. Cada artigo foi analisado integralmente para garantir a compreensão do seu contexto, seguindo-se uma segmentação linha a linha ou parágrafo a parágrafo. Em cada excerto, identificaram-se ideias centrais que foram anotadas sob a forma de códigos

descritivos ou interpretativos. A literatura metodológica reforça que os códigos funcionam como rótulos analíticos que resumem e capturam a essência de um fenômeno, permitindo reduzir passagens extensas de texto a unidades de significado concisas (Mohajan & Mohajan, 2022).

Sempre que possível, foram utilizados termos retirados diretamente dos textos analisados, de modo a preservar a linguagem e a intenção original dos autores. Esta prática favorece a fidelidade ao material empírico e assegura que a interpretação não se distancia em excesso da formulação inicial das fontes.

A aplicação da metodologia de Kim & Andersen (2012) foi fundamental para orientar a extração de relações causais de forma transparente e replicável. Esta abordagem assenta em diferentes rondas de codificação que permitem estruturar progressivamente o material qualitativo em diagramas causais.

O primeiro passo corresponde ao *open coding*, no qual os textos são fragmentados em segmentos menores e cada relação identificada é rotulada de forma preliminar. Este procedimento tem como objetivos delimitar o problema, estabelecer as fronteiras do sistema e identificar os argumentos causais relevantes. Numa segunda fase, recorre-se ao *axial coding*, que reorganiza os códigos iniciais, estabelecendo relações entre categorias e agrupando variáveis que partilham significados semelhantes. Por fim, o *selective coding* integra as categorias mais relevantes em torno de variáveis nucleares, permitindo consolidar estruturas causais generalizadas (Mohajan & Mohajan, 2022; Kim & Andersen, 2012).

A seguinte exemplificação passo a passo do processo de codificação evidencia o funcionamento do método. Primeiramente, os artigos são decompostos em excertos curtos, cada um representando um argumento sobre o estado do sistema ou sobre a relação entre variáveis. A cada argumento são associados códigos e notas explicativas, registados em quadros de codificação. Nestes quadros constam a variável em causa, o comportamento observado, o efeito esperado e o tipo de relação (positiva ou negativa) (Kim & Andersen, 2012). Utilizando um exemplo de um artigo:

“In the last 20 years, with technological advances, industries have moved towards greater automation, which has increased the use of electrical and electronic equipment. At the same time, electrical and electronic products have become commonplace in the daily life of an average consumer. The development of advanced, faster, and more reliable processing and processing technologies has led to a reduction in the product life cycle, prompting

consumers to purchase increasingly current products in terms of technology and performance, sending obsolete products for disposal. All these developments have in turn led to an exponential increase in the generation of electronic waste." (Corsini et al., 2020, página 1, parágrafo 2).

A leitura deste excerto permitiu identificar múltiplos argumentos causais que se relacionam diretamente com as variáveis representadas no diagrama causal do sistema "*take-make-waste*". Em primeiro lugar, a redução do ciclo de vida útil dos equipamentos, resultante do sistema linear, conduz a uma necessidade de substituir o produto que leva ao aumento da procura por novos EEE. Seguidamente, esta maior procura, compra e utilização gera inevitavelmente o descarte de EEE no final do ciclo de vida, o qual, por sua vez, se traduz num aumento contínuo dos REEE.

Este encadeamento de argumentos foi sistematizado num quadro de codificação (Tabela 3.1), no qual cada segmento é associado a variáveis específicas do diagrama, sendo ainda indicada a polaridade da relação (Kim & Andersen, 2012).

Tabela 3.1 - Exemplificação da lista de relações causais do argumento principal.

Causa	Efeito	Polaridade da relação causal
Necessidade de substituir o produto	Procura	(+)
Utilização de EEE	Descarte de EEE	(+)
Descarte de EEE	Resíduos EEE	(+)

O passo seguinte consiste em transformar estes quadros de codificação em diagramas de palavras e setas, nos quais se representam as variáveis e os sentidos das relações causais. Nesta fase, torna-se necessário distinguir a polaridade das ligações (Kim & Andersen, 2012). A elaboração destes diagramas simples permite visualizar argumentos dispersos nos artigos que descrevem implicitamente cadeias causais, facilitando a identificação de padrões e redundâncias. Posteriormente, procede-se à generalização estrutural, em que variáveis semanticamente próximas são agrupadas (Kim & Andersen, 2012).

3.2.4 Construção dos diagramas causais preliminares

Após a etapa de codificação e identificação das relações causais isoladas, tornou-se necessário integrá-las em estruturas mais amplas, capazes de refletir a complexidade do sistema em estudo. Esta transição das relações segmentadas para diagramas completos constitui um passo importante da metodologia, uma vez que permite passar de observações descritivas para representações estruturais que capturam o comportamento dinâmico dos sistemas.

Na literatura sobre modelação em dinâmicas de sistemas, este processo inicia-se com a organização dos códigos em diagramas de palavras e setas, onde as variáveis são ligadas por relações positivas ou negativas, representando respetivamente influências diretas ou inversas (Ahmad et al., 2016). Para este processo, utilizou-se o software Vensim®, reconhecido na área de DS como ferramenta eficaz para a construção de diagramas causais.

Os diagramas causais resultantes deste processo representam graficamente as relações de causa-efeito entre variáveis de um sistema, permitindo compreender de que forma estas interagem ao longo do tempo. Na figura 3.2 é possível observar que cada seta indica uma relação causal e é acompanhada por um sinal (+) ou (-) que define a direção do efeito: um sinal positivo implica que as variáveis variam no mesmo sentido (e.g., um aumento em A provoca aumento em B), enquanto um sinal negativo indica uma relação inversa (e.g., um aumento em A reduz B). O sentido das setas estabelece a sequência causal, e a polaridade de cada ciclo é determinada pelo produto dos sinais que o compõem. Se o número de relações negativas for par, trata-se de um ciclo de retroação positiva (R, ou positivo); se for ímpar, um ciclo de retroação negativa (B, ou negativo) (Haraldsson, 2004).

Nos ciclos de retroação positiva, uma alteração inicial tende a amplificar-se continuamente, gerando dinâmicas de crescimento ou declínio cumulativo, enquanto nos ciclos de retroação negativa o sistema reage de forma estabilizadora, procurando equilibrar as mudanças e aproximar-se de um ponto de equilíbrio (Haraldsson, 2004). No diagrama apresentado, as variáveis A, B e C exemplificam estes dois tipos de retroação: os ciclos de retroação positiva ilustram a tendência para o crescimento exponencial quando não existem mecanismos de limitação, enquanto os ciclos de retroação negativa representam a resposta estabilizadora do sistema perante perturbações externas. A presença de uma dupla barra entre variáveis assinala um desfasamento temporal (*delay*), ou seja, o intervalo entre uma causa e o

seu efeito, sendo este um elemento fundamental para explicar comportamentos dinâmicos como oscilações, inércia ou respostas diferidas do sistema (Haraldsson, 2004).

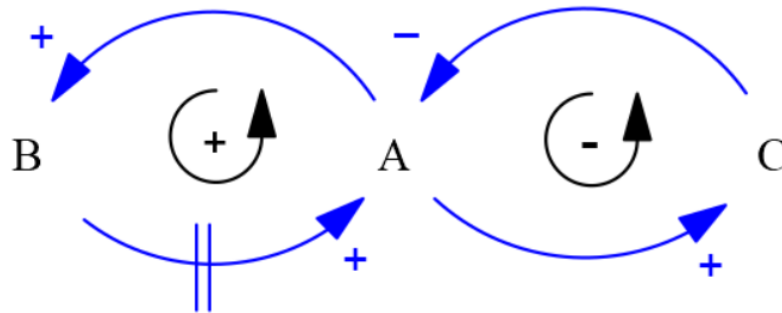


Figura 3.2 - Exemplificação de um diagrama causal conceitual.

3.2.5 Integração com o modelo dos 9 R's

A integração da análise qualitativa com o modelo dos 9 R's constituiu um passo fundamental para garantir a coerência entre as medidas identificadas nos artigos, as práticas regulamentares em vigor e as estratégias de circularidade em estudo. A classificação das medidas em três diferentes categorias (de R0 a R2, de R3 a R7 e de R8 a R9) permite organizar os resultados segundo o grau de circularidade e interpretar em que fases do ciclo de vida dos EEE atuam determinadas políticas e estratégias em estudo.

Na Tabela 3.2 encontra-se a estrutura adaptada da proposta por Potting et al. (2017). Esta abordagem estabelece uma hierarquia de estratégias de circularidade, onde o nível de circularidade decresce à medida que se avança da recusa de consumo (R0) para a recuperação energética (R9).

Tabela 3.2 - Estratégias circulares R. Fonte: Adaptado de Potting et al. (2017)

R0-R2 Fabrico e utilização dos produtos mais conscientes	R0 - Recusar	Produto redundante e abandono da sua função ou substituição por outro.
	R1 - Repensar	Utilização mais intensiva do produto (partilha) e/ou produtos multifuncionais.
	R2- Reduzir	Maior eficiência de produção ou uso consumindo menos recursos naturais e materiais.
R3-R7 Prolongar a vida útil do produto e das suas componentes	R3 - Reutilizar	Reutilização de produtos descartados que se encontram em bom estado e cumprem a sua função original.
	R4 - Reparar	Reparação e manutenção de produtos para utilização na sua função original.
	R5 - Recondicionar	Restauração e atualização de produtos antigos.
	R6 - Remanufacturar	Utilização de componentes de produtos descartados num novo produto com a mesma função.
	R7 - Reaproveitar	Utilização de produtos descartados ou das suas componentes num novo produto com uma função diferente.
R8-R9 Foco na eficiência e recuperação de materiais	R8 - Reciclar	Processamento de materiais para obter a mesma qualidade ou uma qualidade inferior.
	R9 - Recuperar	Incineração de materiais com recuperação de energia.

Assim, as estratégias R0–R2 representam níveis de circularidade mais fortes, associados a repensar o modelo de consumo, recusar produtos desnecessários ou reduzir a utilização de materiais. Estas medidas implicam uma transformação sistémica significativa, pois atuam a montante do ciclo de vida do produto, prevenindo a geração de resíduos através da conceção de modelos de negócio inovadores e de um design orientado para a redução da utilização de recursos.

Por sua vez, as estratégias situadas entre R3 e R7 incidem principalmente em objetivos de reutilização e extensão da vida útil dos produtos. Estas práticas não evitam a produção inicial de bens, mas maximizam a sua durabilidade e eficiência de utilização, diminuindo a pressão sobre a extração de matérias-primas. Conforme salientam Potting et al. (2017), estas opções possuem um nível intermédio de circularidade, constituindo alternativas relevantes quando a prevenção total não é viável.

Por fim, as estratégias R8–R9, que incluem a reciclagem e a recuperação energética, são classificadas como de menor circularidade. Embora representem progressos face ao descarte em aterro, estas estratégias mantêm-se próximas do paradigma linear, uma vez que não evitam a extração de novos recursos nem asseguram, na maioria dos casos, a manutenção da qualidade original dos materiais.

Neste trabalho, a utilização deste modelo permitiu alocar as medidas de política e práticas empresariais analisadas em três grandes blocos: R0–R2, medidas de elevada circularidade, focadas na produção e utilização dos produtos mais conscientes; R3–R7, estratégias que prolongam a vida útil dos produtos, com um nível médio de circularidade; R8–R9, soluções de fim de ciclo, que representam medidas de baixo nível de circularidade.

A justificação desta divisão assenta no facto de cada grupo refletir diferentes níveis de ambição circular e diferentes impactes ambientais. Potting et al. (2017) sublinham que quanto mais elevado for o potencial de circularidade da estratégia adotada, maior a redução do consumo de recursos e dos impactes ambientais associados. Assim, a análise integrada através do modelo dos 9 R's permite perceber em que etapas do ciclo de vida determinadas medidas de circularidade estão concentradas, se contribuem para evitar a produção de resíduos, prolongar o uso de produtos existentes ou para fechar ciclos na cadeia dos produtos e serviços através da reciclagem.

3.3 Consulta a partes interessadas do setor dos EEE

3.3.1 Análise de *stakeholders*

A consulta a partes interessadas constituiu uma etapa fundamental desta investigação, uma vez que permitiu integrar perspetivas complementares sobre os desafios e dinâmicas que moldam a transição para a economia circular no setor dos EEE. Esta abordagem reconhece que o desempenho circular do setor depende da interação entre diferentes grupos de atores e que a compreensão destas relações é essencial para identificar barreiras, oportunidades e efeitos sistémicos. Assim, a identificação e o mapeamento de partes interessadas visaram representar de forma estruturada os principais intervenientes ao longo do ciclo de vida dos EEE e as suas interdependências dentro da cadeia de valor.

A Figura 3.3 apresenta o esquema da cadeia de valor do setor dos EEE, ilustrando os principais atores que intervêm ao longo do ciclo de vida dos produtos. Este modelo permite visualizar as interações desde a extração de matérias-primas até à gestão de resíduos.

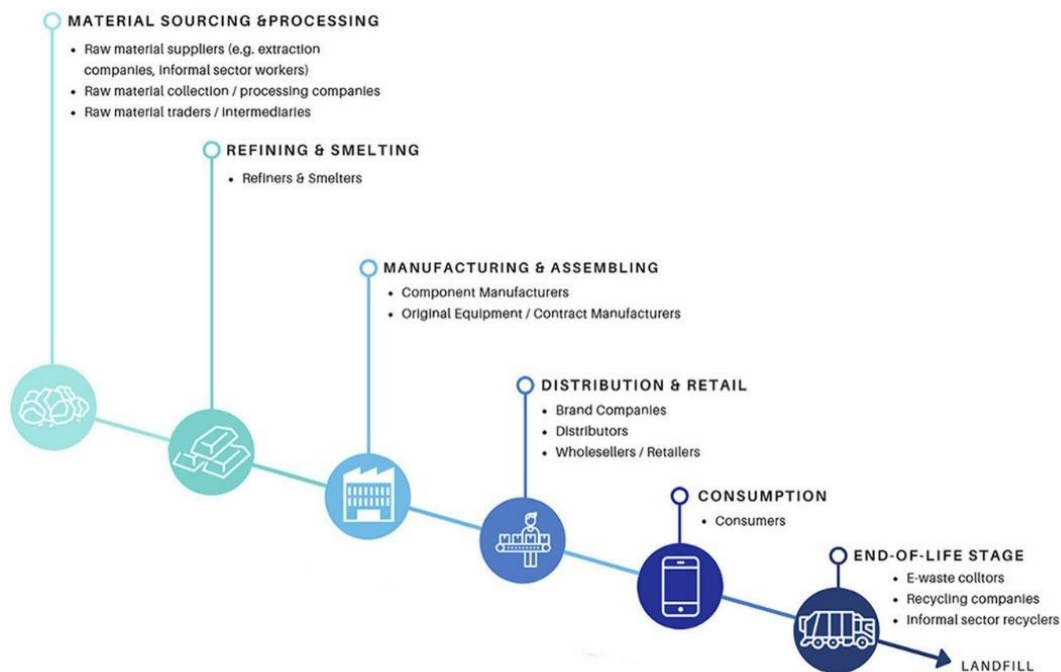


Figura 3.3 - Principais agentes da cadeia de valor do setor dos EEE. Fonte: Adaptado de Evans and Vermeulen (2021).

O primeiro grupo de atores corresponde aos fornecedores e processadores de matérias-primas, que incluem empresas de extração mineral e refinarias, bem como operadores informais e intermediários comerciais. Estes atores assumem um papel essencial no fornecimento de materiais sustentáveis e na redução do desperdício ao longo da cadeia de valor (Haase et al., 2024). Nesta etapa, predominam modelos de governança público-privados, que combinam o papel das empresas multinacionais, organizações internacionais e entidades não-governamentais na promoção de normas de rastreabilidade e práticas de auditoria prévia (Evans & Vermeulen, 2021).

Na fase seguinte situam-se os fabricantes, compostos por produtores de componentes e fabricantes de equipamentos originais, responsáveis pela conceção e montagem dos dispositivos eletrónicos. Estes atores concentram grande parte do valor económico da cadeia e exercem uma influência significativa sobre as condições de produção e design dos produtos (Haase et al., 2024). Os modelos de governança nesta fase tendem a ser dominados por mecanismos empresariais sustentados por códigos de conduta e iniciativas colaborativas (Evans & Vermeulen, 2021).

O grupo seguinte integra os distribuidores e retalhistas, incluindo marcas e pontos de venda, que asseguram a colocação dos equipamentos no mercado e desempenham um papel

essencial na comunicação de atributos ambientais e de sustentabilidade aos consumidores (Haase et al., 2024). Estes últimos constituem o centro da fase de consumo, representando os utilizadores finais que influenciam o sistema através das suas decisões de compra, de utilização e de descarte (Haase et al., 2024).

Na fase de fim de vida, destacam-se as entidades gestoras e empresas de reciclagem, bem como operadores informais que participam na recolha, triagem e valorização de equipamentos elétricos e eletrónicos. Esta etapa está frequentemente associada a mecanismos de governança descentralizados e participativos, que combinam a aplicação de políticas públicas com a atuação de entidades privadas e organizações da sociedade civil (Evans & Vermeulen, 2021; Haase et al., 2024).

De uma forma transversal, ao longo da cadeia de valor atuam organizações da Administração Pública e associações não-governamentais, que exercem funções de regulamentação, fiscalização, sensibilização e representação de interesses coletivos. A presença destes atores é essencial para reforçar a coordenação intersectorial e garantir a implementação efetiva das metas de sustentabilidade e circularidade ao longo de toda a cadeia de valor (Evans & Vermeulen, 2021; Haase et al., 2024).

Este conjunto de atores constitui a base para determinar os níveis de influência e interesse dos vários *stakeholders*. A Tabela 3.3 sintetiza o nível de influência e interesse de cada grupo no avanço das estratégias de circularidade no setor dos EEE.

Tabela 3.3 - Nível de influência e interesse na adoção das estratégias de circularidade dos principais atores da cadeia de valor de EEE.

Grupo de stakeholders	Influência	Interesse	Justificação
Administração Pública	Elevada	Elevado	Principal agente regulamentar e promotor de políticas públicas e instrumentos de responsabilidade alargada do produtor (Evans & Vermeulen, 2021; Haase et al., 2024; Liu et al., 2022).
Associações ambientais e de consumidores	Média	Elevado	Exercem pressão social pela sustentabilidade e circularidade (Evans & Vermeulen, 2021; Haase et al., 2024).
Fornecedores e processadores de matérias-primas	Média	Médio	Forte dependência de regulamentação externa; baixa transparência das cadeias (Evans & Vermeulen, 2021; Haase et al., 2024).
Produtores de componentes e fabricantes	Elevada	Médio	Controlam o design e a produção; exercem governação corporativa voluntária (Evans & Vermeulen, 2021; Haase et al., 2024).
Distribuidores e retalhistas	Média	Médio	Mediadores entre produção e consumo; comunicam práticas sustentáveis (Evans & Vermeulen, 2021; Haase et al., 2024).
Consumidores	Médio	Elevado	As decisões de compra e substituição influenciam fortemente o volume de resíduos (Evans & Vermeulen, 2021; Haase et al., 2024; Liu et al., 2022).
Entidades gestoras e recicladores	Média	Médio	Responsáveis por cumprir metas de recolha e reciclagem (Liu et al., 2022; Haase et al., 2024).

3.3.2 Recolha de perceções dos *stakeholders* entrevistados

A construção dos diagramas causais a partir de dados documentais, beneficiou de uma etapa complementar de validação participativa com atores relevantes do setor. Este processo visou assegurar que os modelos desenvolvidos refletem não apenas o conteúdo formal dos artigos científicos e documentos de política, mas também o conhecimento das partes interessadas envolvidas nas práticas da economia circular.

A seleção das entidades a consultar baseou-se na diversidade de funções representadas ao longo da cadeia de valor dos EEE, de modo a assegurar uma visão abrangente das diferentes perspetivas associadas à implementação das estratégias de circularidade. Procurou incluir-se organizações com papéis distintos e complementares, abrangendo desde a gestão de resíduos e a reparação até à defesa do consumidor, investigação técnica e promoção de políticas ambientais no setor em Portugal. Adicionalmente, a escolha considerou a experiência prática dos participantes, o envolvimento direto em projetos ou políticas de circularidade, e a sua capacidade de fornecer contributos técnicos e estratégicos. Esta diversidade permite captar múltiplas perspetivas sobre as barreiras e oportunidades da transição para a economia circular no setor dos eletrónicos, reduzindo o risco de enviesamento e contribuindo para a robustez na validação dos resultados. Assim, foi identificado um conjunto de organizações relevantes no setor que incluíam: Cocolab, Circular Economy Portugal, DECO, Electrão, ERP Portugal, iServices, INEGI, Repair Café Lisboa, Signify, TRC, ZERO e Zero Waste Lab.

Após contacto por correio eletrónico e telefone, foram recebidas respostas de cinco organizações confirmando a disponibilidade para participar no estudo. Os respondentes incluem representantes de instituições de investigação e apoio técnico, iniciativas de reparação e reutilização de EEE, entidades gestoras de resíduos, associações de defesa dos consumidores e do ambiente. As cinco entrevistas realizadas tiveram uma duração média de 30 minutos.

Por razões de confidencialidade, os respondentes serão designados de forma anónima como Entrevistado 1 (E1), Entrevistado 2 (E2), Entrevistado 3 (E3), Entrevistado 4 (E4) e Entrevistado 5 (E5).

A estrutura do guião de entrevista, colocado em anexo, foi dividida em três secções, com os seguintes objetivos:

- Secção I – Validação dos arquétipos por grupo de estratégias (R0–R2, R3–R7, R8–R9): Procurou compreender a perceção dos entrevistados sobre a relevância e interligação das variáveis que compõem cada grupo de estratégias, explorando questões como:

“Que efeitos genéricos têm os diferentes grupos de estratégias no ciclo de vida dos EEE?”

“Quais são as consequências ou efeitos secundários não desejados no sistema que poderão resultar da adoção deste tipo de estratégias?”

- Secção II – Validação dos diagramas causais das medidas de política: Centrou-se na análise da eficácia percebida de medidas específicas de políticas europeias (e.g. Diretiva REEE, RoHS, PAEC, *Clean Industrial Deal*, Direito à Reparação e ESPR) e no modo como estas influenciam a circularidade no setor. Exemplos de perguntas incluíram:

“Quais são os efeitos mais relevantes da Diretiva REEE sobre as metas de recolha e valorização de REEE?”

“Que medida, das que vimos ou outras, considera ser mais eficaz para promover a circularidade do setor? Porquê?”

- Secção III – Barreiras e oportunidades à implementação das estratégias de circularidade: Focou-se em perceções sobre fatores que facilitam ou dificultam a adoção prática da economia circular. Exemplos de questões:

“Quais são as principais barreiras à circularidade no setor dos EEE?”

“Quais são as principais oportunidades para se atingir a circularidade no setor dos EEE?”

Durante as entrevistas, foi selecionada uma medida representativa de cada uma das políticas europeias consideradas, de modo a procurar assegurar uma profundidade analítica adequada sem comprometer uma curta duração estimada para as entrevistas. As restantes medidas foram exploradas com base documental e integradas nos diagramas causais, permitindo complementar a validação empírica com a evidência teórica disponível.

3.3.3 Tratamento dos dados

As entrevistas foram registadas e posteriormente transcritas, constituindo a base para uma análise sistemática. Este processo foi desenvolvido em paralelo com os resultados obtidos nos documentos analisados, possibilitando uma triangulação entre fontes. A triangulação garante não só a coerência entre dados empíricos e documentais, mas também permite identificar áreas de convergência e divergência que enriquecem a compreensão do sistema.

3.4 Elaboração dos arquétipos e análise de resultados

Os contributos obtidos nas entrevistas foram depois integrados na revisão e ajuste dos diagramas causais iniciais desenvolvidas a partir da literatura. Sempre que os entrevistados confirmaram a relevância de relações já identificadas, não foram efetuadas alterações aos diagramas iniciais. Nos casos em que foram sugeridas novas variáveis ou conexões não previamente codificadas, estas foram analisadas e, quando justificadas pela prática, incorporadas nos diagramas. Por outro lado, as incoerências ou discrepâncias levantadas serviram para reformular certas ligações, aumentando a fiabilidade e transparência dos modelos.

Numa segunda tarefa de análise, aos arquétipos sistémicos propostos para cada grupo de estratégia R foram adicionadas variáveis relacionadas com as barreiras e oportunidades mencionadas pelos entrevistados.

Posteriormente, os arquétipos foram aplicados a um conjunto de medidas presentes em iniciativas regulamentares para testar a sua aplicação. A leitura dos documentos legislativos em conjunto com a opinião dos *stakeholders* permitiram aplicar cada arquétipo sistémico proposto para cada grupo de estratégia R a políticas, e a uma seleção das suas principais medidas. Desta forma, o processo de consulta a partes interessadas não se limitou a validar resultados prévios, mas constituiu também uma oportunidade de apoio na construção de conhecimento, assegurando que os mapas causais representam de forma mais fidedigna a complexidade do setor do EEE e os desafios de circularidade que enfrenta, permitindo também representar as principais políticas de economia circular e que tipo de estratégias influenciam.

ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

4.1 Arquétipo do sistema "take-make-waste"

O diagrama causal apresentado na Figura 4.1 representa a lógica linear (não circular) do sistema predominante de produção e consumo de EEE, frequentemente designada por "take-make-waste". Este modelo caracteriza-se por um ciclo retroação positiva em que a procura por novos equipamentos impulsiona a produção, e esta estimula a compra e utilização, originando no final do processo o descarte e a acumulação de resíduos.

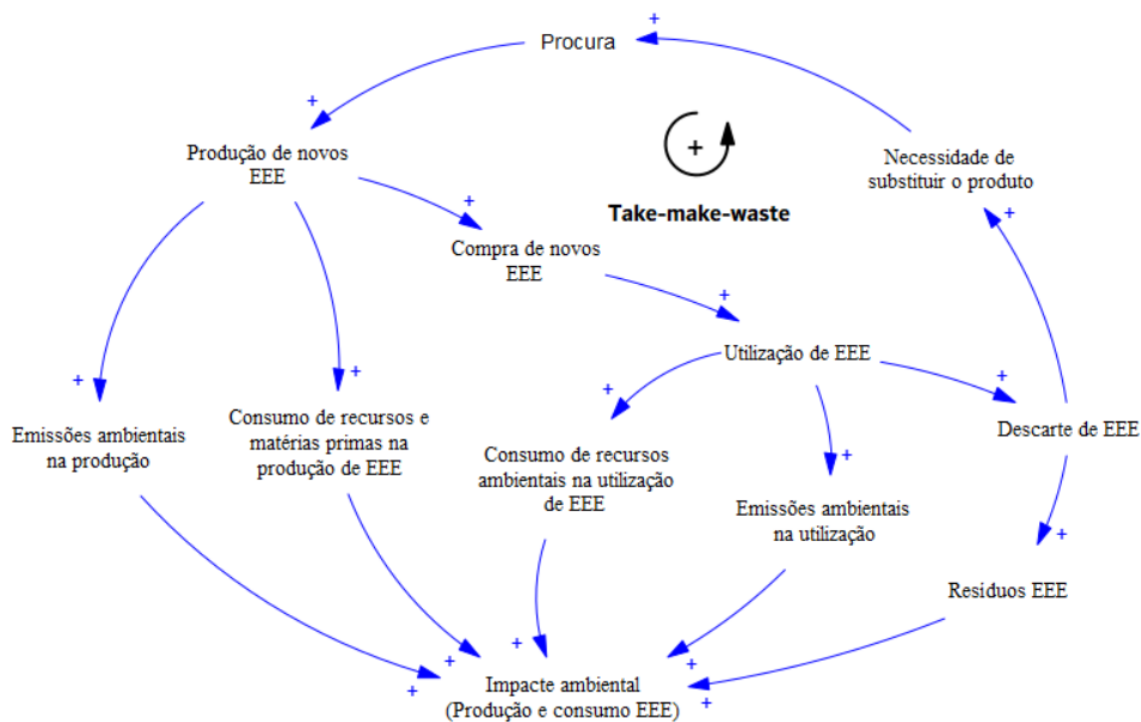


Figura 4.1 - Diagrama causal "take-make-waste".

O ciclo inicia-se com a procura, que leva à produção de novos equipamentos (Miao et al., 2017; Canetta et al., 2018). Cada aumento na produção implica maior disponibilidade de equipamentos no mercado, o que se traduz num aumento da compra de novos equipamentos e consequente utilização (Glöser-Chahoud et al., 2019). Com o decorrer do tempo de utilização, os produtos atingem o fim do período de utilização, resultando no seu descarte e no aumento dos resíduos eletrónicos contribuindo para alguns dos impactes ambientais relevantes do setor. (Puzzo & Prati, 2024; Hunger et al., 2024; Canetta et al., 2018). Este descarte gera, tipicamente, a necessidade de substituição dos produtos, o que reforça a procura (Corsini et al., 2020; May & Steuer, 2025), fechando o ciclo de retroação positiva deste modelo linear que serve como base de referência.

Por outro lado, a produção de novos EEE implica a extração e o consumo de recursos e matérias-primas, além de gerar emissões ambientais durante o processo industrial. Tanto o consumo de recursos como as emissões aumentam diretamente o impacto ambiental global do setor (May & Steuer, 2025, Puzzo & Prati, 2024).

Na fase de utilização dos equipamentos, observam-se também consumos significativos de energia e outros recursos ambientais, aos quais se somam emissões resultantes da fase de utilização (Da Silva et al., 2024; Stevels, 2023; Bründl et al., 2024; Roskladka et al., 2025). Estes fatores contribuem de forma adicional para o agravamento do impacto ambiental associado ao ciclo de vida linear dos EEE (Canetta et al., 2018; Harris et al., 2025).

Deste diagrama causal resulta que o comportamento dinâmico de referência de um sistema "*take-make-waste*" típico é dominado por estruturas de retroação positiva que reforçam um crescimento do consumo e da produção, acompanhado por um aumento concomitante de resíduos, emissões e exploração de recursos naturais.

Na Figura 4.2 apresenta-se uma proposta de representação do comportamento dinâmico de referência associado ao arquétipo de um sistema "*take-make-waste*" de EEE. Este gráfico foi construído com base em dados provenientes do Eurostat, especificamente da base de dados Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE) (*by waste management operations – open scope, 6 product categories, from 2018 onwards*). Desta base de dados, extraiu-se a variável "*products put on the market*" para representar a produção de EEE, e a variável "*waste collected*" para estimar os resíduos de EEE, correspondendo à quantidade efetivamente recolhida no âmbito dos sistemas de gestão de resíduos na União Europeia. Estes valores representam apenas os fluxos de recolha seletiva, não abrangendo os resíduos eletrónicos dispersos ou informais, o que significa que os números apresentados podem subestimar o

total real de resíduos gerados na União Europeia. Os troços representados com uma linha a tracejado na figura representam uma estimativa para completar o padrão de comportamento ao longo do período 2010 a 2025.

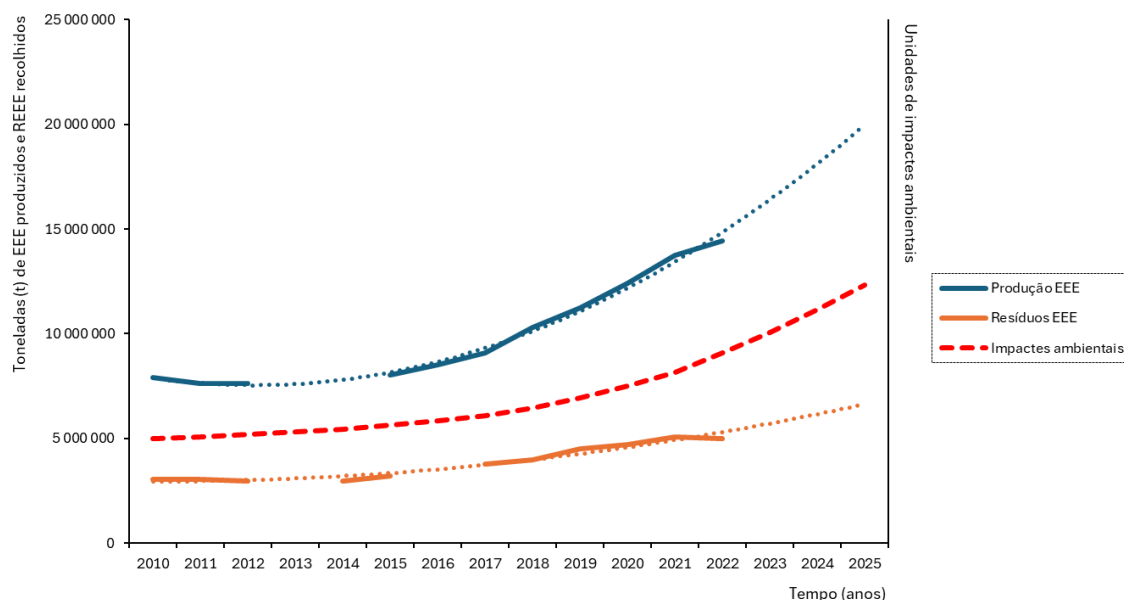


Figura 4.2 – Comportamento dinâmico de referência associado a um modelo “take-make-waste” no setor dos EEE.

Entre 2010 e 2023 observa-se um aumento acentuado da produção de EEE, ultrapassando os 15 milhões de toneladas e projetando-se para cerca de 20-25 milhões de toneladas até 2025. Este crescimento acompanha as tendências de consumo tecnológico na Europa e demonstra a persistência de um modelo linear de produção e substituição rápida (Canetta et al., 2018).

Os REEE seguem uma trajetória igualmente ascendente, ainda que com menor inclinação, refletindo o desfasamento entre o volume de produtos colocados no mercado, a sua utilização e a capacidade de recolha e tratamento. A diferença crescente entre as curvas de produção e resíduos indica um acumular de produtos em uso ou mal geridos no fim de vida, o que reforça a pressão sobre os sistemas de gestão de resíduos.

A linha tracejada referente aos impactes ambientais representa uma hipótese para o comportamento de referência (*reference mode*), projetando o aumento dos efeitos ambientais à medida que cresce o volume de resíduos. Esta projeção baseia-se no aumento da quantidade de REEE, nas emissões e extração de matérias-primas críticas associadas à sua produção e utilização (Canetta et al., 2018; Mihai et al., 2019).

A leitura conjunta das curvas confirma a natureza insustentável do modelo “take-make-waste.” À medida que a produção cresce, os resíduos e os impactes ambientais acompanham

o mesmo padrão ascendente, sem que o sistema apresente mecanismos de retroação negativa capazes de estabilizar ou inverter estas tendências.

A ausência de mecanismos de retroação que limitem ou equilibrem estas tendências evidencia o carácter insustentável do modelo linear, justificando a necessidade de explorar alternativas de circularidade que atuem em diferentes fases do ciclo de vida (Indrawati et al., 2024; McGloin et al., 2024; Corsini et al., 2020).

4.2 Arquétipos sistémicos por grupos de estratégias R

4.2.1 Arquétipo causal para as estratégias do grupo R0–R2

O diagrama causal representado na figura 4.3 referente ao grupo de estratégias R0–R2, introduz mecanismos de retroação negativa que procuram contrariar a lógica linear do sistema "take-make-waste". As estratégias de Recusar (R0), Repensar (R1) e Reduzir (R2) assentam na ideia de uma produção e utilização mais conscientes, que atuam de forma preventiva no início do ciclo de vida (Potting et al., 2017). Esta abordagem estabelece relações causais negativas com variáveis críticas do sistema, como a produção de novos EEE, a compra de novos EEE, o consumo de recursos e matérias-primas, e as emissões ambientais associadas à produção e à utilização.

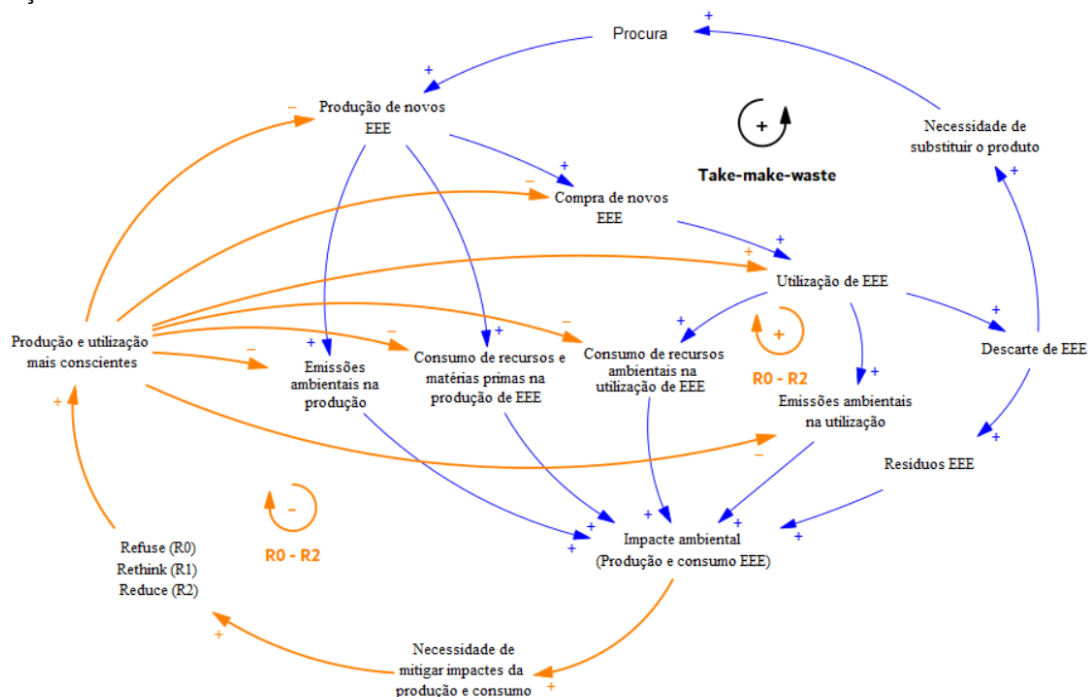


Figura 4.3 - Arquétipo causal para as estratégias do grupo R0–R2

Na prática, o diagrama traduz que uma maior consciencialização na fase de produção consumo, seja através da recusa de produtos desnecessários, R0, do repensar de modelos de negócio baseados em partilha ou serviços, R1, tende a diminuir a intensidade da produção e compra de novos equipamentos. A redução do consumo de recursos, R2, traduz-se numa menor extração de recursos, menos emissões e numa menor pressão sobre o ambiente.

Assim, o diagrama evidencia a formação de novos ciclos de retroação negativa que limitam a expansão exponencial do sistema "take-make-waste". Os novos ciclos de retroação negativa associam a "produção e utilização mais conscientes" à estabilização (e eventual diminuição) do volume de produção e a uma estabilização (e eventual diminuição) de emissões ambientais e do consumo de recursos, que por sua vez reduzem os impactos ambientais globais associados à produção e consumo de EEE. Também é criado um ciclo de retroação positiva que associa a "produção e utilização mais conscientes" ao aumento da "utilização de EEE", que por sua vez é enfraquecido pela estabilização (e eventual diminuição) de emissões ambientais e do consumo de recursos associados à fase de utilização. Ao contrário dos ciclos de retroação positiva presentes no sistema linear, que amplificavam continuamente produção, consumo e resíduos, aqui observar-se-á a criação de ciclos estabilizadores que visam aproximar o sistema dos limites de sustentabilidade.

A Figura 4.4 apresenta uma proposta de representação do comportamento dinâmico de referência associado a um cenário de adoção das estratégias representadas no arquétipo R0–R2, configurando-se como a continuação do cenário linear "take-make-waste" ilustrado na Figura 4.2.

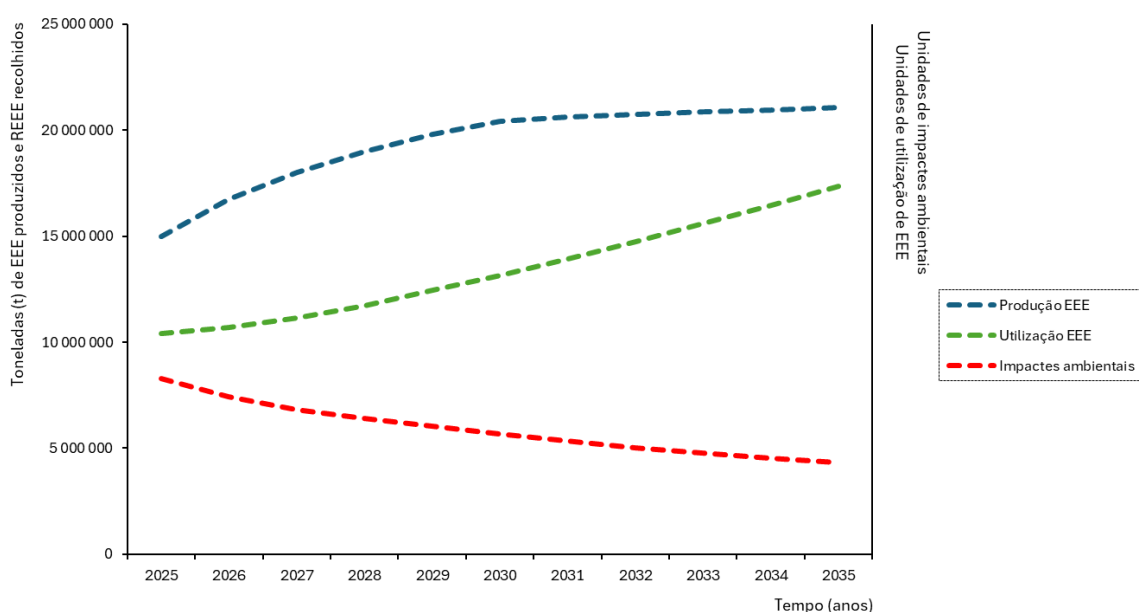


Figura 4.4 - Comportamento dinâmico de referência associado a um cenário de adoção das estratégias R0-R2.

Considerando os novos ciclos de retroação representados neste arquétipo, poderá assim associar-se como hipótese uma curva decrescente e tendencialmente estável ao longo do tempo da produção de EEE. Este comportamento traduz a transição gradual de um sistema linear “*take-make-waste*” para um modelo mais eficiente e contido, onde a produção é desacoplada do crescimento do consumo material.

Em contraste, a linha referente à utilização de EEE apresenta um crescimento progressivo, sugerindo uma utilização mais intensiva dos produtos. Este aumento reflete o efeito positivo das medidas de prevenção e eficiência que permitem satisfazer as mesmas necessidades com um menor volume de produção. Assim, o sistema atinge uma utilização mais racional dos recursos, maximizando o valor obtido por unidade de produto.

Consequentemente, os impactes ambientais associados ao ciclo de vida dos EEE (representados pela linha vermelha tracejada) tendem a diminuir de forma gradual. A hipótese ilustrada sugere que a implementação generalizada das estratégias R0–R2 teria o potencial de inverter a tendência ascendente de emissões e poluição observada no modelo “*take-make-waste*”, conduzindo potencialmente a uma dissociação absoluta dos impactes ambientais ao longo do tempo.

A Tabela 4.1 representa uma síntese das respostas de cada um dos *stakeholders* entrevistados relativamente aos efeitos genéricos deste arquétipo associados à adoção de estratégias circulares do grupo R0–R2. As respostas recolhidas permitem compreender as perceções dos *stakeholders* sobre o impacto destas estratégias na prevenção da produção e compra de novos EEE.

Tabela 4.1 - Síntese das respostas dos entrevistados relativamente aos efeitos genéricos das estratégias R0-R2 na cadeia de valor dos EEE.

Questão	Entrevistado 1	Entrevistado 2	Entrevistado 3	Entrevistado 4	Entrevistado 5
Efeitos gerais das estratégias R0-R2	Estratégias preventivas que reduzem a pressão sobre recursos naturais e impactes do fabrico.	Elevado valor circular, evitam a produção de resíduos; pré-requisitos da circularidade.	Reduzem consumo e produção; maior nível de circularidade.	Impacto significativo na origem do consumo e produção; falta de políticas que as potenciem.	Estratégias conceptuais importantes baseadas no <i>degrowth</i> que permitem alterar a sociedade de consumo.
Efeitos propostos (redução da produção e compra)	Concorda.	Concorda.	Concorda.	Concorda.	Concorda.

A análise dos resultados das entrevistas revela uma convergência entre os participantes quanto ao papel central das estratégias R0–R2 na transição para a economia circular. Todos os

entrevistados reconheceram o carácter preventivo e de maior valor circular destas estratégias, destacando que “atuam na origem do consumo e influenciam toda a cadeia de produção e distribuição” (E4) e que “permitem evitar a produção de resíduos” (E2).

De forma consistente, os entrevistados associaram estas estratégias à redução do volume de produção e compra, o que se traduz em menores emissões, menor extração de matérias-primas e diminuição dos impactes ambientais em toda a cadeia de valor. Esta perceção confirma as relações causais representadas no arquétipo sistémico das estratégias de circularidade do grupo R0–R2.

A análise das entrevistas permitiu identificar ainda um conjunto de possíveis efeitos indesejados, barreiras e oportunidades relacionados com a adoção das estratégias preventivas R0–R2. Estas estratégias, centradas na recusa, repensar e redução, enfrentam desafios estruturais e comportamentais que condicionam a sua implementação, mas também revelam oportunidades significativas para uma mudança de paradigma no consumo e na produção. A Tabela 4.2 sintetiza os efeitos indesejados associados a este grupo de estratégias, de acordo com os entrevistados.

Tabela 4.2 - Síntese dos efeitos secundários não desejados resultantes da adoção das estratégias R0-R2 mencionados pelos entrevistados

Questão	Entrevistado 1	Entrevistado 2	Entrevistado 3	Entrevistado 4	Entrevistado 5
Efeitos secundários não desejados R0-R2	Redução de receitas e resistência do setor; risco de desigualdade de acesso.	Trade-off ambiental e social; risco de perda de interação comunitária.	Potencial aumento de impactes na fase de uso se a eficiência não for garantida.	Possível aumento de preços e exclusão de consumidores.	Resistência das empresas que procuram lucrar com a linearidade do setor.

O E1 alertou que um dos efeitos secundários que podem emergir da aplicação isolada destas estratégias seja o risco de “redução de receitas para os fabricantes, o que pode gerar resistência do setor”, e o E4 acrescentou que a “desigualdade de acesso faz com que alguns produtos mais sustentáveis sejam tendencialmente mais caros”. Foi também mencionado o aumento dos preços que poderá afetar a adesão dos consumidores e questionada a eficiência dos produtos que terão a sua utilização intensificada. Estes efeitos indesejados, também observados na literatura (Rizos & Bryhn, 2022), ilustram os trade-offs socioeconómicos associados à transição para modelos de consumo mais conscientes.

Para além dos efeitos indesejados foram também identificadas as principais barreiras e oportunidades à adoção de estratégias circulares no setor. A Tabela 4.3 sintetiza as barreiras e oportunidades identificadas pelos entrevistados, que podem ser associadas a este grupo de estratégias.

Tabela 4.3 - Síntese das principais barreiras e oportunidades associadas à adoção de estratégias R0-R2 identificadas pelos entrevistados.

Barreiras	Oportunidades
<ul style="list-style-type: none"> - Modelos de negócio baseados em obsolescência rápida (E1, E2 e E5); - Atualizações contantes de softwares (E2); - Consumo impulsivo e mentalidade de substituição constante (E2, E4 e E5). 	<ul style="list-style-type: none"> - Inovação em modelos de negócio (E1 e E2); - Campanhas de sensibilização (E3); - Incentivos financeiros (E4 e E5); - Transparência na informação (E4 e E5).

Entre as barreiras mais referidas pelos entrevistados, destaca-se a dependência do setor em modelos de negócio baseados na obsolescência programada e rápida, que reforçam os ciclos curtos de inovação e substituição. O E1 observou que “os modelos de negócio ainda são baseados em obsolescência rápida, fazendo com que o setor continue dependente de ciclos curtos de inovação e substituição”. Adicionalmente, o E2 também destacou o problema da obsolescência programada, afirmando que “as atualizações de software e hardware estão ligadas à obsolescência programada e dificultam a adoção de estratégias circulares”. Esta barreira está descrita na literatura como um dos principais entraves à prevenção do consumo excessivo e à durabilidade dos produtos (Rizos & Bryhn, 2022, Baldassarre et al., 2022).

Outro conjunto de barreiras está associado ao comportamento do consumidor e à cultura de consumo impulsivo. O E2 salientou que “enquanto o consumidor quiser sempre algo novo e melhor, será difícil adotar estratégias circulares”, enquanto o E4 reforçou que “o modelo económico ainda está muito concentrado no consumo impulsivo”. A literatura confirma esta tendência, identificando o desejo por novidade, o estatuto social associado à tecnologia e a falta de informação sobre impactos ambientais como fatores que perpetuam padrões lineares de consumo (Baldassarre et al., 2022).

Do ponto de vista sistémico, as barreiras e efeitos indesejados identificados pelos entrevistados criam obstáculos que perpetuam a lógica do sistema linear, podendo ser adicionados ao arquétipo representado na Figura 4.5. Podemos observar neste diagrama que a obsolescência programada impulsionada pelas constantes atualizações de software alimenta a procura constante por novos equipamentos, estimulando a produção e, tendo por consequência final, o aumento do volume de resíduos eletrónicos. Simultaneamente, a mentalidade consumista também destaca uma barreira à adoção deste tipo de estratégias, ao promover a substituição prematura dos produtos, enquanto a desigualdade de acesso a

soluções mais sustentáveis motiva a procura por alternativas mais baratas e lineares. Além disso, tendo este grupo de estratégias por base uma mudança radical dos modelos de negócios atuais poderá conduzir a uma redução de receitas para as empresas que pode provocar a resistência dos fabricantes e, conseqüentemente comprometer a adoção deste tipo de estratégias. Todos estes efeitos apontam para desafios à dominância dos ciclos de retroação negativa introduzidos pelas estratégias R0–R2, e demonstram a resistência estrutural do sistema face a políticas de prevenção.

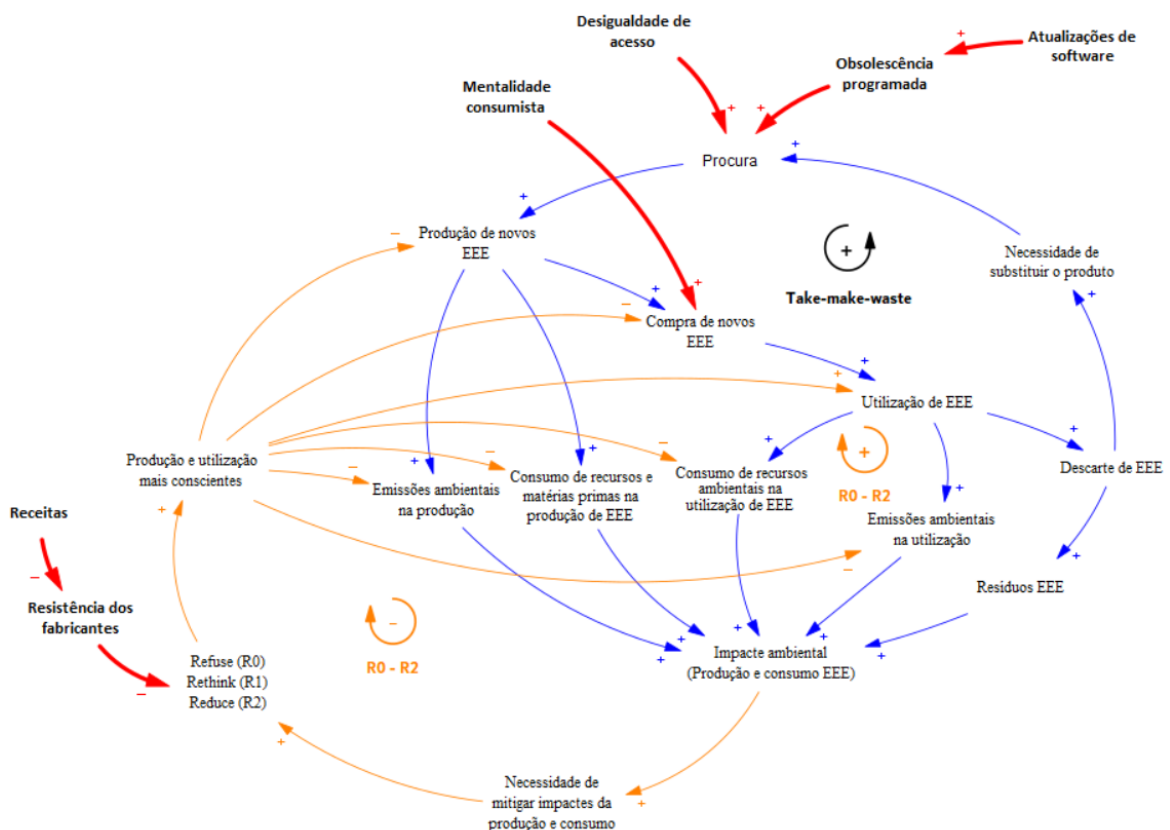


Figura 4.5 - Arquétipo causal para as estratégias do grupo R0–R2 com as principais barreiras à sua adoção.

Apesar destes constrangimentos, tanto os entrevistados como a literatura identificam oportunidades claras para potenciar o sucesso das estratégias R0–R2. Entre elas, os entrevistados destacaram a inovação em modelos de negócio circulares, como o leasing, o produto como serviço e as plataformas digitais de partilha e reparação, que podem desacelerar a produção e otimizar o uso de recursos (E1 e E2). Estas abordagens encontram suporte teórico em diversos estudos que demonstram o seu potencial para dissociar o crescimento económico do consumo de materiais e energia (Da Silva et al., 2024).

Outra oportunidade reconhecida diz respeito à educação e sensibilização do consumidor. O E3 sublinhou a necessidade de “campanhas de sensibilização e educação para

tentar mudar hábitos de consumo”, enquanto o E4 e E5 destacaram a importância de informação mais acessível e incentivos financeiros que incentivem a reparação e decisões de compra sustentáveis. Estes aspetos estão alinhados com as recomendações da literatura, que enfatiza o papel da consciencialização ambiental e da transparência na informação ao consumidor como fatores-chave para acelerar a adoção de práticas de consumo responsável (Rizos & Bryhn, 2022).

O seguinte diagrama causal (Figura 4.6) ilustra os pontos de intervenção destas oportunidades, adicionados no arquétipo inicial. A introdução de modelos de negócio circulares e a transparência na informação irá potenciar a produção e utilização mais conscientes provenientes da adoção do grupo de estratégias R0–R2. Para além disso, a promoção de campanhas de sensibilização e criação de incentivos financeiros podem reduzir a intenção de compra de novos EEE.

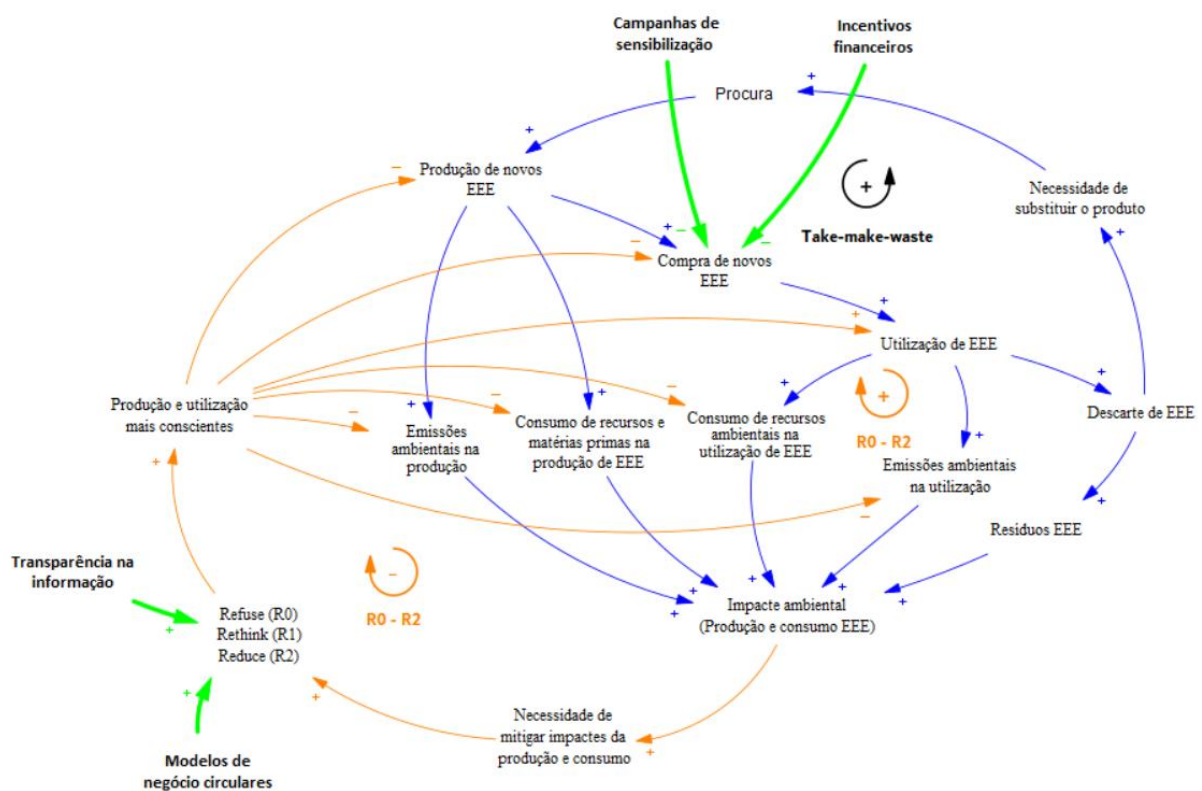


Figura 4.6 - Arquétipo causal para as estratégias do grupo R0–R2 com as principais oportunidades que facilitam a sua adoção.

Apesar das estratégias R0–R2 enfrentarem barreiras estruturais ligadas ao modelo económico dominante e ao comportamento do consumidor, apresentam oportunidades emergentes associadas à inovação empresarial e à transformação cultural. Os resultados

revelam que o sucesso destas estratégias depende não apenas de mudanças no design e na produção, mas também de mecanismos regulamentares e educativos capazes de reconfigurar a lógica de consumo.

4.2.2 Arquétipo causal para as estratégias do grupo R3–R7

A figura 4.7 mostra o diagrama causal referente ao grupo R3–R7, que contém estratégias que atuam sobretudo na fase de utilização e no fim de vida dos equipamentos, procurando prolongar a vida útil dos produtos e reduzir a produção de resíduos. Este grupo inclui estratégias como a Reutilização (R3), Reparação (R4), Recondicionamento (R5), Remanufatura (R6) e Reaproveitamento (R7), centradas em maximizar o valor existente nos equipamentos antes do seu descarte (Potting et al., 2017).

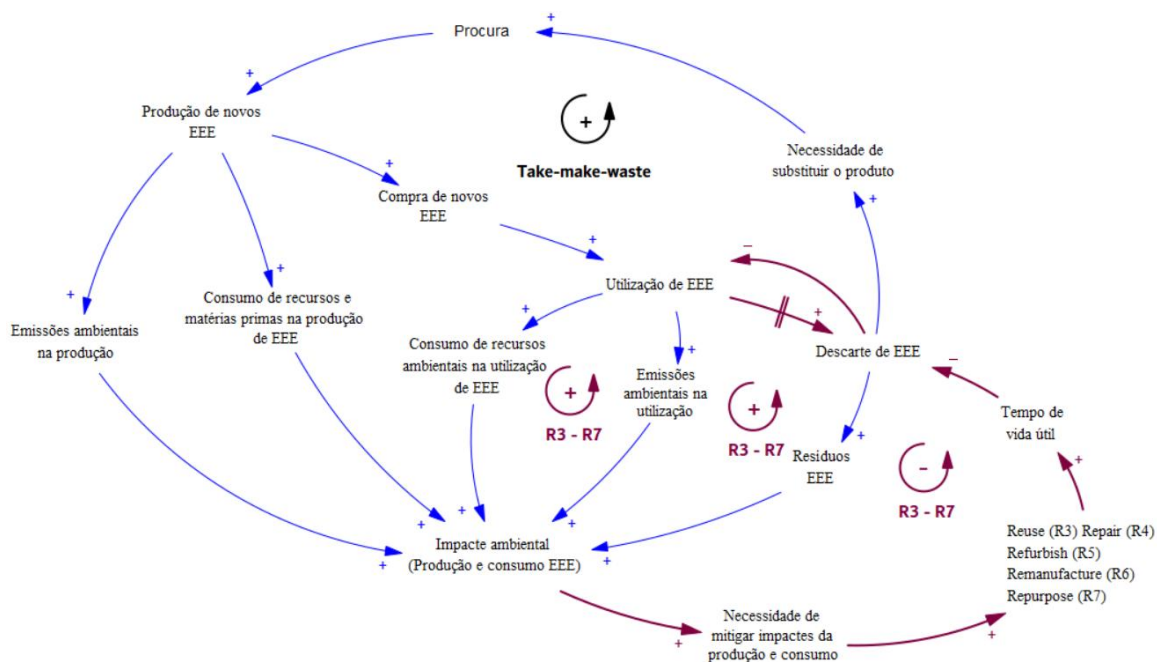


Figura 4.7 - Arquétipo causal para as estratégias do grupo R3–R7.

No diagrama observa-se que estas estratégias estabelecem relações negativas com o "descarte de EEE", diminuindo o volume de "resíduos EEE" e consequentemente aumentando a "utilização de EEE" que por sua vez introduz um *delay* no descarte. Assim, os ciclos de retroação positiva do sistema linear são contrariados pela criação de ciclos de retroação que retardam o ciclo de substituição.

Outro aspeto relevante é que as estratégias R3–R7 podem reduzir indiretamente os impactes ambientais ao evitar nova produção e, consequentemente, o consumo de recursos e as emissões associadas. Ainda que não eliminem o padrão linear, contribuem para desacoplar parcialmente a utilização de equipamentos da produção imediata de resíduos. No entanto ao

aumentarem o tempo de vida útil dos produtos, o consumo de recursos e emissões totais associados à utilização poderão aumentar, sendo importante ter em consideração a eficiência destes EEE.

O gráfico apresentado (Figura 4.8) constitui uma proposta de representação do comportamento dinâmico de referência no caso de uma implementação eficaz das estratégias R3–R7. Este gráfico dá continuidade ao cenário "*take-make-waste*" ilustrado na Figura 4.2.

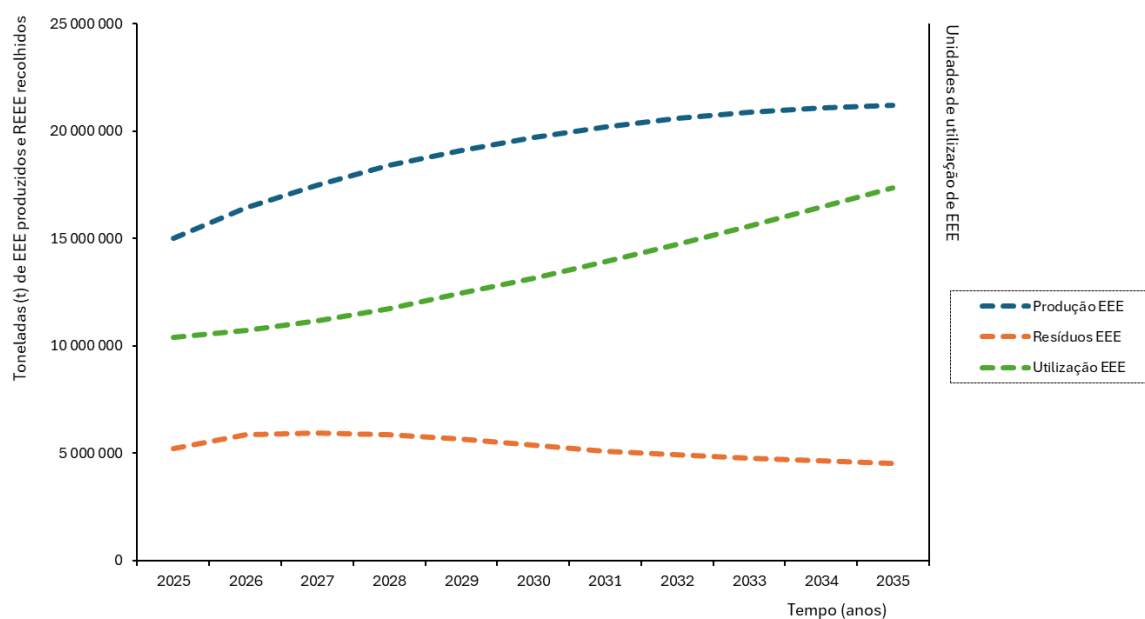


Figura 4.8 - Comportamento dinâmico de referência associado a um cenário de adoção das estratégias R3-R7.

Neste cenário, observa-se uma tendência moderadamente crescente da produção de EEE, representada pela linha azul, indicando que, embora as estratégias R3–R7 reduzam a necessidade de novos produtos, a produção não é eliminada, mantendo-se um volume estável que garante o fornecimento de bens substituídos ou atualizados. Este comportamento reflete um equilíbrio entre a produção e a extensão do ciclo de vida dos equipamentos, característico de economias que começam a integrar processos circulares sem romper totalmente com o modelo linear.

A utilização de EEE, apresenta uma subida mais acentuada, simbolizando o aumento da vida útil média dos equipamentos e uma melhor utilização dos recursos já existentes. Esse crescimento traduz o sucesso das estratégias de reparação e remanufatura, que permitem manter produtos em funcionamento durante mais tempo, ampliando a base instalada e reduzindo a pressão sobre a extração de matérias-primas.

Por outro lado, os resíduos EEE mostram, por hipótese, uma dissociação absoluta, refletindo uma o objetivo das estratégias intermédias da circularidade ao retardar a fase de descarte dos produtos, diminuindo o volume de resíduos gerados.

Assim, o gráfico demonstra que, num cenário de aplicação das estratégias R3–R7, o sistema tende a alcançar um nível de utilização mais elevado e sustentado dos equipamentos, e os resíduos EEE irão reduzir e permanecer controlados. Em termos sistémicos, este comportamento representa uma fase de transição entre o modelo linear e um modelo mais circular. No entanto a eficácia destas estratégias depende não apenas da extensão da vida útil dos produtos, mas também da eficiência energética e tecnológica dos equipamentos em circulação.

A Tabela 4.4 apresenta uma síntese das respostas de cada um dos entrevistados relativamente aos efeitos genéricos no ciclo de vida associados à adoção das estratégias R3–R7. Esta sistematização permite identificar as principais perceções quanto à eficácia destas estratégias na extensão da vida útil dos produtos e na redução do descarte prematuro, assim como as limitações e riscos associados à sua implementação.

Tabela 4.4 - Síntese das respostas dos entrevistados relativamente aos efeitos genéricos das estratégias R3-R7 na cadeia de valor dos EEE.

Questão	Entrevistado 1	Entrevistado 2	Entrevistado 3	Entrevistado 4	Entrevistado 5
Efeitos gerais das estratégias R3-R7	Prolongam significativamente a vida útil dos produtos e componentes, reduzindo a necessidade de novos EEE.	Atuam numa fase posterior ao design, reduzindo a extração de matérias-primas.	Retardam o descarte e reduzem a produção de resíduos.	Estratégias centrais; reduzem desperdício e necessidade de novos produtos, poupando recursos.	Para além do aspecto ambiental, estas estratégias promovem uma nova indústria para prolongar a vida útil dos produtos.
Efeitos propostos (diminuição do descarte, maior utilização)	Concorda.	Concorda.	Concorda.	Concorda.	Concorda.

Todos os entrevistados reconheceram que estas estratégias reduzem a necessidade de produzir novos equipamentos e poupam recursos, constituindo um dos caminhos mais eficazes para atrasar o descarte e diminuir a pressão sobre matérias-primas críticas. O E1 reforçou esta visão ao salientar que “prolongam significativamente a vida útil dos produtos e componentes, reduzindo a necessidade de produção de novos equipamentos”, enquanto o E3 sintetizou o efeito geral destas estratégias afirmando que “têm o objetivo de retardar o descarte do produto e consequentemente reduzir a produção de resíduos”, confirmando as relações causais representadas no diagrama do grupo R3–R7.

Os entrevistados também destacaram a importância destas estratégias na criação de novas cadeias de valor associadas à reparação e à remanufatura, com potencial para gerar emprego local e fomentar economias regionais circulares. Contudo, foi igualmente reconhecido que a eficácia destas práticas depende de condições estruturais de design e mercado. O E2 observou que “estas estratégias atuam numa fase em que o produto já se encontra no mercado, logo as escolhas de design já foram tomadas”, alertando para a dificuldade de aplicar reparação ou remanufatura a produtos originalmente concebidos sob uma lógica linear. Esta limitação confirma a interdependência entre os grupos de estratégias: o sucesso das R3–R7 depende da integração prévia dos princípios de reparabilidade e modularidade promovidos nas R0–R2.

Os entrevistados identificaram ainda um conjunto de possíveis efeitos indesejados, barreiras técnicas, económicas e organizacionais que dificultam o prolongamento da vida útil dos produtos. Paralelamente, reconheceram oportunidades de melhoria associadas a políticas públicas, novos modelos de negócio e maior proximidade entre produtores e consumidores.

A Tabela 4.5 apresenta a síntese dos efeitos indesejados mencionados pelos participantes para este grupo de estratégias.

Tabela 4.5 - Síntese dos efeitos secundários não desejados resultantes da adoção das estratégias R3-R7 mencionados pelos entrevistados

Questão	Entrevistado 1	Entrevistado 2	Entrevistado 3	Entrevistado 4	Entrevistado 5
Efeitos secundários não desejados R3-R7	Perda de eficiência energética e riscos de segurança em produtos reconicionados por operadores informais.	Coexistência de produtos reconicionados e novos no mercado, aumentando a produção global.	Prolongar o uso de produtos ineficientes pode gerar impactes na fase de utilização.	Risco de manter equipamentos energeticamente ineficientes, contrariando os ganhos ambientais esperados.	Desvantagens para as empresas multinacionais que podem não lucrar com a revenda destes produtos e/ou serviços

Os efeitos indesejados mencionados nas entrevistas relacionam-se sobretudo com a eficiência energética e o impacto ambiental indireto do prolongamento de vida dos produtos. Vários entrevistados alertaram que a extensão do uso de equipamentos antigos pode “conduzir a perdas de eficiência energética” (E1, E3 e E4), e que, em certos casos, “prolongar o uso de produtos ineficientes pode causar impactes adicionais na fase de utilização”. Esta contradição, também evidenciada por Guzzo et al. (2024), reflete um típico efeito ricochete, em que ações concebidas para reduzir o consumo de recursos ou prolongar a utilização de bens podem, paradoxalmente, gerar aumentos indiretos de consumo energético e de emissões totais do sistema, comprometendo a eficácia ambiental global.

Os E2 e E5 mencionaram ainda, respetivamente, o problema de “não se fazer uma substituição efetiva de produtos lineares por circulares, e acabarem ambos os produtos a ser colocados nos mercados” e a “a perda de receitas para os fabricantes e empresas que não se responsabilizam pela adoção deste tipo de estratégias”.

Para além dos efeitos indesejados mencionados foram identificados as principais barreiras e oportunidades associadas à adoção de estratégias circulares no setor dos EEE. A Tabela 4.6 apresenta a síntese das principais barreiras e oportunidades identificadas pelos participantes que podem ser associadas a este grupo de estratégias.

Tabela 4.6 - Síntese das principais barreiras e oportunidades associadas à adoção de estratégias R3-R7 identificadas pelos entrevistados.

Barreiras	Oportunidades
<ul style="list-style-type: none"> - Custos de reparação superiores ao valor do produto (E4); - Indisponibilidade de peças (E4); - Ausência de infraestrutura e logística (E1 e E5); - Design não orientado para reparação (E2). 	<ul style="list-style-type: none"> - Plataformas de reparação e acondicionamento (E1); - Cadeias de valor curtas (E2); - Políticas públicas como o Direito à Reparação (E3); - Incentivos e programas de sensibilização (E3).

Entre as principais barreiras identificadas destacam-se os custos de reparação, frequentemente superiores ao preço de um produto novo. O E4 referiu que “as operações de reparação podem ser mais caras do que a compra de um produto novo, o que afasta os consumidores”. O E4 também mencionou que a indisponibilidade de peças de substituição e a falta de informação sobre durabilidade e reparabilidade são fatores que reduzem a confiança do consumidor e desincentivam o prolongamento da vida útil dos equipamentos. Estes obstáculos são confirmados na literatura, que aponta o custo, a complexidade técnica e a escassez de componentes compatíveis como entraves críticos à economia da reparação (Svensson-Hoglund et al., 2021).

O E1 e E5 destacaram a falta de infraestruturas e logística para recolha e reparação eficiente, reforçando que a ausência de sistemas integrados impede o retorno eficaz dos produtos à cadeia de valor. O E2 acrescentou que “os produtos não são pensados para o que fazer no final da vida útil”, evidenciando a necessidade de design para reparação e modularidade. Estas perceções convergem com a literatura, que enfatiza a importância de políticas de eco design e padronização de componentes como mecanismos essenciais para facilitar o acondicionamento e a remanufatura (Rizos & Bryhn, 2022).

O diagrama causal (Figura 4.9) destaca as principais barreiras e efeitos indesejados mencionados pelos entrevistados e os seus pontos de intervenção. O custo de reparação, identificado como um dos principais fatores que desincentiva o consumidor a optar pela reparação ou reutilização e consequentemente, aumenta a compra de novos EEE. Outras barreiras significativas são a indisponibilidade de peças e a falta de infraestruturas e logística que enfraquecem os ciclos de retroação introduzidos pelas estratégias R3–R7. Além disso, a ineficiência energética de produtos mais antigos constitui outro ponto crítico. Embora as estratégias R3–R7 procurem maximizar o uso de produtos existentes, a sua utilização prolongada pode gerar um *rebound effect*, ao aumentar o consumo de energia e emissões na fase de uso. Assim, produtos ineficientes prolongados no mercado acabam por contrariar os objetivos de mitigação de impacto, como representado pelos ciclos de retroação positiva no diagrama.

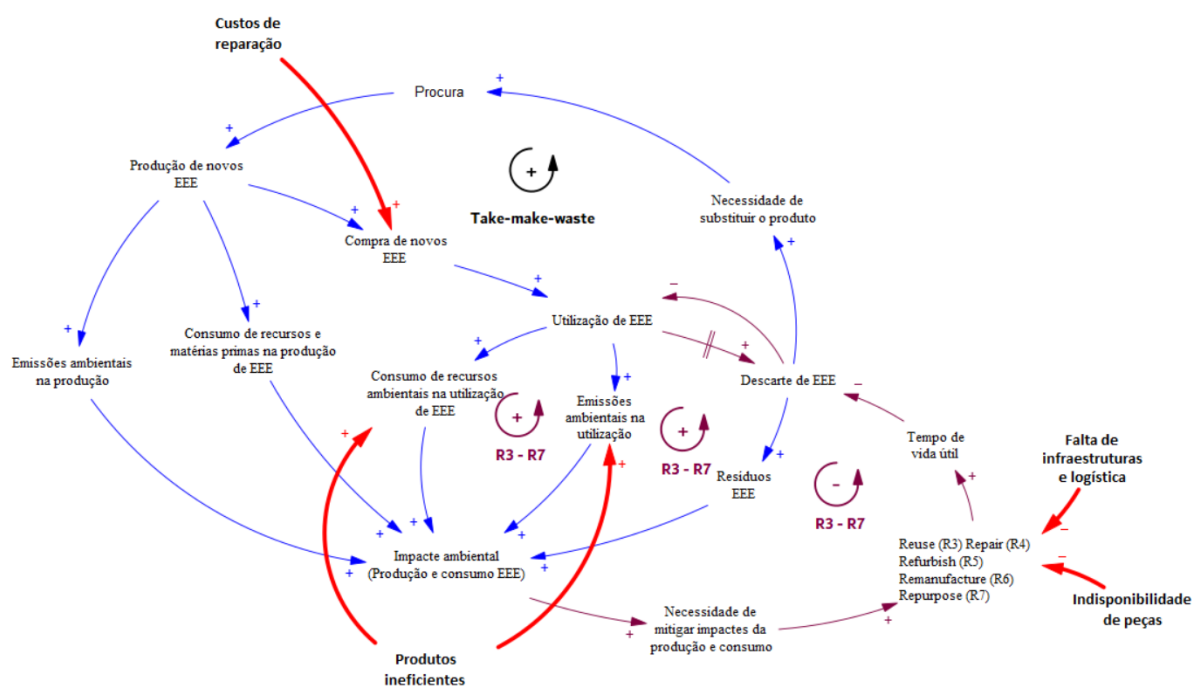


Figura 4.9 - Arquétipo causal para as estratégias do grupo R3–R7 com as principais barreiras à sua adoção.

Apesar dessas limitações, os entrevistados reconheceram um conjunto de oportunidades significativas associadas à implementação de políticas e modelos de negócio favoráveis. O E1 apontou as plataformas de reparação e recondicionamento como instrumentos capazes de criar valor económico e social, enquanto o E2 defendeu a criação de cadeias de valor mais curtas e produção mais próxima dos consumidores, facilitando operações de manutenção e reparação. O E3 sublinhou o papel das políticas públicas, como o Direito à Reparação, na

criação de incentivos que promovam a reparabilidade e a reutilização. Estas perceções são comprovadas pela literatura, que identifica políticas de responsabilização do produtor, incentivos fiscais e inovação colaborativa como fatores decisivos para viabilizar as estratégias R3–R7 (Rizos & Bryhn, 2022).

No diagrama causal (Figura 4.10) é possível observar os pontos de atuação das oportunidades identificadas pelos entrevistados. Cadeias de valor curtas e plataformas de reparação são dois fatores que fortalecem os ciclos de retroação introduzidos pelas estratégias R3–R7. Já as campanhas de sensibilização e incentivos financeiros podem promover a reparação e reutilização, diminuindo a necessidade de substituir o produto.

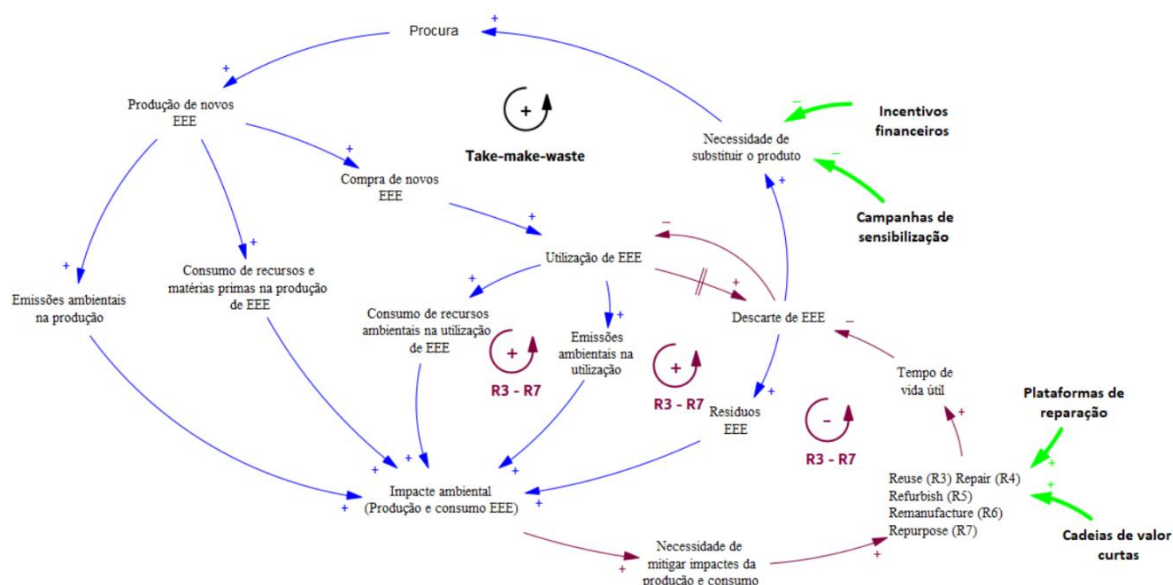


Figura 4.10 - Arquétipo causal para as estratégias do grupo R3–R7 com as principais oportunidades que facilitam a sua adoção.

As estratégias R3–R7 apresentam assim um elevado potencial para reduzir o desperdício e prolongar a vida útil dos equipamentos, mas a sua eficácia depende da superação das barreiras técnicas e económicas que limitam o acesso e a viabilidade das reparações. A convergência entre as perceções dos *stakeholders* e a evidência científica reforça a necessidade de políticas estruturais e infraestruturas adequadas, capazes de transformar a reparação e o acondicionamento em práticas acessíveis, eficientes e amplamente disseminadas.

4.2.3 Arquétipo causal para as estratégias do grupo R8–R9

O diagrama causal referente ao grupo R8–R9 (Figura 4.11) integra as estratégias de Reciclagem (R8) e Recuperação (R9), que atuam essencialmente no fim de vida dos EEE. Estas medidas centram-se no reaproveitamento dos materiais e recursos contidos nos resíduos,

reduzindo parcialmente a dependência de matérias-primas virgens e mitigando alguns dos impactos ambientais associados à produção.

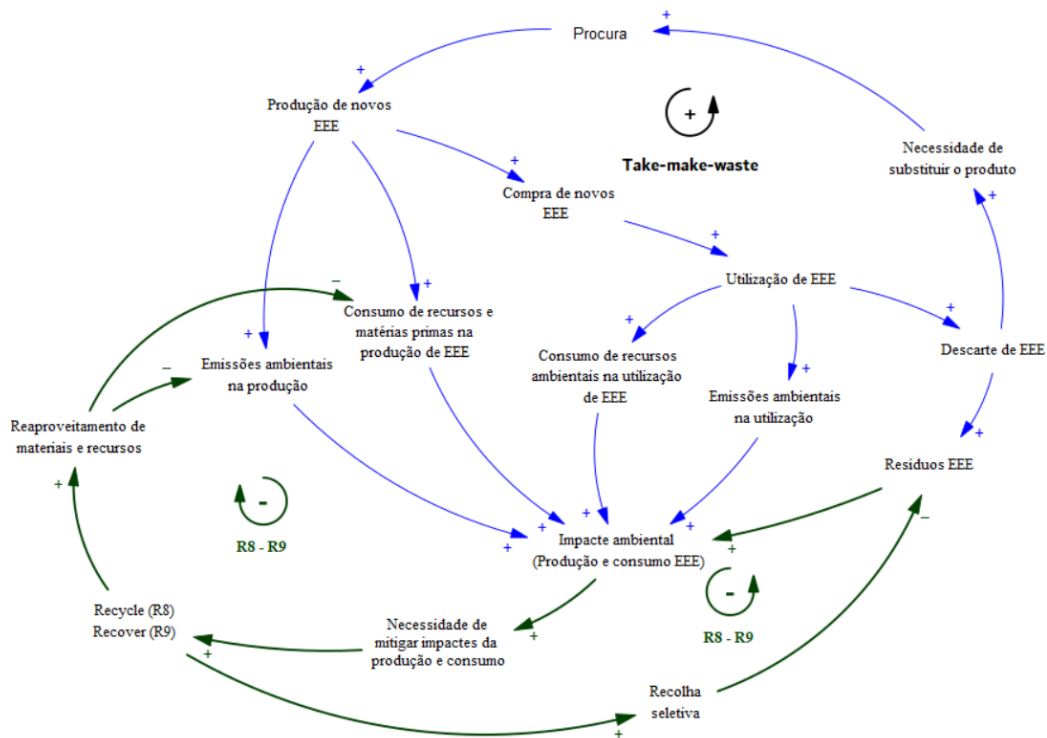


Figura 4.11 - Arquétipo causal para as estratégias do grupo R8-R9.

No modelo observa-se que o reaproveitamento de materiais e recursos estabelece uma relação negativa com o consumo de matérias-primas na produção, funcionando como um mecanismo de substituição parcial de recursos extraídos da natureza. Por sua vez, esta prática poderá contribuir teoricamente para a redução de emissões ambientais na fase de produção (ainda que a polaridade desta relação causa-efeito dependa da avaliação caso-a-caso dos ganhos ambientais líquidos observados com os processos de reciclagem). O ciclo formado entre resíduos de EEE, reciclagem e reaproveitamento cria um ciclo de retroação negativa que limita, mas não elimina, a evolução crescente do impacto ambiental.

O gráfico apresentado (Figura 4.12) corresponde a uma projeção hipotética do comportamento dinâmico do sistema no contexto de aplicação das estratégias R8-R9. O gráfico representa a continuação do cenário linear "take-make-waste" apresentado na Figura 4.2.

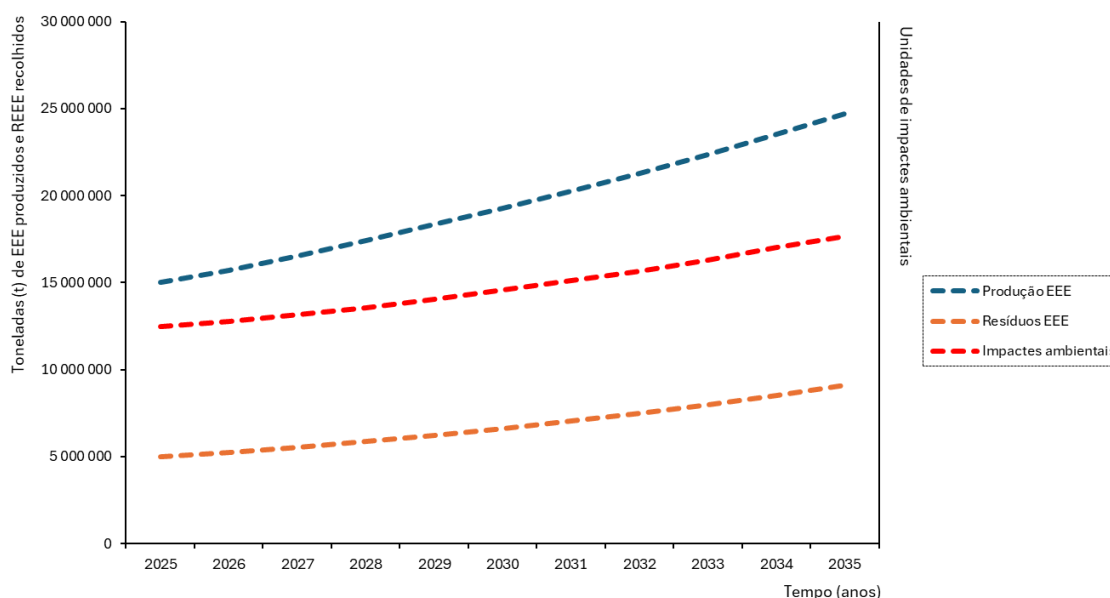


Figura 4.12 - Comportamento dinâmico de referência associado a um cenário de adoção das estratégias R8-R9.

Neste cenário, observa-se uma tendência acentuada do crescimento da produção de EEE. Este comportamento sugere que, embora as estratégias de reciclagem e recuperação contribuam para mitigar parte dos impactos ambientais e reduzir a deposição de resíduos, não incidem na causa estrutural do problema, o aumento da produção e do consumo. Ou seja, a implementação eficaz destas estratégias pode somente contribuir para uma dissociação relativa dos impactos da produção e dos resíduos, sem travar o fluxo de entrada de novos produtos no mercado.

Os resíduos de EEE também apresentam um crescimento progressivo, refletindo o limite de eficácia das estratégias R8–R9. Mesmo com taxas de recolha e reciclagem mais elevadas, o volume absoluto de resíduos tende a aumentar em função do crescimento da produção. Este comportamento reforça a ideia de que a reciclagem, embora essencial, não é suficiente para alcançar a circularidade plena, pois apenas fecha parcialmente os ciclos de materiais.

Nos impactos ambientais, nota-se igualmente uma trajetória ascendente, embora com um ritmo inferior ao da produção. Este padrão indica que as melhorias na gestão de resíduos e na recuperação de materiais permitem reduzir a intensidade dos impactos por unidade produzida, mas não impedem o aumento absoluto das pressões ambientais. O acréscimo contínuo de produção implica maior consumo energético, maior extração de recursos e emissões associadas aos processos de fabrico e transporte, fatores que a reciclagem sozinha não consegue compensar.

Em termos sistêmicos, o gráfico evidencia um cenário de mitigação parcial, em que as estratégias R8–R9 funcionam como mecanismos de contenção dentro de um sistema que continua dominado pela lógica de crescimento e substituição. Assim, mesmo com melhorias na eficiência e na recuperação de materiais, o sistema mantém o ciclo de retroação positiva associado ao sistema "*take-make-waste*", onde o aumento da produção conduz inevitavelmente a mais resíduos e a maiores impactos ambientais. Este comportamento reforça a necessidade de articular as estratégias R8–R9 com medidas preventivas (R0–R2) e de prolongamento da vida útil (R3–R7), de forma a inverter a tendência de crescimento cumulativo e promover uma transição efetiva para a circularidade.

A Tabela 4.7 sintetiza as respostas de cada um dos entrevistados relativamente aos efeitos genéricos no ciclo de vida associados às estratégias R8–R9, centradas na Reciclagem e Recuperação. Esta tabela evidencia as percepções sobre o papel destas estratégias na mitigação dos impactos de fim de vida dos equipamentos elétricos e eletrônicos, destacando simultaneamente as suas potencialidades e limitações estruturais no contexto da economia circular.

Tabela 4.7 - Síntese das respostas dos entrevistados relativamente aos efeitos genéricos das estratégias R8-R9 na cadeia de valor dos EEE.

Questão	Entrevistado 1	Entrevistado 2	Entrevistado 3	Entrevistado 4	Entrevistado 5
Efeitos gerais das estratégias R8-R9	Permitem recuperar materiais valiosos e reduzir o envio de resíduos para aterro ou incineração.	Estratégia de baixo valor; não influencia a velocidade de produção e descarte.	Promovem a recuperação de materiais e a sua reintegração no processo produtivo.	Estratégias indispensáveis, mas complementares; última opção na hierarquia; reduzem resíduos.	Estratégias essenciais para promover a saúde pública e ambiental; também envolvem recolha e descontaminação.
Efeitos propostos (redução dos impactos ambientais da produção e REEE)	Concorda.	Concorda.	Concorda.	Concorda.	Concorda.

A análise das entrevistas demonstra consenso entre os participantes quanto ao papel essencial, mas limitado, das estratégias R8–R9 no ciclo de vida dos EEE. Todos os entrevistados reconheceram a sua importância no tratamento de fim de vida dos produtos, destacando a recuperação de materiais valiosos, a redução do volume de resíduos destinados a aterro e a consequente reintrodução no processo produtivo. Validando as relações causais representadas no diagrama do grupo R8–R9.

Contudo, todos os entrevistados enfatizaram que estas estratégias representam intervenções tardias no sistema, atuando apenas quando o produto já atingiu o fim do seu ciclo de vida. O E2 observou que "a reciclagem não tem qualquer tipo de influência na

velocidade com que se produz e descarta”, considerando-a “uma estratégia de baixo valor”. Esta percepção reflete a hierarquia da circularidade, onde as R8–R9 são reconhecidas como última linha de ação, com efeitos corretivos, mas sem capacidade de alterar os fluxos principais de produção e consumo, razão pela qual os entrevistados descrevem este grupo de estratégias como indispensáveis, mas complementares.

O E3 sublinhou que estas estratégias “encaminham os EEE para um processo de tratamento, desmantelamento e consequente reciclagem que promova a recuperação de materiais e componentes”, salientando que o reaproveitamento de matérias-primas críticas “é cada vez mais importante para reduzir a dependência de materiais virgens”. O E4 acrescentou que “devem ser vistas como última opção da hierarquia da circularidade, uma vez que têm impacto apenas no final da cadeia”, alertando que, apesar de reduzirem o volume de resíduos, “continuam a ser processos dispendiosos e envolver perdas de qualidade”.

O E5 fez uma crítica ao modelo dos 9 R’s mencionando que neste grupo de estratégias “falta a consideração pela recolha e descontaminação dos produtos”.

Os entrevistados também destacaram efeitos secundários indesejados, barreiras e oportunidades associadas à adoção deste grupo de estratégias.

A Tabela 4.8 sintetiza os principais efeitos indesejados mencionados pelos entrevistados no âmbito da adoção de estratégias de fim de vida.

Tabela 4.8 - Síntese dos efeitos secundários não desejados resultantes da adoção das estratégias R8-R9 mencionados pelos entrevistados.

Questão	Entrevistado 1	Entrevistado 2	Entrevistado 3	Entrevistado 4	Entrevistado 5
Efeitos secundários não desejados R8-R9	<i>Downcycling</i> que leva à perda de qualidade dos materiais. Percepção de que tudo é reciclável, incentivando consumo excessivo.	A reciclagem não altera a velocidade de produção/descarte; <i>downcycling</i> generalizado.	Não impede o crescimento do mercado de produtos novos.	Perdas de qualidade e falsa sensação de compensação ambiental, levando o consumidor a considerar a reciclagem suficiente.	Pouco eficaz quando as empresas preferem pagar taxas em vez de cumprir as metas de recolha. Pouca adesão dos consumidores sem incentivos.

A maior parte dos entrevistados destacou como principais efeitos indesejados associados às estratégias R8–R9, o fenómeno do *downcycling*, onde “os materiais reciclados perdem qualidade” (E1 e E2), e a percepção errada de que “tudo é reciclável”, o que pode incentivar o consumo excessivo (E1).

O E5 destacou a fraca adesão de empresas porque lhes “compensa lhes serem penalizadas em vez de investir na eficiência e infraestruturas de apoio aos processos de recolha” e a fraca adesão dos consumidores que “sem incentivos é difícil chamar a atenção total da população”.

Associadas a estas estratégias foram ainda alocadas as barreiras e oportunidades à adoção de estratégias de economia circular, identificadas pelos entrevistados (Tabela 4.9).

Tabela 4.9 - Síntese das principais barreiras e oportunidades associadas à adoção de estratégias R8-R9 identificadas pelos entrevistados.

Barreiras	Oportunidades
<ul style="list-style-type: none"> - Falta de harmonização de materiais (E3); - Descentralização da produção (E2 e E3); - Ausência de infraestrutura para recolha e tratamento (E1 e E5); - Dificuldade de reciclagem de produtos complexos (E3). 	<ul style="list-style-type: none"> - Digitalização e rastreabilidade (E1); - Incentivos e políticas públicas de recolha (E3 e E5); - Inovação tecnológica para eficiência de reciclagem (E1).

Uma das barreiras mais salientadas foi a falta de harmonização de materiais e processos entre marcas, apontada pelo E3, que defendeu que “deveria haver uma harmonização entre as várias marcas para usarem os mesmos plásticos e materiais”. A ausência de padronização torna o processo de reciclagem tecnicamente mais complexo e dispendioso, uma constatação confirmada pela literatura sobre reciclagem de EEE (Rizos & Bryhn, 2022). O E2 e E3 mencionaram ainda que a descentralização da produção dificulta a reincorporação dos materiais reciclados no processo produtivo, o que está em linha com estudos que alertam para o impacto da globalização das cadeias de valor na eficiência das operações de reciclagem (Rizos & Bryhn, 2022).

E1 e E5 reforçaram o problema da falta de infraestrutura e logística adequada para a recolha e o tratamento de resíduos eletrónicos, o que leva a fluxos informais e a perdas significativas de materiais recuperáveis. Esta limitação é reconhecida também na literatura, que associa a ausência de infraestruturas integradas à ineficiência das operações de recolha e à baixa taxa de reciclagem efetiva (May & Steuer, 2025).

O diagrama causal (Figura 4.13) evidencia as principais barreiras estruturais associadas às estratégias R8–R9, introduzindo novas ligações que comprometem a eficiência do sistema circular. A complexidade crescente dos produtos eletrónicos, combinada com a falta de harmonização dos materiais e o *downcycling*, reduz a capacidade de reaproveitamento eficaz. Esta limitação afeta diretamente o ciclo de reaproveitamento de materiais e recursos, diminuindo o potencial de redução do consumo de matérias-primas e de emissões na produção. Paralelamente, a ausência de infraestruturas adequadas de recolha e separação seletiva fragiliza o fluxo de retorno de resíduos, dificultando o fecho dos ciclos de reciclagem e recuperação. Estes constrangimentos interrompem a relação entre a recolha seletiva, o reaproveitamento de materiais e a diminuição do impacto ambiental, perpetuando a

dependência do sistema linear e limitando a capacidade das estratégias R8–R9 de contribuir efetivamente para a mitigação dos impactos do setor dos eletrônicos.

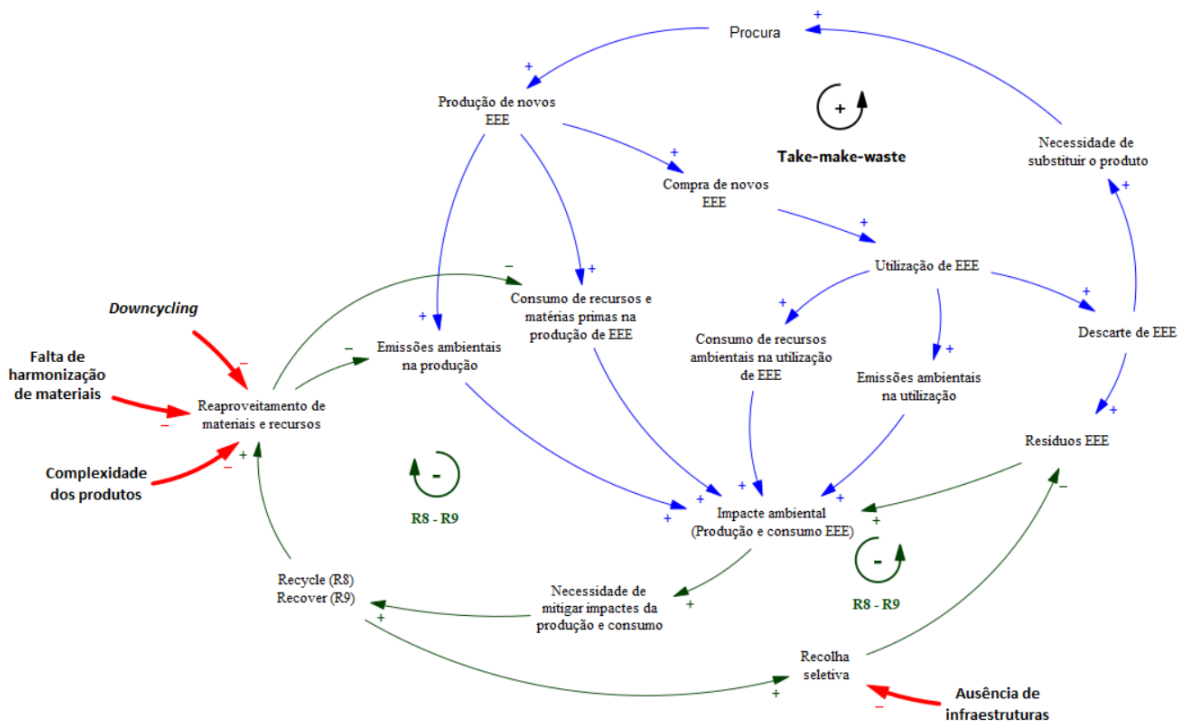


Figura 4.13 - Arquétipo causal para as estratégias do grupo R8–R9 com as principais barreiras à sua adoção.

Os entrevistados também apontaram várias oportunidades emergentes associadas ao avanço tecnológico e à regulamentação. O E1 salientou a importância da digitalização e inovação tecnológica na “melhoria da rastreabilidade e eficiência das operações de reciclagem”, enquanto E3 e E5 destacaram o papel de incentivos e políticas públicas eficazes para garantir o retorno dos produtos ao circuito formal. Estas perceções convergem com a literatura, que identifica a integração de tecnologias digitais, eco design e regulamentação robusta como fatores críticos para fortalecer o desempenho ambiental das estratégias R8–R9 (Rizos & Bryhn, 2022; Da Silva et al., 2024).

No diagrama causal (Figura 4.14) é possível observar o efeito sistémico destas oportunidades. A constante inovação tecnológica promove a melhoria da eficiência na reciclagem e o aumento da digitalização e rastreabilidade que contribuem para o objetivo de reaproveitamento de materiais e recursos das estratégias R8-R9. Além disso, os incentivos financeiros podem assegurar o descarte devido dos EEE e aumentar assim a sua recolha seletiva, fortalecendo o ciclo de retroação negativa associado aos resíduos EEE.

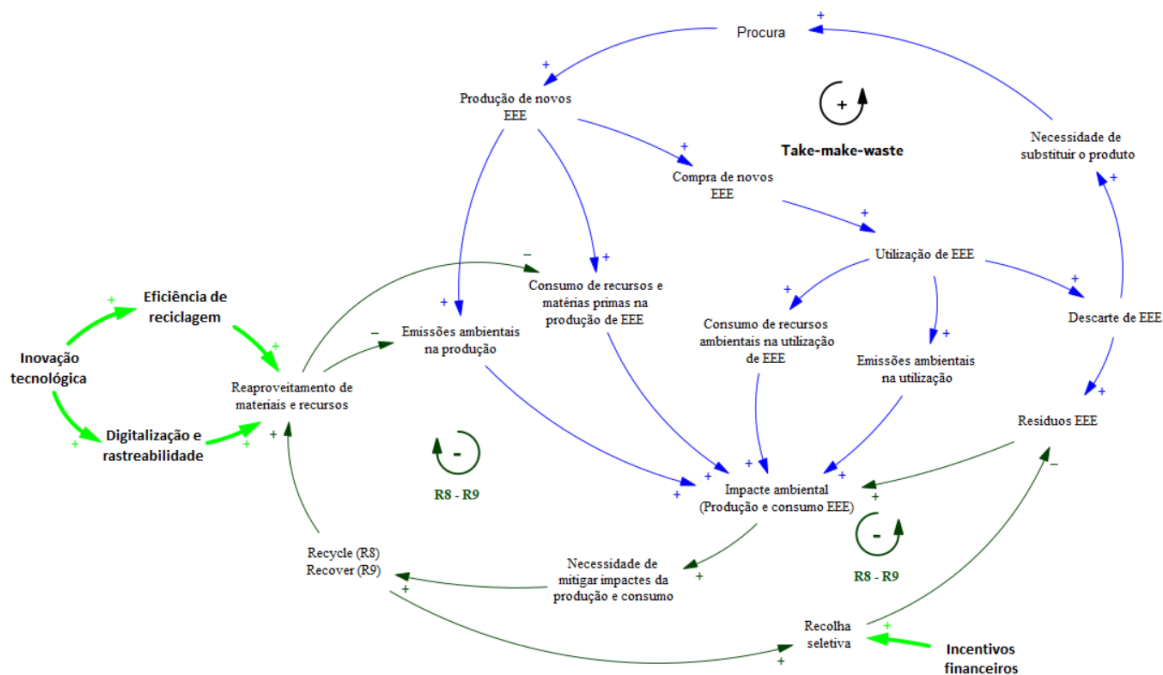


Figura 4.14 - Arquetipo causal para as estratégias do grupo R8–R9 com as principais oportunidades que facilitam a sua adoção.

Embora indispensáveis para reduzir o impacto do fim de vida dos equipamentos, as estratégias R8–R9 mantêm limitações estruturais e simbólicas que restringem a sua contribuição para a circularidade plena. A combinação de melhorias tecnológicas, harmonização de processos e incentivos regulamentares surge, portanto, como condição essencial para transformar a reciclagem e a recuperação em instrumentos realmente eficazes dentro da transição para a economia circular.

4.3 Aplicação dos arquetipos na análise de políticas

A transição para uma economia circular no setor dos equipamentos elétricos e eletrónicos tem sido apoiada por um conjunto progressivo de políticas europeias que procuram traduzir os princípios da circularidade em instrumentos regulamentares concretos. Estas políticas oferecem uma oportunidade para o teste dos arquetipos causais identificados, no sentido de facilitar a interpretação dos efeitos introduzidos pelas medidas e instrumentos normativos, económicos e informativos que atuam em diferentes fases do ciclo de vida dos produtos.

A análise desenvolvida neste tópico integra duas dimensões complementares: (i) a legislação europeia, que define juridicamente as ações e obrigações associadas a cada política e (ii) as perceções dos *stakeholders* entrevistados, que permitem avaliar a aplicabilidade prática e os desafios de implementação no contexto real das empresas e entidades do setor.

Por uma questão prática, dado o número de medidas e instrumentos das diversas políticas, foram selecionadas apenas algumas medidas representativas de cada política, priorizando aquelas com maior relevância para o presente estudo. Nas entrevistas, cada participante foi questionado sobre uma medida específica por política, de forma a garantir a profundidade da discussão sem comprometer a clareza e a comparação entre os resultados. Assim, o presente tópico apresenta uma análise sintética e integrada, que combina evidência documental e empírica para compreender de que modo as políticas públicas reforçam ou condicionam a operacionalização dos diferentes grupos de estratégias de circularidade.

4.3.1 Políticas associadas ao grupo de estratégias R0-R2

4.3.1.1 Diretiva RoHS

A RoHS constitui um dos principais instrumentos regulamentares da União Europeia aplicada ao setor eletrónico. O seu foco na restrição de substâncias perigosas durante o design e fabrico dos equipamentos insere-se nas estratégias R0-R2, atuando sobre a origem dos impactes ambientais e prevenindo a produção de resíduos tóxicos ao longo do ciclo de vida dos produtos. Ao limitar a presença de metais pesados nos equipamentos elétricos e eletrónicos, a RoHS reduz a toxicidade dos materiais e a complexidade dos processos de reciclagem, reforçando as condições para um fabrico mais limpo e sustentável (Diretiva 2011/65/UE, 2011). Além da proibição direta de determinadas substâncias, a diretiva promove a sua substituição por alternativas mais seguras (Diretiva 2011/65/UE, 2011).

E1 e E5 sublinharam que estas estratégias atuam de forma preventiva, evitando a produção e consumo desnecessário logo na origem, e que a sua implementação implica uma menor pressão sobre recursos naturais e menor necessidade de extração de matérias-primas críticas. Este testemunho coincide com o que RoHS preconiza, relativamente ao controlo de riscos ambientais e à promoção de uma indústria eletrónica mais segura e eficiente (Diretiva 2011/65/UE, 2011).

No diagrama causal do grupo R0-R2 (Figura 4.15), a RoHS é assim representada como um potenciador dos princípios associados a este grupo de estratégias incidindo principalmente na redução da produção de EEE constituídos por substâncias perigosas. A sua aplicação gera efeitos estabilizadores no sistema, limitando a propagação dos ciclos de retroação positiva típicos do modelo linear de produção e consumo. Deste modo, a RoHS não apenas contribui para a redução dos impactes ambientais diretos, mas também estabelece as

bases normativas e técnicas que permitem a adoção futura de estratégias circulares complementares, como a reutilização e a reciclagem.

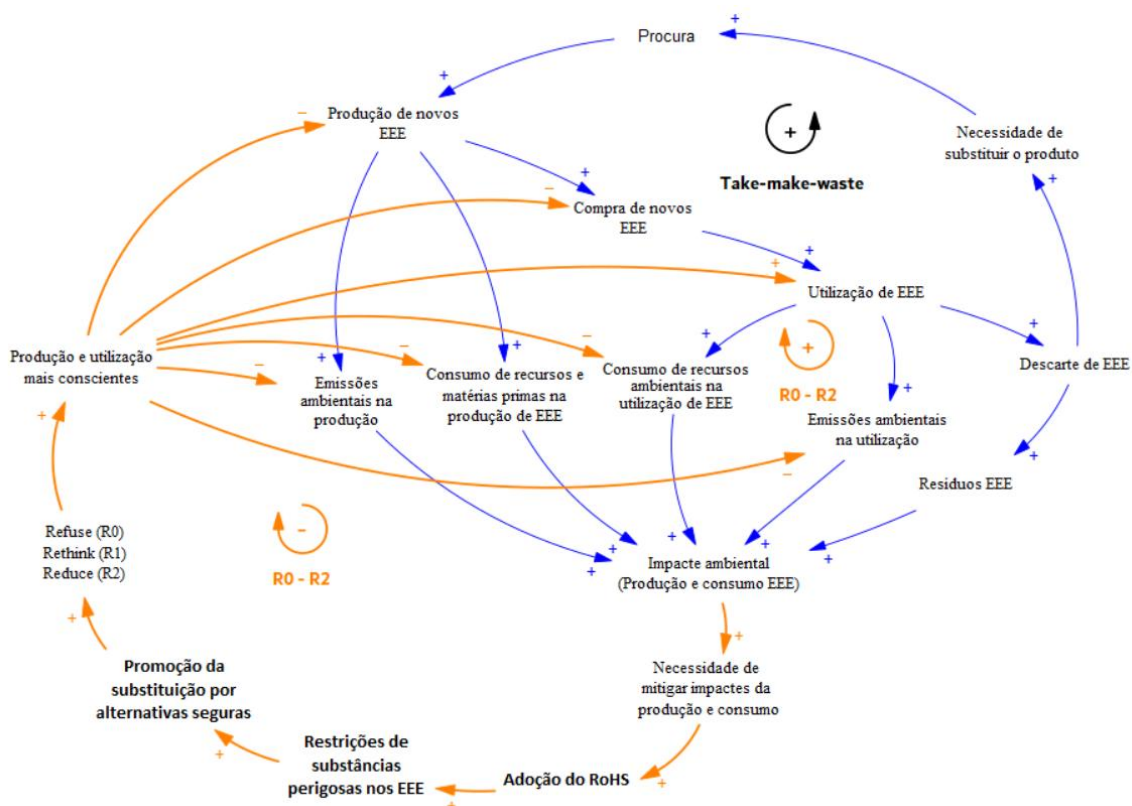


Figura 4.15 - Arquétipo causal R0-R2 aplicado à política RoHS.

A Diretiva RoHS consolida-se como uma das principais políticas preventivas no contexto da economia circular europeia. Ao atuar sobre a fase inicial do ciclo de vida dos produtos, esta diretiva estabelece as bases para a conceção sustentável e para a eliminação progressiva de substâncias perigosas, reduzindo a produção de produtos com impacto ambiental e riscos para a saúde humana. A sua implementação reforça o alinhamento entre regulamentação ambiental, inovação tecnológica e competitividade industrial, contribuindo para a construção de um sistema produtivo mais limpo e resiliente.

4.3.2 Políticas associadas ao grupo de estratégias R3-R7

4.3.2.1 Direito à reparação

O Direito à Reparação constitui um dos instrumentos legislativos mais recentes da União Europeia e representa um marco na consolidação das estratégias R3–R7. Ao introduzir regras comuns sobre a reparação de bens, a Diretiva visa garantir uma maior durabilidade dos

produtos, reduzir a eliminação prematura de equipamentos viáveis e promover práticas de consumo mais sustentáveis (Diretiva (UE) 2024/1799, 2024). Esta política enquadra-se particularmente nas estratégias R3 e R4, uma vez que atua sobre a extensão da vida útil dos produtos e incentiva a criação de um mercado secundário baseado na manutenção, na reparação e na reutilização.

Entre as medidas introduzidas, destaca-se a obrigação de reparação por parte dos fabricantes, que impõe às empresas o dever de proceder à reparação de bens sempre que estes estejam abrangidos por requisitos de reparabilidade definidos em atos jurídicos da União Europeia. Esta disposição assegura o acesso dos consumidores à reparação como um direito, alterando a lógica de mercado que favorecia a substituição em detrimento da manutenção (Diretiva (UE) 2024/1799, 2024).

Complementarmente, a extensão da garantia pós-reparação introduz um incentivo adicional para o consumidor optar pela reparação. Ao prolongar o período de responsabilidade do fabricante após a intervenção técnica, a medida reduz a perceção de risco associada à reparação e reforça a confiança do consumidor em produtos reconicionados (Diretiva (UE) 2024/1799, 2024). Este mecanismo contribui para o equilíbrio do sistema, incentivando decisões de consumo que favorecem a longevidade dos equipamentos e a redução das pressões ambientais ligadas à produção e descarte.

A criação de uma plataforma europeia de reparação representa, contudo, o elemento mais inovador da diretiva, atuando como catalisador das estratégias R3-R7. A plataforma funcionará como um ponto central de informação e acesso, permitindo aos consumidores localizar reparadores, comparar preços, verificar a disponibilidade de peças sobressalentes e contactar iniciativas de reparação comunitária (Diretiva (UE) 2024/1799, 2024). Esta medida fortalece o ecossistema europeu de reparação ao facilitar o contacto entre consumidores e técnicos, aumentar a transparência do mercado e estimular novos modelos de negócio locais no setor.

Nas entrevistas, os participantes reconheceram o potencial transformador desta medida. O E1 afirmou que a plataforma “aumentará a disponibilidade de peças, manuais técnicos e serviços de reparação a preços acessíveis”, enquanto os E2 e E5 destacaram a promoção da reparação como modelo de negócio. O E3 acrescentou que o instrumento permitirá “partilhar procedimentos e experiências para facilitar a reparação dos produtos”, e o E4 expressou “grande expectativa na transposição da política”, considerando que “estas plataformas reforçarão a informação e a acessibilidade para a reparação para mais consumidores”.

No diagrama causal do grupo R3-R7 (Figura 4.16), o Direito à Reparação é representado como uma variável de reforço, fortalecendo as ligações entre o grupo de estratégias R3-R7, o tempo de vida útil e a redução do descarte. A aplicação desta diretiva gera um efeito de estabilização no sistema, diminuindo também os fluxos de produção, consolidando os princípios centrais da economia circular. Ao garantir a reparabilidade técnica, jurídica e informacional, o Direito à Reparação estabelece uma nova infraestrutura de suporte à circularidade, com efeitos diretos na durabilidade dos produtos e na transformação dos padrões de consumo no setor eletrónico.

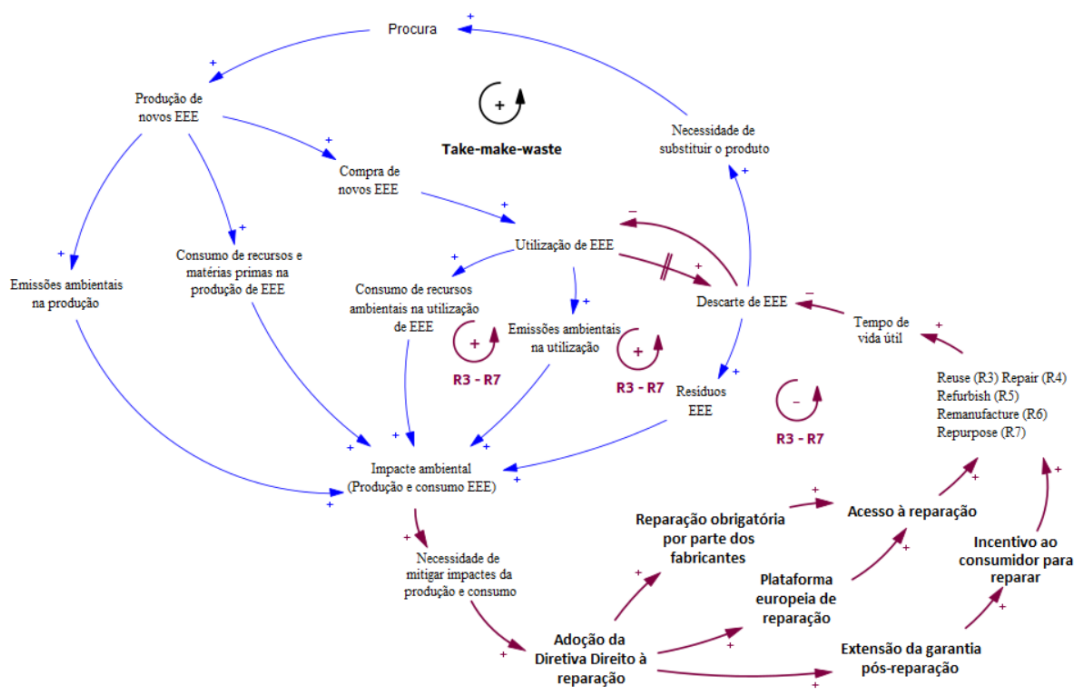


Figura 4.16 - Arquétipo causal R3-R7 aplicado à política Direito à reparação.

De forma geral, o Direito à Reparação representa um avanço significativo na integração da sustentabilidade com os direitos do consumidor. Ao transformar a reparação num dever dos fabricantes e num direito acessível para os cidadãos, esta diretiva traduz-se num instrumento estruturante de transição para modelos de consumo mais duradouros. A sua aplicação prática tem o potencial de criar dinâmicas económicas no setor da reparação e de fortalecer a economia local, enquanto contribui para reduzir a geração de resíduos e a pressão sobre os recursos naturais. Esta política permite abordar diretamente algumas das barreiras à adoção deste grupo de estratégias, identificadas na figura 4.9.

4.3.2.2 Plano de ação para a economia circular

O PAEC apresentado pela Comissão Europeia em 2020 no âmbito do Pacto Ecológico Europeu, é um dos instrumentos estruturantes da transição europeia para a circularidade, atuando de forma integrada sobre o design, a produção, o consumo e a gestão de resíduos. No contexto das estratégias R3-R7, o PAEC destaca-se pela introdução de medidas que visam prolongar a vida útil dos produtos, reforçar a reparabilidade e promover modelos de negócio baseados na reutilização e recondicionamento. O plano define um quadro estratégico para a sustentabilidade dos produtos, reconhecendo que até 80% dos impactes ambientais são determinados na fase de conceção, e que os padrões lineares de extração, fabrico e descarte não oferecem incentivos suficientes para a circularidade (Comissão Europeia, 2020).

Entre as medidas mais relevantes para o setor dos equipamentos elétricos e eletrónicos, o PAEC inclui a criação de uma Iniciativa para a Eletrónica Circular, que prevê ações regulamentares para incluir um carregador comum para telemóveis e dispositivos semelhantes, aumentando a sua durabilidade e reparabilidade (Comissão Europeia, 2020). A iniciativa prevê também o direito à atualização de software ao exigir que os consumidores tenham acesso continuado a atualizações de software e informações sobre peças sobressalentes e reparação (Comissão Europeia, 2020).

O PAEC também propõe a criação de um sistema europeu de retoma de dispositivos usados, concebido para facilitar a recolha e reintrodução de equipamentos no circuito formal de reaproveitamento e reciclagem (Comissão Europeia, 2020). Esta medida, associada à estratégia R5, procura reduzir o descarte prematuro e criar incentivos económicos para a devolução de produtos em fim de vida.

As perceções recolhidas nas entrevistas confirmam a relevância e o potencial desta medida. O E1 sublinhou que a iniciativa “causará uma maior taxa de recolha de equipamentos usados, evitando destino inadequado”, destacando o seu papel na criação de fluxos de retorno estruturados para fabricantes e retalhistas. O E2 acrescentou que a medida “prolongará a vida útil dos produtos e reduzirá a necessidade de extração de recursos”, observando que “as empresas voltam a ser proprietárias dos produtos que produziram”, o que reforça a responsabilidade pós-consumo. Já o E3 demonstrou reservas quanto à implementação prática, defendendo “a criação de um sistema de depósito para recuperar os produtos e recondicioná-los”. Por sua vez, o E4 destacou que, apesar de não conhecer em detalhe a legislação, reconhece que se trata de uma medida que tem por base “mecanismos importantes para evitar o descarte indevido e incentivar o recondicionamento”, sugerindo que “incentivos económicos podem aumentar a adesão dos consumidores”.

No diagrama causal do grupo R3-R7 (Figura 4.17), o PAEC atua como variável moderadora que fortalece os ciclos de retroação entre o grupo de estratégias R3-R7 e a redução do descarte. As medidas do plano mitigam as forças de reforço do sistema linear, promovendo a valorização dos produtos após o uso e aumentando a confiança dos consumidores e produtores em soluções de segunda vida. A sua implementação contribui para reconfigurar o fluxo de materiais e energia no sistema produtivo europeu, reduzindo a dependência de recursos primários e fortalecendo as condições estruturais para o avanço das estratégias R3-R7.

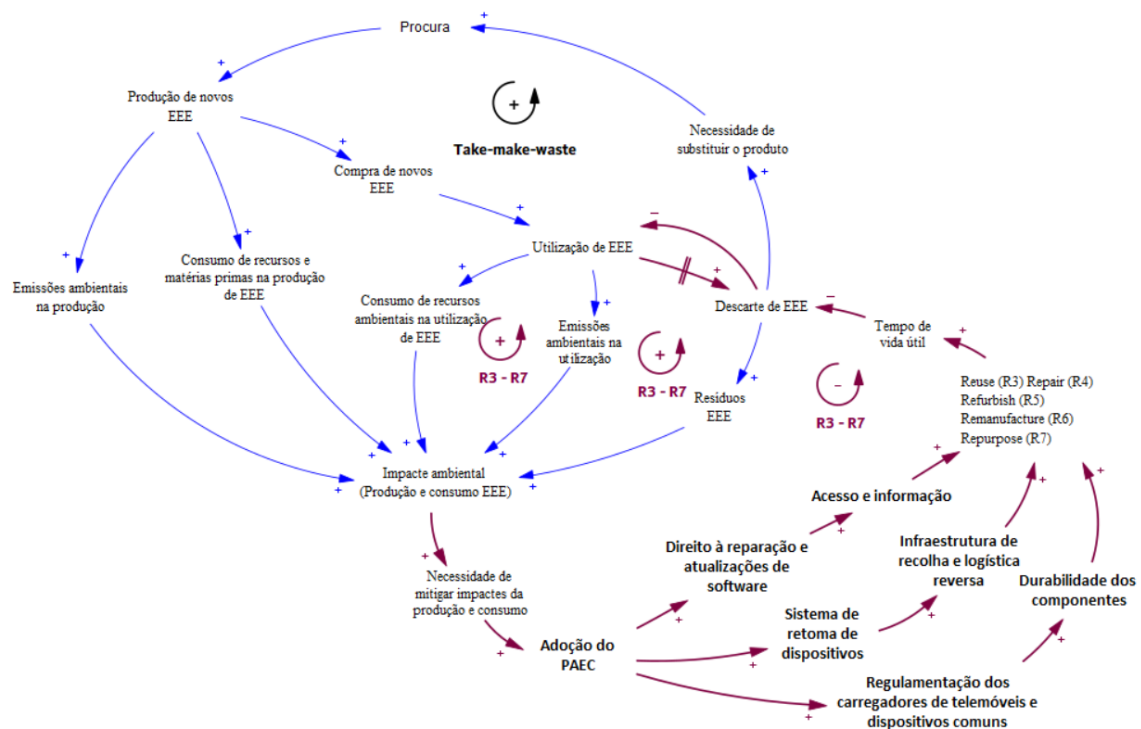


Figura 4.17 - Arquétipo causal R3-R7 aplicado ao PAEC.

O PAEC consolida a estratégia europeia de transição para um modelo produtivo regenerativo, ao articular medidas regulamentares, fiscais e tecnológicas que reforçam as bases da circularidade. Através da combinação de incentivos económicos, inovação e responsabilização dos agentes económicos, o PAEC reforça a coerência entre política industrial e ambiental, tornando-se um elemento central na concretização do Pacto Ecológico Europeu e no avanço das metas de sustentabilidade da União Europeia.

4.3.2.3 *Clean Industrial Deal*

O *Clean Industrial Deal*, publicado pela Comissão Europeia em fevereiro de 2025, representa a nova estratégia de crescimento da União Europeia para conciliar competitividade e descarbonização industrial. Este plano consolida medidas destinadas a acelerar a industrialização europeia, fortalecer a circularidade e promover a neutralidade climática até 2050 (Comissão Europeia, 2025b). O *Clean Industrial Deal* reconhece que a circularidade será uma prioridade, considerando-a essencial para maximizar os recursos limitados da União, reduzir dependências externas e aumentar a resiliência industrial (Comissão Europeia, 2025b).

No contexto das estratégias R3-R7, o *Clean Industrial Deal* atua em múltiplas frentes. Em primeiro lugar, introduz o *Circular Economy Act*, previsto para 2026, que visa acelerar a transição circular através da criação de um mercado único para produtos e materiais secundários, da harmonização dos critérios de fim de vida e da simplificação dos sistemas de responsabilidade alargada do produtor (Comissão Europeia, 2025b). Esta medida incide sobre a reutilização, o acondicionamento e a remanufatura de produtos, reforçando o papel do design sustentável e das cadeias de valor regionais.

Também prevê a criação dos *Trans-Regional Circularity Hubs*, estruturas colaborativas que têm como objetivo promover especialização inteligente e economias de escala no domínio da reciclagem e remanufatura. Estes *hubs* permitirão a partilha de infraestruturas e fluxos de materiais entre Estados-Membros, aumentando a eficiência da recolha e tratamento de resíduos industriais (Comissão Europeia, 2025b). Ao facilitar a cooperação inter-regional e a concentração de capacidades, esta iniciativa contribui diretamente para as estratégias R5 e R6, ao reforçar a circularidade local e reduzir os custos associados à logística e recolha dispersa.

O plano também contempla a *Green VAT Initiative*, destinada a rever o regime do IVA aplicado a produtos e serviços de segunda mão, mitigando o problema do IVA incorporado nos produtos acondicionados e reparados (Comissão Europeia, 2025b). Este mecanismo fiscal pretende incentivar o consumo de bens reparados e acondicionados, tornando-os mais competitivos face a produtos novos, em linha com as estratégias R3-R7.

As perceções dos entrevistados revelam uma avaliação amplamente positiva quanto ao potencial desta medida. Os E2 e E3 destacaram que a redução do IVA aplicada a produtos reparados ou acondicionados constitui uma estratégia eficaz para incentivar a procura por alternativas aos produtos novos, contribuindo simultaneamente para o fortalecimento do mercado de reparação. O E2 sublinha que “a medida envia um sinal claro ao mercado, estimulando marcas e fabricantes a investir em modelos de negócio circulares, dado que a existência de um incentivo fiscal aumenta a probabilidade de procura por parte dos

consumidores, tradicionalmente sensíveis ao preço”. De forma convergente, o E5 reforça a ideia de que o *Green VAT* atua como um “incentivo duplo”, promovendo o acondicionamento de produtos e motivando os consumidores a optar por alternativas mais sustentáveis.

No diagrama causal do grupo R3-R7 (Figura 4.18), o *Clean Industrial Deal* é representado como uma variável sistémica de reforço da circularidade, interligando incentivos fiscais, inovação industrial e mecanismos de cooperação regional. As suas medidas reforçam os ciclos de retroação negativa que reduzem a dependência de matérias-primas virgens e prolongam a vida útil dos produtos, enquanto criam oportunidades económicas para setores de reparação, acondicionamento e remanufatura.

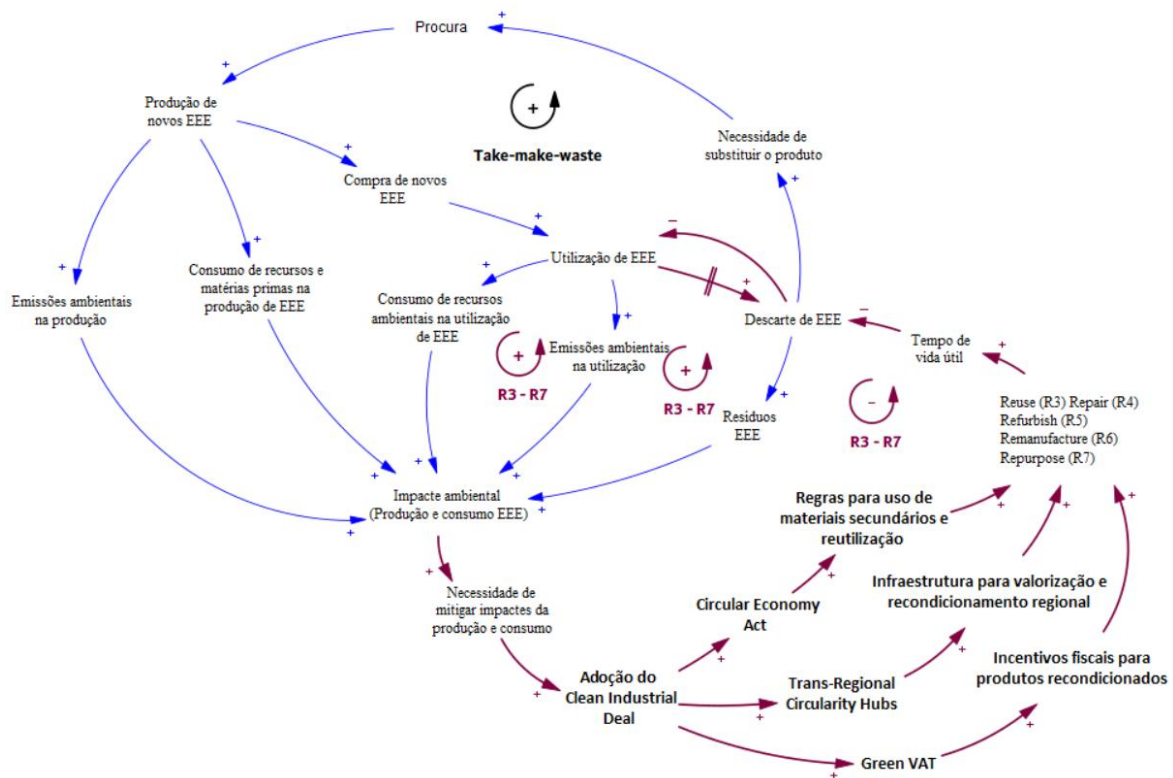


Figura 4.18 - Arquétipo causal R3-R7 aplicado ao *Clean Industrial Deal*.

O *Clean Industrial Deal* representa a consolidação da política industrial europeia orientada para a neutralidade climática e a circularidade. Ao integrar incentivos fiscais, inovação tecnológica e cooperação inter-regional, esta estratégia reforça a competitividade do setor europeu e promove a valorização de produtos acondicionados. A sua implementação traduz um passo decisivo na articulação entre política económica e sustentabilidade ambiental, posicionando a economia circular como elemento central do modelo industrial europeu e impulsionando o mercado para o grupo de estratégias R3-R7.

4.3.3 Políticas associadas ao grupo de estratégias R8-R9

A Diretiva REEE constitui um dos principais pilares da política europeia de gestão de resíduos e representa um marco essencial nas estratégias R8–R9. O seu objetivo é prevenir a produção de resíduos eletrônicos e garantir que os equipamentos em fim de vida sejam recolhidos, tratados e valorizados de forma ambientalmente adequada (Diretiva 2012/19/UE do Parlamento Europeu e do Conselho, 2012). Esta diretiva substituiu a anterior Diretiva 2002/96/CE, reforçando a responsabilidade dos produtores e estabelecendo metas vinculativas para os Estados-Membros quanto à recolha, reciclagem e valorização dos equipamentos elétricos e eletrônicos.

Uma das medidas centrais introduzidas é a proibição da eliminação de resíduos recolhidos sem tratamento adequado, que assegura que todos os equipamentos recolhidos sejam encaminhados para instalações de tratamento licenciadas (Diretiva 2012/19/UE do Parlamento Europeu e do Conselho, 2012). Esta disposição visa impedir o envio de REEE para aterros ou para fluxos informais, garantindo o cumprimento de normas ambientais e a recuperação de materiais valiosos.

A diretiva prevê ainda a recolha gratuita e acessível de REEE para consumidores e distribuidores, garantindo que os utilizadores possam entregar equipamentos em fim de vida sem custos adicionais (Diretiva 2012/19/UE do Parlamento Europeu e do Conselho, 2012). Esta obrigação recai sobre produtores e retalhistas, que devem disponibilizar pontos de recolha e cooperar em sistemas coletivos de gestão.

A terceira medida, e aquela mais destacada pelos entrevistados, refere-se à definição de metas de recolha, reciclagem e valorização. Estas metas determinam que cada Estado-Membro deve assegurar uma taxa mínima de recolha equivalente a 65% do peso médio dos equipamentos colocados no mercado nos três anos anteriores ou, em alternativa, 85% dos REEE produzidos (Diretiva 2012/19/UE do Parlamento Europeu e do Conselho, 2012). Esta política procura estimular a eficiência do sistema e promover o cumprimento das responsabilidades partilhadas entre produtores, distribuidores e entidades gestoras.

As perceções recolhidas nas entrevistas revelam que os *stakeholders* reconhecem o papel estruturante da WEEE, mas também apontam desafios operacionais significativos. O E1 destacou que a diretiva “responsabiliza os fabricantes pela recolha, tratamento e destino final dos equipamentos que colocam no mercado”, reforçando que esta abordagem “internaliza custos ambientais no preço dos produtos e promove sistemas coletivos de gestão”. O E2 considerou que, apesar da relevância da Diretiva, “os produtos colocados no mercado são

sempre mais do que os que são devidamente recolhidos”, e que “o foco deveria ser a quantidade de produtos colocados no mercado e não tanto a quantidade de recolhidos”. Já os E3 e E5 alertaram que apesar das metas serem muito exigentes, existe a necessidade de garantir que todos os *stakeholders* ligados à cadeia de valor assumam a sua responsabilidade e asseguram que os equipamentos sejam devidamente recolhidos e encaminhados para o circuito certo.

No diagrama causal (Figura 4.19), a Diretiva reforça o ciclo de retroação negativa associado às estratégias R8–R9, reduzindo o volume de resíduos através da recolha seletiva e, promovendo o reaproveitamento de materiais e recursos. Essa dinâmica gera efeitos estabilizadores no sistema linear, diminuindo as perdas de recursos e incentivando a reciclagem em condições ambientalmente seguras.

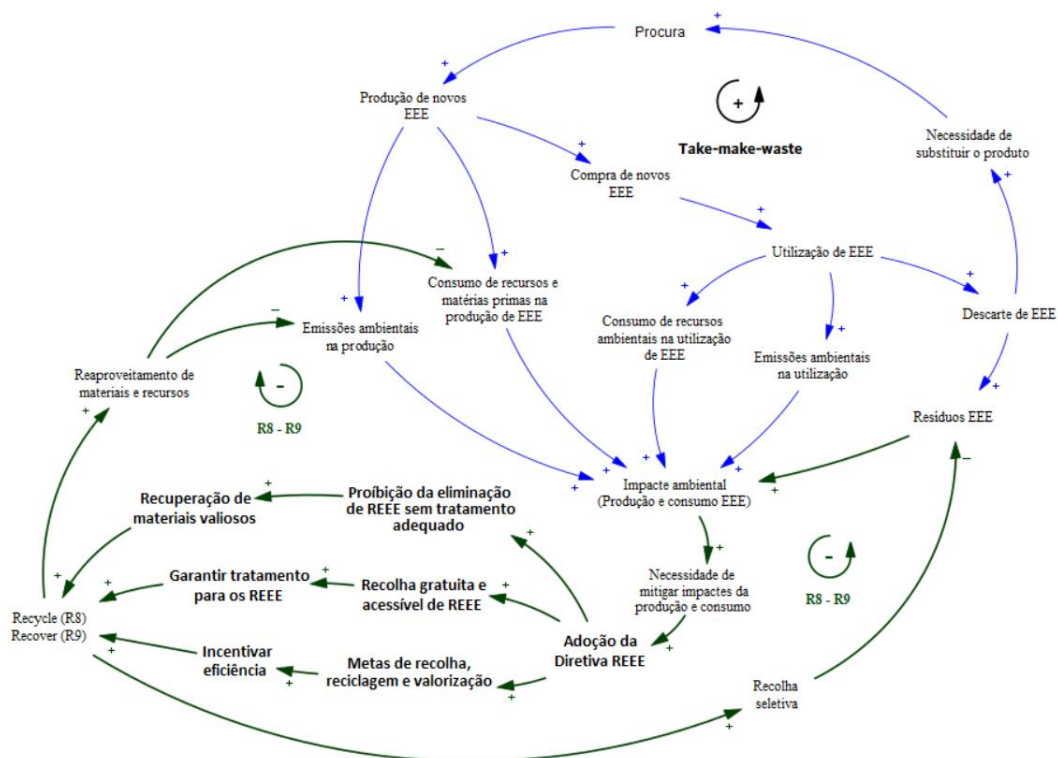


Figura 4.19 - Arquétipo causal R8-R9 aplicado à Diretiva REEE.

A Diretiva REEE constitui um marco regulamentar essencial para o encerramento do ciclo dos equipamentos elétricos e eletrónicos. Ao promover a recolha estruturada, o tratamento adequado e a valorização dos resíduos, esta política contribui para reduzir o desperdício e recuperar recursos críticos de elevado valor económico e ambiental. O seu papel no

fortalecimento da responsabilidade do produtor e na integração dos custos ambientais nas cadeias de valor confirma a importância desta diretiva como instrumento-chave para consolidar a circularidade no setor eletrónico europeu.

4.3.4 Política transversal - ESPR

O ESPR baseia-se no princípio de que o desempenho ambiental de um produto é determinado desde a fase de design. Assim, o regulamento introduz um conjunto alargado de requisitos de sustentabilidade obrigatórios que abrangem todo o ciclo de vida com o objetivo de melhorar a durabilidade, reparabilidade, eficiência de recursos, reciclabilidade e a rastreabilidade dos produtos (Regulamento (UE) 2024/1781 do Parlamento Europeu e do Conselho, 2024).

O regulamento prevê também mecanismos de apoio complementares destinados a facilitar a implementação prática destes requisitos, entre os quais se incluem: (i) Requisitos ecológicos, que definem parâmetros mínimos de sustentabilidade; (ii) Passaporte Digital do Produto, instrumento de rastreabilidade e transparência de informação; (iii) Rótulos de sustentabilidade, que visam apoiar o consumidor na tomada de decisões informadas; e (iv) Contratos públicos ecológicos, que orientam o poder de compra do setor público para produtos mais circulares (Regulamento (UE) 2024/1781 do Parlamento Europeu e do Conselho, 2024).

A natureza transversal do ESPR reflete-se na sua aplicação a vários grupos de estratégias R (R0–R2, R3–R7 e R8–R9). Cada uma das medidas mencionadas incide com maior intensidade sobre um grupo principal de estratégias, mas pode gerar efeitos indiretos noutros, traduzindo-se num instrumento sistémico que articula políticas de design, consumo, reutilização e reciclagem.

Nesta análise, cada medida será abordada de forma individual, de acordo com o grupo de estratégias R mais diretamente afetado, destacando-se também os efeitos complementares nos restantes grupos, conforme representado nos diagramas causais desenvolvidos.

4.3.4.1 Rótulos de Sustentabilidade

Os rótulos de sustentabilidade integram-se no conjunto de instrumentos de apoio à transição para produtos mais circulares, desempenhando um papel essencial na transparência e comunicação ambiental entre produtores e consumidores. Estes rótulos, definidos através de atos delegados da Comissão Europeia, visam uniformizar a informação sobre o desempenho ambiental dos produtos, incluindo indicadores de eficiência de recursos,

reparabilidade, durabilidade e reciclabilidade, bem como a conformidade com requisitos ecológicos e de segurança. O objetivo é facilitar escolhas de consumo mais informadas e criar incentivos de mercado para que as empresas invistam em design sustentável e em práticas de produção responsáveis (Regulamento (UE) 2024/1781 do Parlamento Europeu e do Conselho, 2024).

No quadro das estratégias circulares, os rótulos de sustentabilidade integram-se principalmente no grupo R0–R2, uma vez que atuam a montante, sobre o comportamento de consumo e a conceção dos produtos. Ao fornecer informação clara e verificável, estes rótulos permitem que os consumidores recusem produtos de menor desempenho ambiental, repensem as suas escolhas de compra e reduzam o consumo de bens de curta duração. De forma indireta, contribuem também para as estratégias R3–R7, ao promover a valorização de produtos reparáveis e reutilizáveis, e para R8–R9, ao favorecer materiais recicláveis e processos de fim de vida mais limpos.

O diagrama causal (Figura 4.20) correspondente representa o efeito sistémico da introdução dos rótulos, onde o aumento da informação ambiental disponível gera consumo mais consciente, conduzindo à redução da produção e compra de produtos de baixo desempenho e, conseqüentemente, à diminuição das emissões e dos resíduos. Este mecanismo traduz a capacidade dos rótulos de sustentabilidade de influenciar o sistema através da mudança comportamental e de mercado.

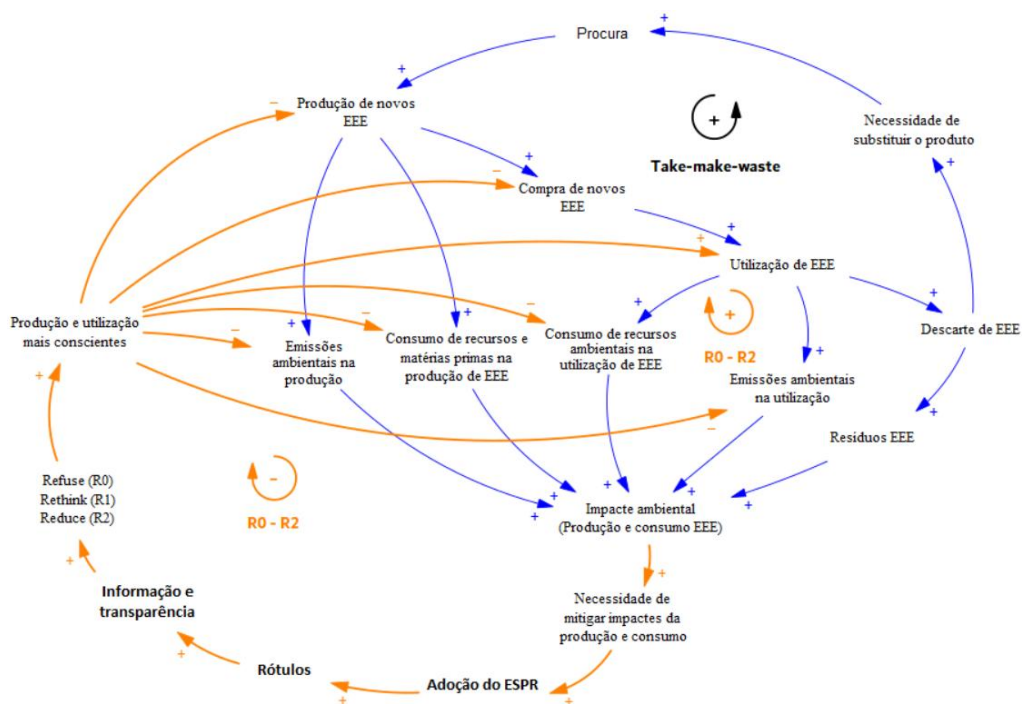


Figura 4.20 - Arquétipo causal R0-R2 aplicado à medida da implementação de rótulos do ESPR.

Os rótulos de sustentabilidade reforçam assim as estratégias preventivas da economia circular, atuando sobre a procura e promovendo uma dinâmica de autorregulamentação baseada na informação. Ao aproximar consumidores e produtores em torno de critérios comuns de desempenho ambiental, esta medida consolida o papel do ESPR como instrumento de transparência, confiança e incentivo à inovação sustentável.

4.3.4.2 Contratos públicos ecológicos

Os contratos públicos ecológicos representam um instrumento de política da procura, concebido para mobilizar o poder de compra das entidades públicas como motor de transição para uma economia circular. O regulamento determina que os Estados-Membros assegurem a integração de critérios de sustentabilidade ambiental nas aquisições públicas, de modo a favorecer produtos e serviços que cumpram os requisitos ecológicos definidos pela Comissão. Estes critérios incluem fatores como conteúdo reciclado, durabilidade, eficiência de recursos e reparabilidade, incentivando o setor privado a alinhar a sua oferta com padrões ambientais mais exigentes (Regulamento (UE) 2024/1781 do Parlamento Europeu e do Conselho, 2024). Esta medida encontra-se em conformidade com a Estratégia Nacional para as Compras Públicas Ecológicas 2030 (ECO360), uma vez que ambas as políticas reforçam a integração de critérios ambientais e de circularidade nos processos de aquisição pública, atuando como agentes promotores da transição para uma economia circular (Resolução do Conselho de Ministros n.º 13/2023).

No contexto das estratégias circulares, os contratos públicos ecológicos integram-se principalmente no grupo R0–R2, por repensarem a forma como os bens são adquiridos e utilizados, e por reduzirem a procura de produtos de menor desempenho ambiental. Ao privilegiar fornecedores que adotam práticas sustentáveis, esta medida atua a montante do ciclo de vida, incentivando design ecológico e eficiência de produção. De forma indireta, os seus efeitos estendem-se aos grupos R3–R7, ao estimular a oferta de produtos reparáveis e reutilizáveis, e aos grupos R8–R9, ao valorizar a utilização de materiais reciclados e recicláveis.

O diagrama causal (Figura 4.21) correspondente evidencia que as inclusões de critérios de sustentabilidade nas compras públicas reduzem a produção e compra "linear" de produtos, levando os produtores a investir em design sustentável e reduzindo gradualmente os impactos ambientais do setor produtivo. Este mecanismo traduz a função dos contratos públicos ecológicos como instrumento capaz de transformar a lógica da produção através da procura institucional.

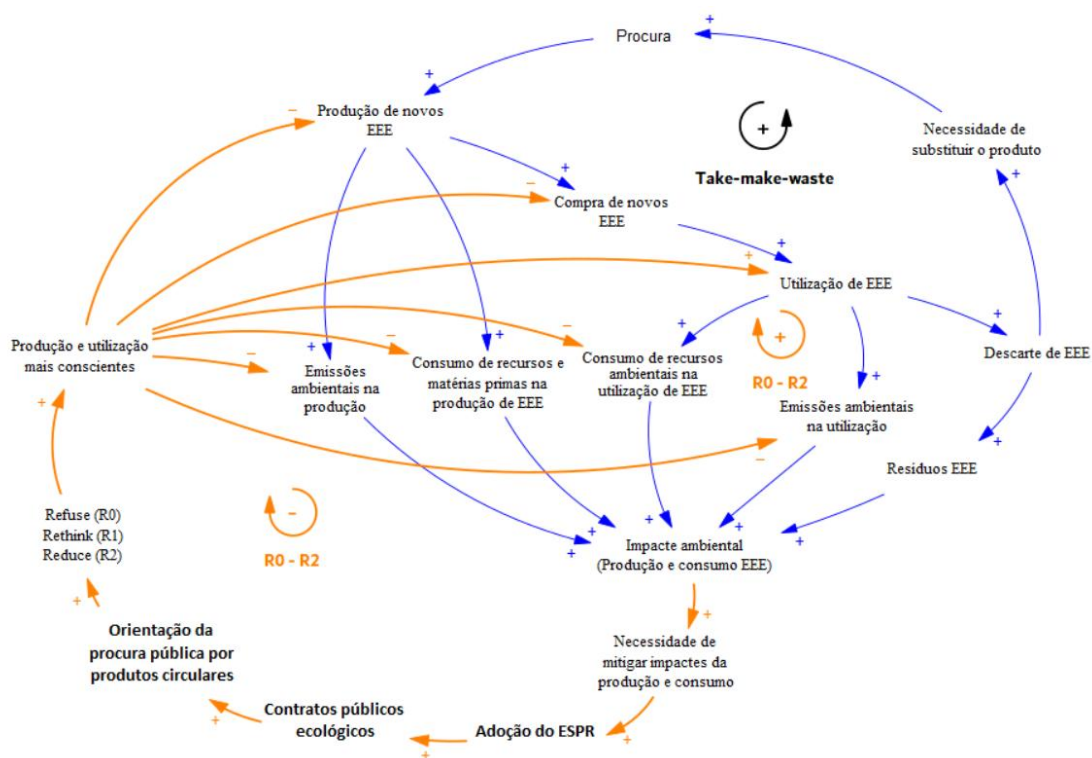


Figura 4.21 - Arquetipo causal R0-R2 aplicado à medida da criação de contratos públicos ecológicos do ESPR.

Com isto, os Contratos Públicos Ecológicos reforçam a dimensão preventiva e sistémica do ESPR, ao utilizarem políticas de compra pública como ferramenta de indução da circularidade. A sua eficácia dependerá da harmonização dos critérios de sustentabilidade entre os Estados-Membros e da fiscalização do cumprimento por parte dos fornecedores, condições essenciais para que este instrumento atue de forma consistente sobre o sistema produtivo europeu.

4.3.4.3 Requisitos ecológicos

Os requisitos ecológicos constituem o principal instrumento de atuação do quadro europeu para a sustentabilidade dos produtos. Estes requisitos estabelecem parâmetros obrigatórios de durabilidade, reparabilidade, reciclabilidade e eficiência de recursos, garantindo que a sustentabilidade é incorporada desde a fase de design e reduzindo a dependência de matérias-primas e a produção de resíduos. Estes requisitos exigem também informação ambiental transparente, incluindo dados sobre pegada de carbono, consumo energético e instruções de manutenção e reciclagem (Regulamento (UE) 2024/1781 do Parlamento Europeu e do Conselho, 2024).

No contexto dos 9 R's, os requisitos ecológicos inserem-se predominantemente no grupo R3–R7, uma vez que incidem sobre as fases intermédias do ciclo de vida dos produtos, promovendo a reparabilidade, reutilização, recondicionamento e remanufactura. Estes requisitos estabelecem parâmetros técnicos que asseguram maior eficiência energética e de recursos, bem como durabilidade e modularidade dos equipamentos, permitindo prolongar o seu tempo de uso e facilitar a substituição de componentes. Ao exigir que os produtos sejam concebidos para serem facilmente reparados, desmontados e atualizados, esta medida contribui para retardar o descarte e reduzir a necessidade de produção de novos equipamentos, reforçando os princípios de extensão da vida útil característicos das estratégias R3–R7.

Embora os efeitos dos requisitos ecológicos possam repercutir-se a montante, ao incentivar práticas de design sustentável, e a jusante, ao melhorar a reciclabilidade e a valorização dos materiais, o seu impacto principal manifesta-se na fase de utilização e manutenção dos produtos, onde atuam como um mecanismo de equilíbrio que mitiga o fluxo linear de consumo e substituição. O diagrama causal (Figura 4.22) ilustra esta função estabilizadora, mostrando que a implementação dos requisitos ecológicos gera condições favoráveis de produção e design sustentável, que reforçam diretamente as estratégias R3–R7. Estas condições contribuem para prolongar a vida útil dos produtos, introduzindo um desfasamento temporal no momento do descarte e reduzindo o volume de resíduos gerados. Em simultâneo, a maior durabilidade e reparabilidade dos equipamentos leva à diminuição da necessidade de novos produtos no mercado, o que se traduz numa redução da extração de recursos naturais e das emissões associadas. No seu conjunto, estes efeitos fortalecem o ciclo de retroação negativa responsável por limitar a expansão do sistema linear.

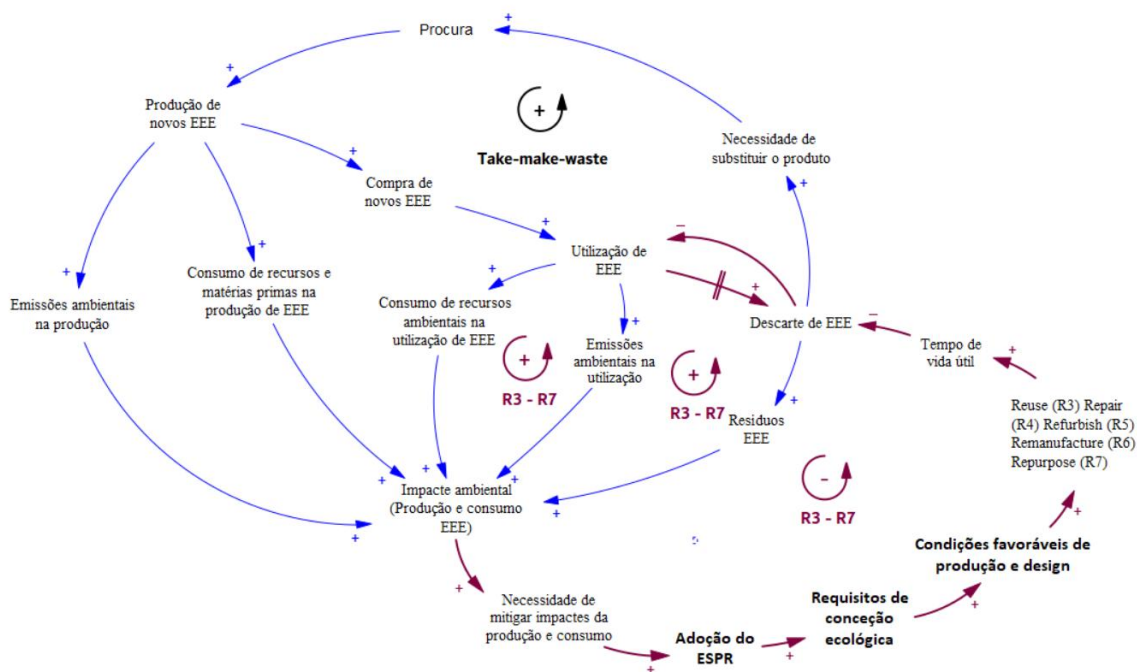


Figura 4.22 - Arquétipo causal R3-R7 aplicado à medida da criação de requisitos ecológicos do ESPR.

Em síntese, os requisitos ecológicos do ESPR funcionam como base estruturante das estratégias preventivas da economia circular, assegurando que a sustentabilidade se inicia na conceção e se propaga às fases seguintes do ciclo de vida dos produtos.

4.3.4.4 Passaporte Digital do Produto

O Passaporte Digital do Produto (PDP) é um dos instrumentos mais inovadores da nova política europeia de conceção sustentável. Trata-se de uma ferramenta digital de rastreabilidade que reúne informações sobre a origem dos materiais, composição, pegada ambiental e possibilidades de reparação, reutilização e reciclagem. O seu objetivo é assegurar a transparência ao longo de todo o ciclo de vida, permitindo que fabricantes, consumidores e operadores de gestão de resíduos tenham acesso a dados fiáveis e atualizados (Regulamento (UE) 2024/1781 do Parlamento Europeu e do Conselho, 2024).

No quadro das estratégias circulares, o PDP incide principalmente sobre o grupo R3–R7, ao recolher informação para facilitar a reparação, reutilização e acondicionamento dos produtos. Os efeitos indiretos estendem-se a R0–R2, pela informação que apoia decisões de consumo mais conscientes, e a R8–R9, pela melhoria da triagem e da reciclagem no fim de vida. O diagrama causal (Figura 4.23) correspondente representa um fortalecimento do ciclo de retroação negativa, no qual a introdução do passaporte digital do produto leva ao aumento

da recolha de informação sobre reparação, reutilização e recondição dos produtos que conduz à adoção de estratégias R3–R7, prolongando a vida útil dos produtos, retardando o descarte e o volume de resíduos. Ao mesmo tempo, ao promover o grupo de estratégias R3–R7, esta medida provoca a diminuição da necessidade de substituição dos produtos, o que se traduz numa menor necessidade de produção e, conseqüentemente, numa diminuição da extração de recursos e das emissões associadas à produção.

Os entrevistados confirmaram esta visão, salientando que a medida “proporcionará maior transparência sobre materiais, origem, pegada ambiental e possibilidades de reparação e reciclagem”, além de “aumentar a confiança entre consumidores, recicladores e reparadores” (E1 e E4). Ainda assim, foram manifestadas reservas quanto à aplicabilidade prática, nomeadamente sobre a atualização constante das informações e a capacidade de as empresas assegurarem transparência total na cadeia de valor (E2).

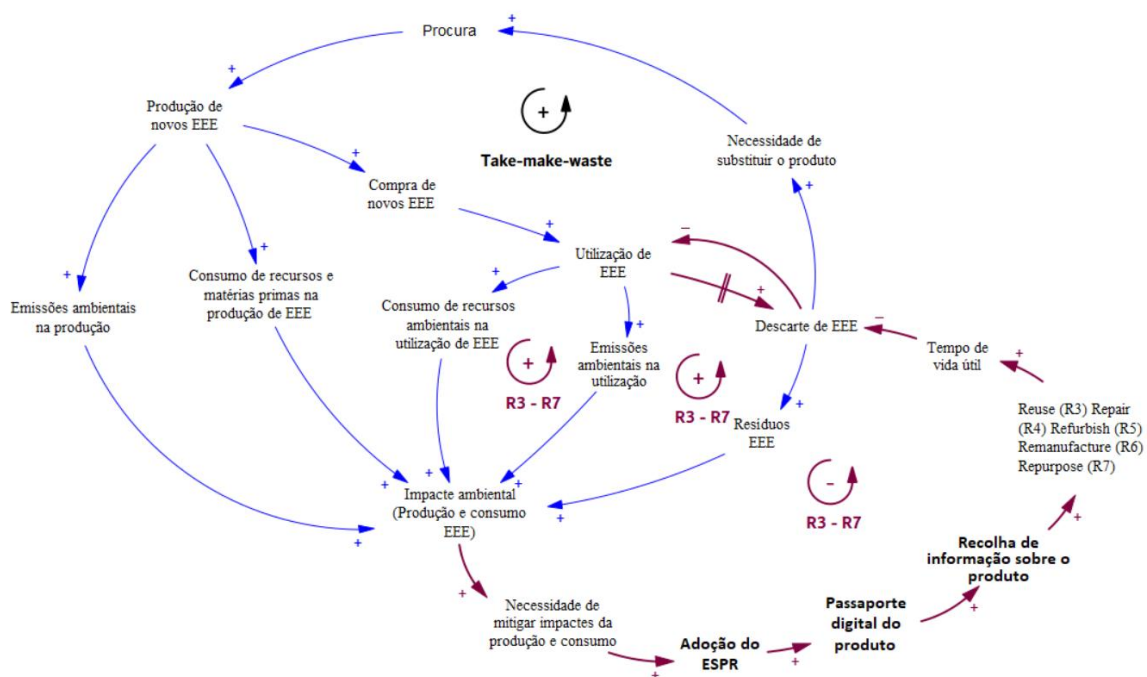


Figura 4.23 - Arquétipo causal R3-R7 aplicado à medida da implementação do PDP do ESPR.

O PDP estabelece assim uma ligação entre design, consumo e fim de vida, promovendo a circularidade através da partilha de informação. A sua eficácia dependerá da interoperabilidade técnica e do compromisso das empresas com a atualização contínua dos dados, condições indispensáveis para que o instrumento cumpra o seu potencial como catalisador da economia circular.

4.3.5 Síntese da aplicação dos arquétipos na análise das políticas

A Tabela 4.10 apresenta o grau de aplicabilidade dos arquétipos às principais políticas europeias de circularidade no setor. A escala indica a associação predominante de cada política sobre as relações causais que caracterizam os grupos R0–R2, R3–R7 e R8–R9. Esta leitura permite perceber onde cada instrumento é mais operativo e onde pode atuar de forma indireta.

Tabela 4.10 - Síntese do grau de associação dos arquétipos às políticas.

Políticas de circularidade	Arquétipo R0-R2	Arquétipo R3-R7	Arquétipo R8-R9
Diretiva RoHS	+++	+	+
Direito à Reparação	++	+++	+
PAEC	++	+++	+
<i>Clean Industrial Deal</i>	++	+++	++
Diretiva REEE	+	+	+++
ESPR	+++	+++	+++

+++ Grau de correspondência elevado; ++ Grau de correspondência intermédio; + Grau de correspondência baixo

A Diretiva RoHS destaca-se como uma política associada ao arquétipo R0–R2, refletindo a sua natureza preventiva e o seu papel central na redução de riscos e de intensidade material logo na fase de conceção e fabrico. A atuação potencial desta diretiva sobre os outros arquétipos é menos expressiva, podendo ficar limitada a efeitos indiretos relacionados com a durabilidade e o tratamento dos resíduos. O Direito à Reparação, por sua vez, apresenta uma associação predominante ao arquétipo R3–R7, uma vez que atua diretamente sobre o prolongamento da vida útil dos produtos ao reforçar a reparabilidade, a reutilização e o acondicionamento. As suas repercussões sobre os outros grupos de estratégias são mais limitadas, mas ainda relevantes ao nível da redução da procura de novos produtos e do incentivo à correta gestão dos resíduos após a utilização.

O PAEC mostra um padrão semelhante de associação, deixando antever uma maior correspondência com o arquétipo R3–R7 e de forma complementar sobre o R0–R2. Estas

políticas promovem mecanismos de incentivo, como sistemas de retoma, que atuam diretamente no prolongamento da vida útil dos equipamentos e indiretamente na transformação dos modelos de negócio e no ecodesign. O *Clean Industrial Deal* apesar de apresentar um foco no arquétipo R3–R7 através da promoção de um mercado de produtos reconicionados, esta política também poderá ser representada indiretamente pelos arquétipos R0–R2 e R8–R9 através de incentivos fiscais ao consumidor para optar por outras opções de produto e da harmonização dos critérios de fim de vida dos produtos, respetivamente.

Já a Diretiva WEEE apresenta uma correspondência direta elevada com o arquétipo R8–R9, refletindo a sua vocação para a fase final do ciclo de vida. Esta política reforça as dinâmicas de recolha, tratamento e valorização, embora exerça também alguma influência sobre a conceção dos produtos, ao impor requisitos que facilitam a reciclagem e a recuperação de materiais.

Por fim, o Regulamento ESPR destaca-se pelo seu carácter transversal, evidenciado pela aplicabilidade elevada de todos os arquétipos na política. Através dos requisitos ecológicos, do Passaporte Digital do Produto, dos rótulos e dos contratos públicos ecológicos, a ESPR abrange simultaneamente o design, a utilização e o fim de vida dos produtos. Atua sobre o arquétipo R0–R2 ao introduzir critérios de eficiência e sustentabilidade no design; sobre o R3–R7 ao reforçar a transparência e a reparabilidade; e sobre o R8–R9 ao promover a reciclabilidade e o fecho do ciclo de materiais.

A análise da aplicabilidade dos arquétipos às políticas demonstra assim que nenhuma medida isolada permitirá cobrir integralmente objetivos de circularidade e sustentabilidade, sendo a circularidade efetiva alcançada através da complementaridade entre instrumentos e medidas. A RoHS constitui o pilar de intervenção a montante, o Direito à Reparação, o PAEC e o *Clean Industrial Deal* fortalecem as estratégias de prolongamento da vida útil, a Diretiva WEEE garante o encerramento do ciclo e a ESPR atua como elo integrador que assegura coerência e continuidade entre todas as etapas do ciclo de vida dos produtos. Este enquadramento evidencia, a necessidade de uma abordagem sistémica e coordenada, em que as políticas se reforçam mutuamente, promovendo ciclos de retroação que contrariam as dinâmicas de crescimento linear e consolidam a transição para a economia circular.

4.3.6 Avaliação da eficácia das medidas

As percepções recolhidas nas entrevistas permitiram ainda compreender de que forma as partes interessadas do setor dos EEE avaliam a eficácia das políticas europeias de circularidade e quais as medidas consideradas mais promissoras para promover a transição para modelos sustentáveis. Embora todos os entrevistados reconheçam a importância das políticas já em vigor, as suas respostas refletem diferentes perspetivas quanto ao alcance prático e à capacidade de implementação de cada instrumento.

O Direito à Reparação foi unanimemente identificado como uma das políticas com maior potencial de impacto, sobretudo pela sua aplicabilidade direta junto dos consumidores e pequenas empresas. Segundo o E1, esta Diretiva “pode ter impacto prático muito relevante junto dos consumidores, pois prolonga a vida útil dos equipamentos e gera novas oportunidades económicas locais”. Esta percepção reforça a ideia de que medidas centradas na reparabilidade produzem efeitos tangíveis na extensão do ciclo de vida dos produtos, enquanto criam oportunidades de emprego e estimulam o setor da reparação e recondicionamento a nível local.

O ESPR foi também destacado como uma política potencialmente transformadora, especialmente pela sua natureza transversal e pela capacidade de influenciar o design e o comportamento de consumo. O E2 observou que “se o ESPR for efetivamente implementado e incluir todos os produtos faria uma grande diferença, uma vez que tem uma função muito importante de obrigar as empresas a mudar e consequentemente obrigar os consumidores a mudar também”. Esta declaração evidencia a percepção de que a eficácia do ESPR dependerá fortemente da fiscalização e do cumprimento rigoroso dos critérios de ecodesign e rastreabilidade, nomeadamente através do Passaporte Digital do Produto, referido como uma ferramenta essencial para assegurar transparência e confiança no mercado: “pode revolucionar se for devidamente fiscalizado, se as empresas cumprirem com os critérios e se no passaporte as informações forem fidedignas” (E2).

O E3 identificou como mais eficazes as metas de recolha e reciclagem da Diretiva WEEE e o Passaporte Digital do Produto, salientando ainda a importância da eco modelação, mesmo que esta não tenha sido discutida nos tópicos anteriores. Segundo o E3, “a Eco modelação, apesar de não mencionada, é importante, uma vez que alguns produtos não são facilmente desmantelados e esta política consiste na ideia de ter um eco valor mais penalizador para estes produtos que dificultam a sua reciclagem”. Esta observação introduz uma reflexão relevante

sobre a necessidade de ajustar os incentivos económicos de acordo com o desempenho ambiental dos produtos, reforçando a coerência entre design, recolha e valorização.

O E4 apontou ainda que a aplicação conjunta da plataforma europeia de reparação do Direito à Reparação e do passaporte digital do produto do ESPR “pode ajudar as duas políticas a alavancarem-se”. A sua resposta evidencia uma visão sistémica da circularidade, reconhecendo que a eficácia das políticas depende da sua interligação e do reforço mútuo entre medidas complementares.

O E5 mencionou que políticas ligadas à reparação e reutilização, como o Direito à Reparação, são fundamentais, mas também destacou a importância de implementar mecanismos económicos e fiscais, para incentivar o consumidor a escolher estratégias circulares.

Os resultados refletem um consenso alargado em torno das medidas associadas ao Direito à Reparação e ao ESPR, consideradas pelos entrevistados como as mais eficazes para impulsionar mudanças estruturais, tanto pela sua aplicabilidade direta junto dos consumidores como pela capacidade de introduzir critérios transversais de ecodesign e rastreabilidade. Em contrapartida, políticas como a Diretiva WEEE e a Eco modelação foram vistas como essenciais para o enquadramento regulamentar, mas com impacto mais localizado e dependente da articulação com outros instrumentos.

De forma geral, as perceções dos *stakeholders* revelam consenso quanto ao papel das políticas centradas na reparação e na rastreabilidade como elementos determinantes da eficácia do quadro europeu de circularidade. As respostas também demonstram que a eficácia das medidas depende menos da sua conceção e mais da execução e fiscalização, bem como da capacidade de criar sinergias entre instrumentos regulamentares e incentivos de mercado. Em síntese, os entrevistados convergem na ideia de que a economia circular no setor dos EEE só alcançará resultados estruturais se as políticas forem implementadas de forma coordenada, garantindo que as fases de design, consumo e fim de vida funcionam como partes de um mesmo sistema integrado.

4.3.7 Síntese dos arquétipos propostos

A Tabela 4.11 sintetiza a proposta dos arquétipos sistémicos desenvolvidos para cada grupo de estratégias de circularidade (R0–R2, R3–R7 e R8–R9), destacando as dinâmicas predominantes, as oportunidades que promovem o comportamento desejado e as barreiras que dificultam a sua implementação. Esta síntese permite visualizar de forma integrada as

interdependências entre os diferentes níveis de circularidade e os desafios sistêmicos associados à sua operacionalização.

Tabela 4.11 - Síntese dos arquétipos de estratégias de circularidade

Arquétipo	Descrição	Barreiras	Oportunidades
	<p>As estratégias de R0-R2 criam ciclos de retroação que limitam a expansão da produção e compra, atuando na origem do sistema. A redução da procura por novos produtos diminui a extração de recursos e as emissões associadas.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Persistência da obsolescência programada; - Falta de políticas de incentivo específicas à prevenção; - Resistência das empresas devido à redução das receitas e margens. 	<ul style="list-style-type: none"> - Incentivar design sustentável e modelos de negócio baseados em serviços; - Reforçar campanhas de sensibilização e educação do consumidor; - Apoiar políticas preventivas e instrumentos fiscais que desincentivem o consumo descartável.
	<p>O conjunto de estratégias de R3-R7 forma ciclos de retroação que retardam o descarte e reduzem o fluxo de resíduos. No entanto, podem gerar efeitos secundários se prolongarem o uso de equipamentos ineficientes.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Custos elevados de reparação; - Falta de peças e informação técnica; - Manutenção prolongada de produtos energeticamente ineficientes. 	<ul style="list-style-type: none"> - Acesso a peças e manuais técnicos; - Apoiar economicamente pequenas e médias empresas de reparação; - Promover o ecodesign modular e a padronização de componentes.
	<p>As estratégias R8-R9 criam ciclos de retroação negativa que reduzem os resíduos EEE e mitigam os impactos associados à produção. Contudo, não alteram o ritmo de produção e consumo.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Falta de harmonização técnica e padronização de materiais; - Ineficiência dos sistemas de recolha e logística inversa; - Downcycling e perda de qualidade dos materiais reciclados. 	<ul style="list-style-type: none"> - Reforçar infraestruturas de recolha e triagem; - Melhorar a rastreabilidade dos fluxos de materiais e a qualidade da reciclagem; - Incentivar a incorporação de materiais reciclados no design de novos produtos.

5.1 Síntese

A presente investigação teve como objetivo compreender de forma sistémica as relações causais entre políticas e estratégias de circularidade, integrando as perceções das partes interessadas e alguns dos principais agentes do setor dos EEE em Portugal. Através da aplicação da metodologia de Kim & Andersen (2012), foi possível numa fase inicial construir mapas causais e arquétipos que revelaram as dinâmicas típicas do sistema de produção e consumo de EEE, permitindo interpretar os efeitos das políticas e das estratégias circulares de forma holística e interligada. Estes arquétipos demonstraram o seu valor acrescentado enquanto estruturas genéricas para compreender os efeitos sistémicos das estratégias de circularidade, dando resposta a uma lacuna frequentemente observada na literatura, a ausência de ferramentas que traduzam a complexidade dos sistemas socioeconómicos e ambientais de modo integrado.

Os resultados mostraram que o sistema linear "*take-make-waste*" continua a ser dominado por ciclos de retroação positiva que perpetuam dependências e um padrão de consumo que leva à substituição rápida de produtos, conduzindo ao aumento da extração de recursos e da produção de resíduos. Neste contexto, as estratégias preventivas R0–R2 revelaram-se as mais eficazes para travar essas dinâmicas, atuando na origem dos impactos. Contudo, continuam sub-representadas em termos de abrangência das políticas públicas, o que poderá limitar o seu alcance real. As estratégias R3–R7 mostraram grande potencial para reduzir resíduos e gerar valor económico, mas enfrentam barreiras estruturais associadas ao custo da reparação, indisponibilidade de peças e falta de informação técnica. Já as estratégias R8–R9, centradas na reciclagem e recuperação, mantêm um papel complementar essencial, embora não previnam, inequivocamente, o problema nas fases a montante do ciclo de vida.

A análise das políticas europeias revelou uma evolução conceptual e normativa, desde medidas setoriais e corretivas, como a RoHS e a Diretiva REEE, até políticas integradas e transversais como o Direito à Reparação e o Regulamento ESPR, que combinam instrumentos de design sustentável, rastreabilidade digital e incentivos de mercado. Este conjunto de

políticas reflete uma mudança de paradigma em direção a uma abordagem que articula produção, consumo e regulamentação sob uma perspectiva sistémica.

As entrevistas realizadas desempenharam um papel fundamental na validação e enriquecimento dos resultados obtidos. As perceções dos *stakeholders* confirmaram a relevância das relações causais identificadas nos arquétipos, destacando, contudo, que a transição para modelos circulares depende não apenas de políticas bem estruturadas, mas também da sua aplicabilidade prática e da capacidade de gerar uma mudança comportamental. Os entrevistados sublinharam a importância da rastreabilidade, da informação ao consumidor e de incentivos económicos como fatores-chave para operacionalizar a circularidade. Ao mesmo tempo, evidenciaram limitações na fiscalização e na harmonização regulamentar, apontando para a necessidade de maior articulação entre políticas públicas, empresas e consumidores.

De forma global, esta investigação reforça a importância de compreender a circularidade através de arquétipos causais que permitam visualizar as interações entre políticas, estratégias e comportamentos. Ao capturar os principais ciclos que caracterizam o setor, estes modelos fornecem um instrumento analítico valioso para o planeamento e avaliação de políticas públicas, bem como para a formulação de estratégias empresariais e decisões de consumo sustentáveis. Assim, este trabalho oferece um suporte prático para a aplicação dos princípios da economia circular em processos de decisão real.

5.2 Limitações da investigação

Apesar do seu alcance, o estudo apresenta algumas limitações que importa reconhecer. Embora as entrevistas realizadas tenham sido bastante úteis e valiosas para a análise qualitativa realizada, considera-se que poderia ainda ser mais alargado o leque de atores-chave a entrevistar neste contexto, no sentido de recolher uma maior diversidade de modelos mentais, por exemplo, ao nível de partes interessadas ligadas à administração pública.

Por outro lado, o foco geográfico na realidade europeia restringe a aplicabilidade dos resultados a contextos com enquadramentos regulamentares semelhantes. Acresce que políticas recentes, como o ESPR ou o Direito à Reparação, ainda se encontram em fase inicial de implementação, o que impossibilita a avaliação empírica dos seus efeitos reais.

Por fim, a natureza qualitativa e interpretativa da metodologia implica que os modelos construídos representem estruturas explicativas e não preditivas, devendo ser entendidos como hipóteses dinâmicas preliminares e exploratórias destes sistemas complexos.

5.3 Recomendações para investigações futuras

Perspetivas futuras de investigação poderão explorar o potencial dos arquétipos como base para o desenvolvimento de modelos de simulação quantitativos, nomeadamente através de abordagens de DS aplicadas a modelos de stocks e fluxos. Essa evolução metodológica permitirá co-construir, analisar e comparar cenários alternativos de circularidade, quantificando o impacto de políticas e estratégias sobre indicadores ambientais e económicos. Seria também pertinente expandir a análise para outros setores de elevado impacto ambiental, como os têxteis ou os transportes, e para diferentes contextos geográficos, a fim de avaliar a robustez dos arquétipos desenvolvidos. Finalmente, a integração entre dados quantitativos, comportamento do consumidor e políticas públicas poderá consolidar uma base empírica robusta para orientar decisões estratégicas e de planeamento rumo a uma transição circular efetiva e sustentável.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Ahmad, S., Mat Tahar, R., Muhammad-Sukki, F., Munir, A. B., & Abdul Rahim, R. (2016). Application of system dynamics approach in electricity sector modelling: A review. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 56, pp. 29–37). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.11.034>

Ardi, R., & Leisten, R. (2016). Assessing the role of informal sector in WEEE management systems: A System Dynamics approach. *Waste Management*, 57, 3–16. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.11.038>

Baldassarre, B., Maury, T., Mathieux, F., Garbarino, E., Antonopoulos, I., & Sala, S. (2022). Drivers and Barriers to the Circular Economy Transition: the Case of Recycled Plastics in the Automotive Sector in the European Union. *Procedia CIRP*, 105, 37–42. <https://doi.org/10.1016/J.PROCIR.2022.02.007>

Bassi, A. M., Bianchi, M., Guzzetti, M., Pallaske, G., & Tapia, C. (2021). Improving the understanding of circular economy potential at territorial level using systems thinking. *Sustainable Production and Consumption*, 27, 128–140. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2020.10.028>

Bianchi, M., & Cordella, M. (2023). Does circular economy mitigate the extraction of natural resources? Empirical evidence based on analysis of 28 European economies over the past decade. *Ecological Economics*, 203. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2022.107607>

Branz, M., Farrell, A., Hu, M., Liem, W., & Ballard, E. (2021). System archetypes.

Bressanelli, G., Pigozzo, D. C. A., Sacconi, N., & Perona, M. (2021). Enablers, levers and benefits of Circular Economy in the Electrical and Electronic Equipment supply chain: a literature review. *Journal of Cleaner Production*, 298. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126819>

Bründl, P., Scheck, A., Nguyen, H. G., & Franke, J. (2024). Towards a circular economy for electrical products: A systematic literature review and research agenda for automated recycling. In *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* (Vol. 87). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2023.102693>

Canetta, L., Fontana, A., Foletti, M., & Tschanen, M. (2018, June). Sustainability assessment of various circular economy scenarios in the consumer electronics sector. In *2018 IEEE International Conference on Engineering, Technology and Innovation (ICE/ITMC)* (pp. 1-9). IEEE.

Castano Garcia, A., Ambrose, A., Hawkins, A., & Parkes, S. (2021). High consumption, an unsustainable habit that needs more attention. In *Energy Research and Social Science* (Vol. 80). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2021.102241>

Comissão Europeia. (2020). Um novo Plano de Ação para a Economia Circular: Para uma Europa mais limpa e competitiva (COM(2020) 98 final). Bruxelas: Comissão Europeia. <https://data.europa.eu/eli/com/2020/98/fin>

Comissão Europeia. (2025a). *Ecodesign for Sustainable Products and Energy Labelling Working Plan 2025–2030* (COM(2025) 187 final). Bruxelas: Comissão Europeia. https://environment.ec.europa.eu/document/5f7ff5e2-ebe9-4bd4-a139-db881bd6398f_en

Comissão Europeia. (2025b). The Clean Industrial Deal: A joint roadmap for competitiveness and decarbonisation (COM(2025) 85 final). Bruxelas: Comissão Europeia. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52025DC0085>

Cornelis P. Baldé, Ruediger Kuehr, Tales Yamamoto, Rosie McDonald, Elena D'Angelo, Shahana Althaf, Garam Bel, Otmar Deubzer, Elena Fernandez-Cubillo, Vanessa Forti, Vanessa Gray, Sunil Herat, Shunichi Honda, Giulia Iattoni, Deepali S. Khatriwal, Vittoria Luda di Cortemiglia, Yuliya Lobuntsova, Innocent Nnorom, Noémie Pralat, Michelle Wagner (2024). International Telecommunication Union (ITU) and United Nations Institute for Training and Research (UNITAR). 2024. Global E-waste Monitor 2024. Geneva/Bonn.

Corsini, F., Gusmerotti, N. M., & Frey, M. (2020). Consumer's circular behaviors in relation to the purchase, extension of life, and end of life management of electrical and electronic products: A review. In *Sustainability (Switzerland)* (Vol. 12, Issue 24, pp. 1–16). MDPI. <https://doi.org/10.3390/su122410443>

Cox, J., Griffith, S., Giorgi, S., & King, G. (2013). Consumer understanding of product lifetimes. *Resources, Conservation and Recycling*, 79, 21–29. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2013.05.003>

da Silva, S. B. G., Barros, M. V., Radicchi, J. Â. Z., Puglieri, F. N., & Piekarski, C. M. (2024). Opportunities and challenges to increase circularity in the product's use phase. In *Sustainable Futures* (Vol. 8). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.sftr.2024.100297>

Diretiva (UE) 2024/1799 do Parlamento Europeu e do Conselho, de 13 de junho de 2024, relativa a regras comuns para promover a reparação de bens e que altera o Regulamento (UE) 2017/2394 e as Diretivas (UE) 2019/771 e (UE) 2020/1828. (2024). Jornal Oficial da União Europeia, L de 10.7.2024. <https://data.europa.eu/eli/dir/2024/1799/oj>

Diretiva 2011/65/UE do Parlamento Europeu e do Conselho, de 8 de junho de 2011, relativa à restrição da utilização de determinadas substâncias perigosas em equipamentos elétricos e eletrônicos. (2011). Jornal Oficial da União Europeia, L 174 de 1.7.2011. <https://data.europa.eu/eli/dir/2011/65/oj>

Diretiva 2012/19/UE do Parlamento Europeu e do Conselho, de 4 de julho de 2012, relativa aos resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos (REEE). (2012). Jornal Oficial da União Europeia, L 197 de 24.7.2012. <https://data.europa.eu/eli/dir/2012/19/oj>

Dhir, A., Koshta, N., Goyal, R. K., Sakashita, M., & Almotairi, M. (2021). Behavioral reasoning theory (BRT) perspectives on E-waste recycling and management. *Journal of Cleaner Production*, 280. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124269>

Ellen MacArthur Foundation. (2018). *Circular Consumer Electronics: An initial exploration*.

Ellen MacArthur Foundation. (2019). Circular economy butterfly diagram.

Eurostat. (2024). *Waste electrical and electronic equipment (WEEE) by waste management operations and by type of equipment [env_waseleeos]*. European Commission. https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/env_waseleeos_custom_18414573/default/able (consultado em outubro de 2024).

Evans, R., & Vermeulen, W. J. V. (2021). Governing electronics sustainability: Meta-evaluation of explanatory factors influencing modes of governance applied in the electronics value chain. In *Journal of Cleaner Production* (Vol. 278). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122952>

Forrester, J. W. (2016). Learning through System Dynamics as Preparation for the 21st Century. *Dyn. Rev*, 32, 187–203. <https://doi.org/10.1002/sdr>

Fuchs, D. A., & Lorek, S. (2005). Sustainable consumption governance: A history of promises and failures. *Journal of Consumer Policy*, 28(3), 261–288. <https://doi.org/10.1007/s10603-005-8490-z>

Georgiadis, P., & Besiou, M. (2008). Sustainability in electrical and electronic equipment closed-loop supply chains: A System Dynamics approach. *Journal of Cleaner Production*, 16(15), 1665–1678. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2008.04.019>

Glavič, P. (2021). Evolution and current challenges of sustainable consumption and production. In *Sustainability (Switzerland)* (Vol. 13, Issue 16). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/su13169379>

Glöser-Chahoud, S., Pfaff, M., Walz, R., & Schultmann, F. (2019). Simulating the service lifetimes and storage phases of consumer electronics in Europe with a cascade stock and flow model. *Journal of Cleaner Production*, 213, 1313–1321. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.12.244>

Guzzo, D., Pigosso, D. C. A., Videira, N., & Mascarenhas, J. (2022a). A system dynamics-based framework for examining Circular Economy transitions. *Journal of Cleaner Production*, 333. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129933>

Guzzo, D., Rodrigues, V. P., Pigosso, D. C. A., & Mascarenhas, J. (2022b). Analysis of national policies for Circular Economy transitions: Modelling and simulating the Brazilian industrial agreement for electrical and electronic equipment. *Waste Management*, 138, 59–74. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.11.017>

Guzzo, D., Walrave, B., Videira, N., Oliveira, I. C., & Pigosso, D. C. A. (2024). Towards a systemic view on rebound effects: Modelling the feedback loops of rebound mechanisms. *Ecological Economics*, 217. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2023.108050>

Haase, M., Bernegger, H., & Meslec, M. (2024). Stakeholder Mapping for Value Creation of New Circular Business Models. *Lecture Notes in Civil Engineering*, 489 LNCE, 325–334. https://doi.org/10.1007/978-3-031-57800-7_30

Haraldsson, H. V. (2004). Introduction to system thinking and causal loop diagrams (pp. 3-4). Lund, Sweden: Department of chemical engineering, Lund University.

Harris, S., Romare, M., & Zhang, Y. (2025). Comparative life cycle assessment of circular and linear product versions for a motorboat and smartphone. *Sustainable Production and Consumption*, 57, 213–225. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2025.03.023>

Hettiarachchi, B. D., Brandenburg, M., & Seuring, S. (2022). Connecting additive manufacturing to circular economy implementation strategies: Links, contingencies and causal loops. *International Journal of Production Economics*, 246. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2022.108414>

Hunger, T., Arnold, M., & Ulber, M. (2024). Circular value chain blind spot – A scoping review of the 9R framework in consumption. In *Journal of Cleaner Production* (Vol. 440). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.140853>

Indrawati, Widarmanti, T., Ramantoko, G., Pillai, S. K. B., & Rachmawati, I. (2024). Towards a Unified Model of Planned Obsolescence and Innovation Adoption in Consumer Behavior: A Literature Review and Conceptual Proposition using the Stimulus-Organism-Response Framework. *Management and Production Engineering Review*, 15(2), 25–41. <https://doi.org/10.24425/mper.2024.151128>

Ipaki, B., & Hosseini, Z. (2025). Repair-oriented design and manufacturing strategies for circular electronic products, from mass customization/standardization to scalable repair economy. *Results in Engineering*, 25. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.104169>

Kim, D. H., & Anderson, V. (1998). Systems archetype basics. Waltham, Mass, Pegasus Communications Inc.

Kim, H., & Andersen, D. F. (2012). Building confidence in causal maps generated from purposive text data: Mapping transcripts of the Federal Reserve. *System Dynamics Review*, 28(4), 311–328. <https://doi.org/10.1002/sdr.1480>

Lane, D. C. (2008). The emergence and use of diagramming in system dynamics: A critical account. *Systems Research and Behavioral Science*, 25(1), 3–23. <https://doi.org/10.1002/sres.826>

Leitão, F. O., de Sousa Martins, T., Guarnieri, P., & Ouro-Salim, O. (2023). Transition from linear to circular economy of electrical and electronic equipment: A review. *Business Strategy and Development*, 6(3), 430–446. <https://doi.org/10.1002/bsd2.249>

Liu, T., Zhang, Q., Zheng, Z., Wu, S., & Weng, Z. (2022). Stakeholder Analysis of the Waste Electrical and Electronic Equipment Internet Recycling Industry. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(16). <https://doi.org/10.3390/ijerph191610003>

Malinauskaite, J., & Erdem, F. B. (2021). Planned Obsolescence in the Context of a Holistic Legal Sphere and the Circular Economy. *Oxford Journal of Legal Studies*, 41(3), 719–749. <https://doi.org/10.1093/ojls/gqaa061>

May, S. O., & Steuer, B. (2025). Electrical and electronic equipment repair in a circular economy: Investigating consumer behaviour in Hong Kong. *Resources, Conservation and Recycling*, 215. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2024.108036>

McGloin, H., Studley, M., Mawle, R., & Winfield, A. F. T. (2024). Understanding consumer attitudes towards second-hand robots for the home. *Frontiers in Robotics and AI*, 11. <https://doi.org/10.3389/frobt.2024.1324519>

Miao, S., Wang, T., & Chen, D. (2017). System dynamics research of remanufacturing closed-loop supply chain dominated by the third party. *Waste Management and Research*, 35(4), 379–386. <https://doi.org/10.1177/0734242X16684384>

Mihai, F. C., Gnoni, M. G., Meidiana, C., Ezeah, C., & Elia, V. (2019). Waste electrical and electronic equipment (WEEE): Flows, quantities, and management—a global scenario. In *Electronic Waste Management and Treatment Technology* (pp. 1–34). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816190-6.00001-7>

Mohajan, D., & Mohajan, H. K. (2022). Exploration of Coding in Qualitative Data Analysis: Grounded Theory Perspective. *Research and Advances in Education*, 1(6), 50–60. <https://doi.org/10.56397/rae.2022.12.07>

Newaz, M. S., & Appolloni, A. (2024). Evolution of behavioral research on E-waste management: Conceptual frameworks and future research directions. *Business Strategy and the Environment*, 33(2), 477–503. <https://doi.org/10.1002/bse.3503>

Patil, R. A., & Ramakrishna, S. (2020). A comprehensive analysis of e-waste legislation worldwide. In *Environmental Science and Pollution Research* (Vol. 27, Issue 13, pp. 14412–14431). Springer. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-07992-1>

Puzzo, G., & Prati, G. (2024). Psychological correlates of e-waste recycling intentions and behaviors: A meta-analysis. In *Resources, Conservation and Recycling* (Vol. 204). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2024.107462>

Regulamento (UE) 2024/1781 do Parlamento Europeu e do Conselho, de 13 de junho de 2024, que estabelece um regime para a definição de requisitos de conceção ecológica dos produtos sustentáveis, altera a Diretiva (UE) 2020/1828 e o Regulamento (UE) 2023/1542, e revoga a Diretiva 2009/125/CE. (2024). *Jornal Oficial da União Europeia*, L de 28.6.2024. <https://data.europa.eu/eli/reg/2024/1781/oj>

República Portuguesa. (2023). *Resolução do Conselho de Ministros n.º 13/2023 — Aprova a Estratégia Nacional para as Compras Públicas Ecológicas 2030 (ECO360)*. Diário da República, 1.ª série, n.º 42, 28 de fevereiro de 2023. Agência Portuguesa do Ambiente. https://encpe.apambiente.pt/sites/default/files/documentos/RCM_13.2023_ECO360.pdf

Rizos, V., & Bryhn, J. (2022). Implementation of circular economy approaches in the electrical and electronic equipment (EEE) sector: Barriers, enablers and policy insights. *Journal of Cleaner Production*, 338. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130617>

Roberts, H., Milios, L., Mont, O., & Dalhammar, C. (2023). Product destruction: Exploring unsustainable production-consumption systems and appropriate policy responses. *Sustainable Production and Consumption*, 35, 300–312. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2022.11.009>

Roskladka, N., Bressanelli, G., Saccani, N., & Miragliotta, G. (2025). Repairable electronic products for the circular economy: a review of design for repair features, practices and measures to contrast obsolescence. In *Discover Sustainability* (Vol. 6, Issue 1). Springer Nature. <https://doi.org/10.1007/s43621-024-00753-x>

Sala, S., Crenna, E., Secchi, M., & Sanyé-Mengual, E. (2020). Environmental sustainability of European production and consumption assessed against planetary boundaries. *Journal of Environmental Management*, 269. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110686>

Sandberg, M. (2021). Sufficiency transitions: A review of consumption changes for environmental sustainability. In *Journal of Cleaner Production* (Vol. 293). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126097>

Shahidzadeh, M. H., & Shokouhyar, S. (2023). Toward the closed-loop sustainability development model: a reverse logistics multi-criteria decision-making analysis. *Environment, Development and Sustainability*, 25(5), 4597–4689. <https://doi.org/10.1007/s10668-022-02216-7>

Shittu, O. S., Williams, I. D., & Shaw, P. J. (2021). Global E-waste management: Can WEEE make a difference? A review of e-waste trends, legislation, contemporary issues and future challenges. In *Waste Management* (Vol. 120, pp. 549–563). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.10.016>

Sonego, M., Echeveste, M. E. S., & Debarba, H. G. (2022). Repair of electronic products: Consumer practices and institutional initiatives. In *Sustainable Production and Consumption* (Vol. 30, pp. 556–565). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2021.12.031>

Stevens, A. (2023). The challenge of introducing design for the circular economy in the electronics industry: A proposal for metrics. In *Circular Economy* (Vol. 2, Issue 3). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.cec.2023.100051>

Svensson-Hoglund, S., Richter, J. L., Maitre-Ekern, E., Russell, J. D., Pihlajarinne, T., & Dalhammar, C. (2021). Barriers, enablers and market governance: A review of the policy landscape for repair of consumer electronics in the EU and the U.S. *Journal of Cleaner Production*, 288. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125488>

Svensson-Hoglund, S., Russell, J. D., & Richter, J. L. (2023). A Process Approach to Product Repair from the Perspective of the Individual. *Circular Economy and Sustainability*, 3(3), 1327–1359. <https://doi.org/10.1007/s43615-022-00226-1>

Tasaki, T., Hashimoto, S., & Moriguchi, Y. (2006). A quantitative method to evaluate the level of material use in lease/reuse systems of electrical and electronic equipment. *Journal of Cleaner Production*, 14(17), 1519–1528. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2006.01.020>

Wan, P. K. F., & Jiang, S. (2025). Enabling a dynamic information flow in digital product passports during product use phase: A literature review and proposed framework. In *Sustainable Production and Consumption* (Vol. 54, pp. 362–374). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2025.01.014>

Yamamoto, H., & Murakami, S. (2022). Which consumer psychological factors influence the lifetime of consumer electronic products? A case study of personal computers in Japan. *Waste Management*, 144, 233–245. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2022.03.030>

A.1 Guião de entrevista

SECÇÃO I – Validação dos arquétipos por grupo de estratégias (R0–R2, R3–R7, R8–R9)

Pergunta 1 – Estratégias R0–R2 (Recusar, Repensar, Reduzir)

- 1.1. Na sua opinião, que efeito(s) genéricos têm as estratégias R0–R2, como a recusa de consumo desnecessário de produtos, a redução no consumo de recursos e o repensar dos modelos de produção (e.g., oferecer serviços em vez de produtos) no ciclo de vida de EEE.
- 1.2. Concorda que estas estratégias tenham como efeito
 - A. Redução do volume de compra e dos impactes ambientais no consumo
 - B. Redução do volume de produção e dos impactes ambientais do fabrico
- 1.3. Identifica alguma consequência ou efeito secundário não desejado no sistema que poderá resultar da adoção deste tipo de estratégias? (perda de lucro)

Pergunta 2 – Estratégias R3–R7 (Reutilizar, Reparar, Recondicionar, Remanufaturar, Reaproveitar)

- 1.1. Na sua opinião, que efeito(s) genéricos têm as estratégias de prolongamento da vida útil dos produtos R3–R7, como a reparação, recondicionamento ou reutilização de componentes no ciclo de vida de EEE.
- 1.2. Concorda que estas estratégias tenham como efeito a diminuição do descarte e da necessidade de substituição e por outro lado uma maior utilização dos produtos?
- 1.3. Identifica alguma consequência ou efeito secundário não desejado no sistema

que poderá resultar da adoção deste tipo de estratégias?

Pergunta 3 – Estratégias R8–R9 (Reciclar, Recuperar)

1.1. Na sua opinião, que efeito(s) genéricos têm as estratégias que atuam no fim de vida dos produtos R8-R9, como a reciclagem e recuperação de materiais no ciclo de vida de EEE.

1.2. Concorda que estas estratégias tenham como efeito a diminuição dos impactes ambientais relativos à produção e destino final dos EEE?

1.3. Identifica alguma consequência ou efeito secundário não desejado no sistema que poderá resultar da adoção deste tipo de estratégias?

SECÇÃO II – Validação de diagramas causais das medidas de política de economia circular

Pergunta 4 – Efeito esperado das medidas

“Tem conhecimento da medida de criar um passaporte digital de produto prevista no Regulamento.... ESPR? Se sim, que efeitos espera que tenha o PDP tenha prática na prática?”

- Quais mudanças espera ver na cadeia de valor/ciclo de vida dos EEE?
- A medida ativa alguma estratégia circular em particular (ex. reparação, recolha)?

Pergunta 5 – Eficácia das medidas

“Qual a medida, das que vimos ou outras, que considera ser mais eficaz para promover a circularidade do setor” – Porquê? (ver o caminho causa efeito)

SECÇÃO III – Barreiras e oportunidades para a circularidade

Pergunta 6 – Barreiras

“Na sua perspetiva, quais são as duas principais barreiras à implementação de estratégias circulares no setor dos produtos eletrónicos?”

Pergunta 7 – Oportunidades

“E quais são, na sua opinião, as duas principais oportunidades que podem ajudar a acelerar a circularidade neste setor?”



2025

Martim Esteves

Desenvolvimento de arquétipos causais para a análise sistémica de estratégias de circularidade no setor dos equipamentos elétricos e eletrónicos