

MESTRADO EM ENGENHARIA DO AMBIENTE 2024/2025

**CICLO DE VIDA DA REPARAÇÃO DE OBJETOS FORA DE USO DO TIPO
ELÉTRICO E ELETRÓNICO**

MATILDE ALICE FRANÇA PEREIRA OLIVEIRA

Dissertação submetida para obtenção do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA DO AMBIENTE

Presidente do Júri:

Adrián Manuel Tavares da Silva, Professor Associado do Departamento de Engenharia
Química da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Orientador Académico:

Joana Filipa de Jesus Rodrigues Pesqueira, Doutorada de Nível Inicial do Departamento de
Engenharia Química e Biológica da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Coorientador Académico:

Joana Maia Moreira Dias, Professor Associado do Departamento de Engenharia Mecânica da
Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Supervisor na Empresa:

Mónica Cristina Figueiredo Fernandes Pinto, Coordenadora das Áreas da Gestão da
Qualidade, Ambiente e Ecocentros, na Empresa Municipal de Ambiente do Porto E.M.S.A –
Porto Ambiente, pertencente à Direção de Gestão de Pessoas, Desenvolvimento
Organizacional e Serviços de Apoio ao Município

setembro, 2025

À minha família e amigos,

“Sempre parece impossível até que seja feito”

Nelson Mandela

AGRADECIMENTOS

Ao chegar ao fim desta etapa tão significativa, não posso deixar de expressar a minha mais profunda gratidão a todos aqueles que, de forma direta ou indireta, contribuíram para que esta caminhada fosse possível e verdadeiramente transformadora.

O conhecimento construído ao longo destes anos não é fruto apenas do meu esforço individual, mas resultado de uma rede de apoio, inspiração e ensinamentos que me acompanharam.

À Doutora Joana Pesqueira, cujo apoio incansável e orientação exemplar foram decisivos ao longo deste percurso, deixo o meu mais profundo reconhecimento. A sua paciência, compreensão e disponibilidade transformaram cada desafio numa oportunidade de aprendizagem, tornando estes últimos meses de trabalho mais enriquecedores. À Professora Joana Maia Dias, agradeço o vasto conhecimento, a forma clara e envolvente com que transmitiu os conteúdos, a capacidade de oferecer soluções, de contornar obstáculos e a sua prestabilidade.

À Eng.^a Mónica Pinto, deixo o meu sincero agradecimento por ter aberto as portas do mundo profissional a esta investigação e pelos ensinamentos práticos que foram essenciais para dar vida e aplicação concreta a este projeto. Ao técnico André, agradeço pelo suporte essencial e absolutamente fundamental, cuja disponibilidade, flexibilidade e competência resolveram vários desafios ao longo do caminho. É, sem dúvida, uma pessoa excelente para trabalhar, com uma vontade constante de querer aprender e contribuir. À Beatriz Henrique, pela sua prestabilidade e clareza, e por me ter auxiliado sempre que precisei, transmitindo simpatia em todas as situações.

Aos restantes professores que encontrei ao longo destes anos, o meu profundo agradecimento. Cada um, à sua maneira, contribuiu para a construção do meu pensamento crítico e para a paixão que hoje levo por esta área de estudo.

À minha família, pelo apoio constante, o meu sentido agradecimento. Pelo apoio incondicional, pelas palavras certas nos momentos difíceis e pelo amor que nunca me faltou. Celebraram cada pequeno passo e nunca duvidaram da minha capacidade. Este trabalho é tanto meu como vosso, com especial referência aos meus pais, irmãos, avó e afilhada.

Ao meu grupo de amigos de longa data, que me acompanham em todas as fases da minha vida, deixo o meu profundo agradecimento. Pela lealdade que nunca falta, pelo apoio nos momentos mais exigentes e pelas celebrações das pequenas e grandes conquistas. A vossa amizade constante foi um apoio essencial, uma fonte de motivação e, sem dúvida, a minha estabilidade ao longo de todo este percurso.

Às minhas amigas de mestrado, que se tornaram muito especiais, deixo o meu agradecimento pela companhia e apoio ao longo desta etapa. Estiveram tanto nas celebrações como nos momentos mais complicados. Sem vocês, não seria igual. Agradeço, em especial, à Mafalda, pelos cinco anos em que caminhamos juntas desde o primeiro dia, tornando esta experiência ainda mais significativa.

Estes anos foram mais do que uma formação académica, foram anos de descoberta, de superação e de crescimento. Esta etapa termina, mas levo comigo memórias, vínculos e aprendizagens que me moldaram e que ficarão comigo para sempre.

Este trabalho carrega um pouco de cada pessoa mencionada. As palavras aqui registadas não alcançam a dimensão do meu agradecimento, mas espero que possam transmitir, o quanto sou grata por ter partilhado esta jornada com pessoas tão especiais.

A Dr.^a Joana Pesqueira, orientadora desta dissertação/projeto, é membro do LSRE-LCM financiado pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia, I.P. /MCTES através de fundos nacionais: LSRE-LCM, UID/50020/2025; ALiCE, LA/P/0045/2020 (DOI: 10.54499/LA/P/0045/2020). A Prof. Joana Maia Moreira Dias, coorientadora desta dissertação, é membro integrado do LEPABE – Laboratório de Engenharia de Processos, Ambiente, Biotecnologia e Energia, financiado por fundos nacionais através da FCT/MCTES (PIDDAC): LEPABE, UIDB/00511/2020 (DOI: 10.54499/UIDB/00511/2020) e UIDP/00511/2020 (DOI: 10.54499/UIDP/00511/2020), e ALiCE, LA/P/0045/2020 (DOI: 10.54499/LA/P/0045/2020).

RESUMO

O presente estudo, realizado no âmbito do projeto EcoPorto, uma iniciativa da Porto Ambiente que promove a economia circular através da reparação e reutilização de equipamentos elétricos e eletrónicos (EEE), foca-se na avaliação ambiental da reparação desses equipamentos, com destaque para os aspiradores, procurando quantificar os benefícios da extensão do ciclo de vida em comparação com o modelo linear tradicional de descarte.

A investigação estrutura-se em três eixos principais, que incluem a realização de uma Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) comparativa entre cenários de substituição e reparação, o cálculo de indicadores de circularidade e reparabilidade, e a análise do comportamento de consumo após a reparação, com base em dados recolhidos diretamente no EcoPorto.

Os resultados da ACV, realizada com base nas normas ISO 14040 e 14044 e modelada no software SimaPro, demonstram que a reparação, nos moldes em que é efetuada atualmente, permite reduzir significativamente os impactos ambientais. As reduções mais relevantes ocorrem nas seguintes categorias: eutrofização marinha (47%), escassez de recursos minerais (37%), ecotoxicidade terrestre (30%) e toxicidade humana carcinogénica (28%). A análise indica que a reparação no EcoPorto proporciona uma redução de impactos ambientais entre 2% e 47%, dependendo do momento da avaria e da categoria de impacto analisada. Além disso, a fase de utilização de um aspirador demonstrou ser a etapa do ciclo de vida com maior contribuição para os impactos ambientais.

No que respeita aos indicadores operacionais, registou-se um Índice de Reparabilidade de 73% para aspiradores e 64% para micro-ondas, refletindo a viabilidade técnica da reparação. O Índice de Circularidade dos aspiradores (escala 0-1) variou entre 0,138 e 0,822 e dos micro-ondas entre 0,172 e 0,561, dependendo do estado e da modularidade dos equipamentos. A análise de consumo evidenciou uma elevada taxa de aceitação dos produtos reparados, com 83% dos equipamentos a serem efetivamente doados e reutilizados, maioritariamente aspiradores, candeeiros, micro-ondas e termoventiladores.

Conclui-se que a reparação constitui uma estratégia ambientalmente vantajosa, economicamente viável e socialmente inclusiva, capaz de reduzir a pressão sobre os recursos naturais, minimizar a produção de resíduos e promover empregos locais. O projeto EcoPorto posiciona-se como um caso de estudo relevante na transição para uma economia circular e valida a reparação como prática eficaz para alinhar a gestão de Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrónicos (REEE) com as metas da União Europeia e com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável, nomeadamente o ODS 8 (Trabalho Digno e Crescimento Económico), o ODS 11 (Cidades e Comunidades Sustentáveis), o ODS 12 (Produção e Consumo Sustentáveis) e o ODS 13 (Ação Climática).

Este estudo pioneiro oferece, assim, uma perspetiva integrada sobre o ecossistema da reparação, unindo a métrica ambiental rigorosa da ACV aos indicadores operacionais do mundo real e ao comportamento efetivo do consumidor. Ao fazê-lo, não valida apenas os benefícios da economia circular, mas fornece um modelo estratégico prático e um sistema de avaliação sólido que potenciam a sua implementação concreta, escalabilidade e sustentabilidade a longo prazo.

Palavras-chave: Avaliação do Ciclo de Vida; Economia Circular; Reparabilidade; Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrónicos.

ABSTRACT

This study, conducted within the scope of the EcoPorto project, an initiative by Porto Ambiente that promotes the circular economy through the repair and reuse of electrical and electronic equipment (EEE), focuses on the environmental assessment of repairing such equipment, with an emphasis on vacuum cleaners. It seeks to quantify the benefits of extending product lifecycles compared to the traditional linear model of disposal.

The research is structured around three main pillars: conducting a comparative Life Cycle Assessment (LCA) between replacement and repair scenarios; calculating circularity and reparability indicators; and analyzing post-repair consumption behavior based on data collected directly from EcoPorto.

The LCA results, performed according to ISO 14040 and 14044 standards and modeled using SimaPro software, demonstrate that repair, as currently practiced, significantly reduces environmental impacts. The most substantial reductions occur in the following categories: marine eutrophication (47%), mineral resource scarcity (37%), terrestrial ecotoxicity (30%), and human carcinogenic toxicity (28%). The analysis indicates that repair at EcoPorto provides an environmental impact reduction of between 2% and 47%, depending on the timing of the failure and the impact category analyzed. Furthermore, the use phase of a vacuum cleaner was identified as the lifecycle stage with the greatest contribution to environmental impacts.

Regarding operational indicators, a Reparability Index of 73% was recorded for vacuum cleaners and 64% for microwaves, reflecting the technical feasibility of repair. The Circularity Index for vacuum cleaners (scale 0-1) ranged from 0.138 to 0.822, and for microwaves from 0.172 to 0.561, depending on the equipment's condition and modularity. The consumption analysis revealed a high acceptance rate for repaired products, with 83% of the equipment being effectively donated and reused, predominantly vacuum cleaners, lamps, microwaves, and heaters.

It is concluded that repair constitutes an environmentally advantageous, economically viable, and socially inclusive strategy, capable of reducing pressure on natural resources, minimizing waste production, and promoting local employment. The EcoPorto project stands as a relevant case study in the transition towards a circular economy and validates repair as an effective practice for aligning the management of Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE) with European Union targets and the Sustainable Development Goals (SDGs), specifically SDG 8 (Decent Work and Economic Growth), SDG 11 (Sustainable Cities and Communities), SDG 12 (Responsible Consumption and Production), and SDG 13 (Climate Action).

This pioneering study thus offers an integrated perspective on the repair ecosystem, combining the rigorous environmental metrics of LCA with real-world operational indicators and actual consumer behavior. In doing so, it not only validates the benefits of the circular economy but also provides a practical strategic model and a robust evaluation system that enhance its concrete implementation, scalability, and long-term sustainability.

Keywords: Life Cycle Assessment, Circular Economy; Reparability; Waste Electrical and Electronic Equipment.

ÍNDICE GERAL

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	ENQUADRAMENTO	1
1.2	OBJETIVOS.....	2
1.3	ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	3
1.4	EMPRESA MUNICIPAL DE AMBIENTE DO PORTO E.M., S.A.....	4
1.4.1	PROJETO EcoPORTO.....	4
2	ESTADO DA ARTE.....	7
2.1	RESÍDUOS DE EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS E ELETRÓNICOS (REEE).....	7
2.1.1	EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS E ELETRÓNICOS COLOCADOS NO MERCADO E REEE PROCESSADOS NA UE	8
2.1.2	EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS E ELETRÓNICOS (EEE) COLOCADOS NO MERCADO E REEE RECOLHIDOS POR PAÍS	9
2.2	ENQUADRAMENTO DA REPARAÇÃO E REUTILIZAÇÃO NO CONTEXTO DA ECONOMIA CIRCULAR	11
2.3	LEGISLAÇÃO E POLÍTICAS EUROPEIAS PARA OS EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS E ELETRÓNICOS (EEE)	15
2.4	FATORES QUE INFLUENCIAM A ESCOLHA ENTRE REPARAR OU SUBSTITUIR UM OBJETO.....	18
2.5	TECNOLOGIAS E MÉTODOS DE REPARAÇÃO	19
2.6	BARREIRAS, DESAFIOS E SOLUÇÕES À REPARAÇÃO DE OBJETOS FORA DE USO	20
2.7	AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DA REPARAÇÃO DE EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS E ELETRÓNICOS	21
3	METODOLOGIA.....	25
3.1	AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA (ACV)	25
3.2	CÁLCULO DE INDICADORES DE CIRCULARIDADE E REPARABILIDADE.....	26
4	ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	27
4.1	AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA (ACV)	27
4.1.1	DEFINIÇÃO DE OBJETIVO E ÂMBITO	27
4.1.2	ANÁLISE DO INVENTÁRIO DO CICLO DE VIDA (ICV).....	32
4.1.3	AVALIAÇÃO DOS IMPACTES DO CICLO DE VIDA (IACV) E INTERPRETAÇÃO	42
4.2	ANÁLISE INTEGRADA DOS INDICADORES DE DESEMPENHO: REPARABILIDADE E CIRCULARIDADE EM ASPIRADORES E MICRO-ONDAS	50
4.3	ANÁLISE DO CONSUMO E TENDÊNCIAS DE AQUISIÇÃO DE EQUIPAMENTOS RECUPERADOS	53
5	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS.....	57
5.1	CONCLUSÕES DO ESTUDO	57
5.2	TRABALHOS FUTUROS	58

6	OBJETIVOS DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL	61
6.1	CONTEXTUALIZAÇÃO DOS OBJETIVOS DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL (ODS).....	61
6.2	CONTRIBUIÇÃO DA DISSERTAÇÃO PARA OS OBJETIVOS DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL.....	62
	REFERÊNCIAS.....	65
	APÊNDICE	69

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. OFICINA DE REPARAÇÃO (EcoPORTO) E ARMAZÉM, VISÃO GERAL DOS ESPAÇOS QUE INTEGRAM O PROJETO.	5
FIGURA 2. INTERIOR DA OFICINA DE REPARAÇÃO (EcoPORTO), EQUIPADO COM BANCADAS DE TRABALHO, MOBILIÁRIO DE ARRUMAÇÃO E ORGANIZAÇÃO REUTILIZADOS (A) E ARMAZÉM DESTINADO AO ACONDICIONAMENTO DE MATERIAIS PARA TESTE INICIAL E EQUIPAMENTOS JÁ REPARADOS (B).	5
FIGURA 3. EEE COLOCADOS NO MERCADO E REEE RECOLHIDOS, TRATADOS, RECICLADOS, RECUPERADOS OU PREPARADOS PARA REUTILIZAÇÃO NA UE (2012–2022, MIL TONELADAS) (EUROSTAT, 2024).	8
FIGURA 4. PERCENTAGEM TOTAL DE RESÍDUOS DE EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS E ELETRÓNICOS RECOLHIDOS EM 2022, COM BASE NO PESO MÉDIO DOS EQUIPAMENTOS COLOCADOS NO MERCADO NOS 3 ANOS ANTERIORES (EUROSTAT, 2024).	9
FIGURA 5. QUANTIDADE DE EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS E ELETRÓNICOS INTRODUZIDOS NO MERCADO NOS 3 ANOS ANTERIORES, BEM COMO OS RESÍDUOS PRODUZIDOS E RECOLHIDOS EM 2022, EXPRESSOS EM KG/HAB (EUROSTAT, 2024).	10
FIGURA 6. DIAGRAMA DA BORBOLETA DA ECONOMIA CIRCULAR (ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, 2015).	11
FIGURA 7. REPRESENTAÇÃO DA HIERARQUIA DE RESÍDUOS DA UNIÃO EUROPEIA.	12
FIGURA 8. GESTÃO DOS REEE EFETUADA PELA AERESS (ADAPTADO DE AERESS, 2023B).	13
FIGURA 9. INSTRUÇÃO DE TRABALHO, ECOCENTRO, FORNECIDO PELA EMPRESA MUNICIPAL DE AMBIENTE DO PORTO.	27
FIGURA 10. INSTRUÇÃO DE TRABALHO, AGENDAMENTO DA RECOLHA AO DOMICÍLIO, FORNECIDO PELA EMPRESA MUNICIPAL DE AMBIENTE DO PORTO.	28
FIGURA 11. INSTRUÇÃO DE TRABALHO, RECOLHA AO DOMICÍLIO, FORNECIDO PELA EMPRESA MUNICIPAL DE AMBIENTE DO PORTO.	29
FIGURA 12. CIRCUITO OPERACIONAL DO PROJETO EcoPORTO.	30
FIGURA 13. COMPARAÇÃO ENTRE UM MODELO LINEAR E UM MODELO CIRCULAR NA ACV DE UM EQUIPAMENTO.	33
FIGURA 14. REPRESENTAÇÃO DO IMPACTE AMBIENTAL DO CENÁRIO 1A (SUBSTITUIÇÃO APÓS 2 ANOS DE USO) NAS 18 CATEGORIAS DE ACV. ESTE CENÁRIO CONTEMPLA A UTILIZAÇÃO DO ASPIRADOR DURANTE 2 ANOS, SEGUIDA DE DESCARTE PARA ATERRO E AQUISIÇÃO DE NOVO EQUIPAMENTO PARA OS RESTANTES 6 ANOS DO PERÍODO DE ANÁLISE.	42
FIGURA 15. REPRESENTAÇÃO DO IMPACTE AMBIENTAL DO CENÁRIO 2A (SUBSTITUIÇÃO APÓS 4 ANOS DE USO) NAS 18 CATEGORIAS DE ACV. ESTE CENÁRIO CONTEMPLA A UTILIZAÇÃO DO ASPIRADOR DURANTE 4 ANOS, SEGUIDA DE DESCARTE PARA ATERRO E AQUISIÇÃO DE NOVO EQUIPAMENTO PARA OS RESTANTES 4 ANOS DO PERÍODO DE ANÁLISE.	43
FIGURA 16. REPRESENTAÇÃO DO IMPACTE AMBIENTAL DO CENÁRIO 3A (SUBSTITUIÇÃO APÓS 6 ANOS DE USO) NAS 18 CATEGORIAS DE ACV. ESTE CENÁRIO CONTEMPLA A UTILIZAÇÃO DO ASPIRADOR DURANTE 6 ANOS, SEGUIDA DE DESCARTE PARA ATERRO E AQUISIÇÃO DE NOVO EQUIPAMENTO PARA OS RESTANTES 2 ANOS DO PERÍODO DE ANÁLISE.	43
FIGURA 17. REPRESENTAÇÃO DOS IMPACTES AMBIENTAIS DOS CENÁRIOS 1B, 2B E 3B (REPARAÇÃO NO EcoPORTO APÓS AVARIA AOS 2, 4 E 6 ANOS, RESPECTIVAMENTE) NAS 18 CATEGORIAS DE ACV. ESTES CENÁRIOS CONTEMPLAM A REPARAÇÃO DO EQUIPAMENTO APÓS AVARIA E SUA UTILIZAÇÃO CONTÍNUA ATÉ AO FINAL DO PERÍODO DE 8 ANOS, EVITANDO A PRODUÇÃO DE UM NOVO ASPIRADOR.	44

FIGURA 18. REPRESENTAÇÃO DO IMPACTE AMBIENTAL DO CENÁRIO 4A NAS 18 CATEGORIAS DE ACV. ESTE CENÁRIO CONTEMPLA A UTILIZAÇÃO CONTÍNUA DO MESMO ASPIRADOR DURANTE TODA A SUA VIDA ÚTIL DE 8 ANOS, SEGUIDA DE DESCARTE PARA ATERRO, SEM OCORRÊNCIA DE AVARIAS OU NECESSIDADE DE SUBSTITUIÇÃO.	44
FIGURA 19. REPRESENTAÇÃO DOS IMPACTES DOS CENÁRIOS DE SUBSTITUIÇÃO (1A, 2A, 3A) E REPARAÇÃO (1B, 2B, 3B) APÓS AVARIA AOS 2, 4 E 6 ANOS, E DO CENÁRIO DE REFERÊNCIA SEM AVARIA APÓS 8 ANOS (4A), NAS 18 CATEGORIAS DE ACV. PARA CADA CATEGORIA, O CENÁRIO DE MAIOR IMPACTE REPRESENTA 100%, SENDO OS OUTROS EXPRESSOS EM PERCENTAGEM RELATIVA.....	48
FIGURA 20. DISTRIBUIÇÃO DAS TIPOLOGIAS DE EQUIPAMENTOS QUE CHEGAM AO CONSUMIDOR APÓS RECUPERAÇÃO NO PROJETO EcoPORTO (PERÍODO DE 24 DE SETEMBRO DE 2024 A 14 DE ABRIL DE 2025).....	53
FIGURA 21. DISTRIBUIÇÃO POR ESTADOS DE OFERTA DOS EQUIPAMENTOS.	55
FIGURA 22. OS 17 OBJETIVOS DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL (ODS) (UNITED NATIONS, 2015).....	61

ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 1. CLASSIFICAÇÃO DOS EEE POR CATEGORIAS. ADAPTADO DO ANEXO III DA DIRETIVA 2012/19/UE DO PARLAMENTO EUROPEU E DO CONSELHO, DE 4 DE JULHO DE 2012, RELATIVA AOS REEE.	15
TABELA 2. OBJETIVOS MÍNIMOS DE VALORIZAÇÃO, PREPARAÇÃO PARA REUTILIZAÇÃO E/OU RECICLAGEM DE REEE (A PARTIR DE 15 DE AGOSTO DE 2018), DIRETIVA 2012/19/EU, ANEXO V.	16
TABELA 3. IDENTIFICAÇÃO, COMPOSIÇÃO MATERIAL E PESO INDIVIDUAL DE CADA COMPONENTE CONSTITUINTE DO EQUIPAMENTO, RESULTANTE DO PROCESSO DE DESMONTAGEM E ANÁLISE (PÉREZ-BELIS ET AL., 2017).	36
TABELA 4. CARACTERÍSTICAS DA FROTA DE DISTRIBUIÇÃO E COMERCIALIZAÇÃO (DADOS FORNECIDOS PELA EMPRESA MUNICIPAL DO AMBIENTE).	36
TABELA 5. CONSUMO ENERGÉTICO TOTAL DOS ASPIRADORES, kWh, EM FUNÇÃO DA POTÊNCIA NOMINAL, DO TEMPO MÉDIO DE VIDA ÚTIL E DA UTILIZAÇÃO ANUAL.	37
TABELA 6. DESCRIÇÃO DOS CENÁRIOS (1A,1B,2A,2B,3A,3B,4A) ANALISADOS PARA AVALIAÇÃO DO IMPACTE DA REPARAÇÃO VS. SUBSTITUIÇÃO DE UM ASPIRADOR NUM PERÍODO DE 8 ANOS.	38
TABELA 7. CONTRIBUTO DAS DIFERENTES FASES DO CICLO DE VIDA PARA CADA CATEGORIA DE IMPACTE AMBIENTAL EM TODOS OS CENÁRIOS DE ACORDO COM A MODELAÇÃO NO SIMAPRO UTILIZANDO O MÉTODO ReCiPe 2016 MIDPOINT (H).	40
TABELA 8. INVENTÁRIO DO CICLO DE VIDA DE UM ASPIRADOR ORGANIZADO POR FASE, COM IDENTIFICAÇÃO DOS MATERIAIS, COMPONENTES CORRESPONDENTES E PROCESSOS ASSOCIADOS NA BASE DE DADOS ECOINVENT.	41
TABELA 9. SÍNTESE COMPARATIVA DA REDUÇÃO PERCENTUAL DO IMPACTE AMBIENTAL DA REPARAÇÃO FACE À SUBSTITUIÇÃO, PARA DIFERENTES MOMENTOS DE AVARIA.	49
TABELA 10. DISTRIBUIÇÃO DOS 1466 EQUIPAMENTOS PROCESSADOS NO EcoPORTO, POR ESTADO OPERACIONAL FINAL.	54
TABELA 11. CONTRIBUIÇÃO DA DISSERTAÇÃO PARA OS OBJETIVOS DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL.	63

NOMENCLATURA

IC	[-]	Índice de Circularidade, fração (0 – 1)
IR	[%]	Índice de Reparabilidade
t	[min, h, a]	Tempo em minutos, horas e anos, respetivamente
W	[W]	Potência
kWh	[kWh]	Quilowatt-hora (kWh)
kg	[kg]	Quilograma
km	[km]	Quilómetro
m ²	[m ²]	Metro quadrado
MJ	[MJ]	Megajoule
L	[L]	Litro

ABREVIATURAS

ABS	Acrilonitrilo Butadieno Estireno
AERESS	<i>Asociación Española de Recuperadores de Economía Social y Solidaria</i>
Ag	Prata
AICV	Avaliação dos Impactes do Ciclo de Vida
Au	Ouro
AVC	Avaliação do Ciclo de Vida
Cd	Cádmio
CO ₂	Dióxido de Carbono
CPR	Centros de Preparação para a Reutilização
CREW	Centros de Recuperação de Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrónicos
DREEE	Diretiva Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrónicos
DUA	Documento Único Automóvel
EC	Economia Circular
EEE	Equipamentos Elétricos e Eletrónicos
ERP	<i>European Recycling Platform</i>
ESS	Economia Social e Solidária
GEE	Gases com Efeito de Estufa
H	<i>Hierarchist</i>
Hg	Mercúrio
IC	Índice de Circularidade
ICV	Inventário do Ciclo de Vida
IoT	<i>Internet of Things</i>
IPSS	Instituições Particulares de Solidariedade Social
IR	Índice de Reparabilidade
LCA	<i>Life Cycle Assessment</i>
LCC	<i>Life Cycle Costing</i>
LIPOR	Intermunicipalizado de Gestão de Resíduos do Grande Porto
MPC	Matérias-Primas Críticas
Mt	Milhão de toneladas
NO _x	Óxidos de Azoto
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
PAPERSU	Plano de Ação do Plano Estratégico de Gestão de Resíduos Urbanos
Pb	Chumbo
PC	Polícarbonato

PCI	Placa de Circuito Impresso
Pd	Paládio
PERSU 2030	Plano Estratégico para os Resíduos Urbanos 2030
PP	Polipropileno
RAP	Responsabilidade Alargada do Produtor
REEE	Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrónicos
SCRAP	Sistemas Coletivos de Responsabilidade Alargada do Produtor
SDG	<i>Sustainable Development Goal</i>
SO _x	Óxidos de Enxofre
TGR	Taxa de Gestão de Resíduos
UE	União Europeia
WEEE	<i>Waste Electrical and Electronic Equipment</i>

1 INTRODUÇÃO

1.1 ENQUADRAMENTO

Os Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrónicos (REEE), também conhecidos como *e-waste*, consistem em qualquer equipamento elétrico ou eletrónico descartado ou obsoleto (Baldé et al., 2020). Estes resíduos têm vindo a aumentar de forma significativa, impulsionados pelo rápido avanço tecnológico, pela crescente obsolescência programada e pelos hábitos de consumo atuais. A sua composição é altamente complexa, sendo constituída por uma variedade de materiais que vão desde metais preciosos a plásticos e substâncias perigosas (Widmer et al., 2005; Kiddee, Naidu & Wong, 2013).

Esta heterogeneidade dificulta os processos de reciclagem e tratamento, exigindo tecnologias avançadas para a separação e valorização adequadas desses materiais. A gestão inadequada dos REEE implica múltiplas problemáticas ambientais, sociais e económicas. Um dos principais impactes ambientais é a contaminação do solo, água e ar, provocando efeitos tóxicos agudos e crónicos na fauna e flora, bem como na saúde humana (Kiddee, Naidu & Wong, 2013; Robinson, 2009). A exposição prolongada a substâncias tóxicas pode resultar em doenças respiratórias, neurológicas e oncológicas (UNEP, 2019).

Outro desafio importante está relacionado com a complexidade do design dos equipamentos modernos, que dificulta a desmontagem e a recuperação eficiente dos materiais, aumentando os custos e reduzindo a viabilidade económica da reciclagem (Widmer et al., 2005). Economicamente, a perda de materiais valiosos contidos nos REEE representa um desperdício significativo de recursos naturais e financeiros, agravando ainda mais os impactes negativos da sua gestão inadequada.

Face a este cenário, a gestão sustentável dos REEE requer uma abordagem multidimensional, que englobe diversas estratégias e intervenções. Neste contexto, as regulamentações da União Europeia assumem um papel determinante ao estabelecer diretrizes específicas para a gestão dos REEE. Estas incluem, priorizar a prevenção da geração de REEE, promover o uso eficiente dos recursos e a recuperação de matérias-primas secundárias mediante a reutilização, reciclagem e outras formas de valorização dos resíduos, e melhorar o desempenho ambiental de todos os agentes envolvidos no ciclo de vida dos equipamentos elétricos e eletrónicos (European Commission, 2012).

É fundamental promover a recolha seletiva, a reutilização, a reciclagem e a valorização dos resíduos eletrónicos na União Europeia (European Parliament, 2012). A recolha seletiva pressupõe a implantação de sistemas de recolha dedicados, incluindo pontos de entrega, ecopontos e recolhas domiciliárias, para evitar o descarte indiscriminado junto com os resíduos urbanos comuns (Câmara Municipal do Porto, 2017).

A reutilização e a reparação constituem medidas essenciais para promover a extensão da vida útil dos equipamentos por meio de centros de reparação, recondicionamento e redistribuição (Bocken et al., 2016). O potencial destas estratégias destaca-se ao considerar que o ciclo de vida de um equipamento elétrico ou eletrónico, que pode ser dividido em cinco etapas principais – extração de matérias-primas, produção, distribuição, utilização e fim de vida (Widmer et al., 2005) –, é tipicamente linear.

O conceito de economia circular pretende otimizar este ciclo, promovendo a maximização da utilidade e da vida útil dos produtos, a recuperação de materiais e a minimização dos resíduos (Geissdoerfer et al., 2017). Neste sentido, a etapa do fim de vida é essencial para assegurar que estes objetivos sejam alcançados. As decisões realizadas nesta fase, como reparação, reutilização, reciclagem ou eliminação, determinam a eficiência do aproveitamento de recursos e a quantidade final de resíduos produzidos (Bocken et al., 2016).

A reparação, em particular, é uma alternativa estratégica à reciclagem, pois mantém o equipamento funcional e em circulação por mais tempo. Além disso, pode também criar valor económico e social, inclusive através da criação de empregos e da capacitação técnica, promovendo a economia local.

Apesar dos avanços legislativos e dos mecanismos implementados, verifica-se um crescimento acelerado no consumo e descarte de Equipamentos Elétricos e Eletrónicos (EEE), acompanhado por esforços incrementais de recolha e tratamento sustentado no âmbito da União Europeia (UE). Contudo, a discrepância entre o aumento da colocação de novos equipamentos no mercado e o ritmo de recolha e valorização dos resíduos resultantes revela a urgência de estratégias mais eficazes de prevenção, prolongamento do ciclo de vida dos produtos e reforço das práticas de reutilização e reciclagem no contexto da transição para uma economia circular (European Commission, 2012).

O EcoPorto, Centro para a Circularidade da Cidade do Porto, é uma iniciativa da Porto Ambiente que pretende implementar o conceito de economia circular, promovendo a valorização dos resíduos enquanto recurso. Este projeto tem como objetivo promover a reparação e a reutilização de equipamentos elétricos e eletrónicos, contribuindo assim para a redução do desperdício e para a extensão do ciclo de vida dos produtos (Porto Ambiente, 2024).

Além disso, os bens reparados no âmbito do projeto são doados sem qualquer custo associado a quem os adquire, garantindo-lhes uma nova vida e evitando o desperdício (Porto Ambiente, 2024).

Espera-se que o EcoPorto contribua para melhorias ambientais, sociais e económicas, através da valorização de recursos, da promoção da reparação e da capacitação da comunidade (integrando ações de formação) em práticas de circularidade. Estas potenciais melhorias, em particular as de natureza ambiental, serão avaliadas de forma objetiva ao longo deste trabalho.

1.2 OBJETIVOS

Tendo por base os objetivos do EcoPorto, os objetivos específicos desta dissertação são estruturados em torno de 3 eixos fundamentais.

1. Avaliação do Ciclo de Vida (ACV):

Realização de uma análise comparativa entre o ciclo de vida convencional de equipamentos elétricos e eletrónicos, tendo como exemplo os aspiradores, que culmina geralmente na sua eliminação como resíduo, e o ciclo de vida prolongado proporcionado pela intervenção do projeto. Este objetivo contempla uma estimativa dos potenciais impactes ambientais evitados devido à intervenção do projeto.

Através desta ferramenta, será possível estimar possíveis benefícios ambientais resultantes da extinção da necessidade de produção de novos equipamentos e da consequente redução de resíduos gerados. A ACV será, assim, um instrumento essencial para legitimar a eficácia ambiental do projeto recorrendo a uma métrica específica de avaliação de sustentabilidade ambiental.

2. Cálculo de Indicadores de Circularidade e Reparabilidade

De forma a enriquecer a análise e apoiar futuras estratégias de otimização, será realizado o cálculo de indicadores específicos como o Índice de Reparabilidade e o Índice de Circularidade. Estes indicadores permitirão caracterizar o desempenho do projeto em termos de eficiência circular e identificar oportunidades de melhoria na seleção dos objetos e nos processos de reparação.

3. Análise do consumo e das dinâmicas de utilização após a reparação

Finalmente, será realizada uma análise ao comportamento de consumo dos objetos reparados. Estes equipamentos, uma vez funcionais, são disponibilizados numa plataforma digital de doação à comunidade, onde a sua procura por parte dos utilizadores reflete as tendências e preferências de consumo. Esta análise contribuirá para a definição de prioridades futuras no âmbito do projeto.

1.3 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

A dissertação encontra-se organizada em seis capítulos, dispostos de forma lógica e sequencial, nos quais são apresentadas e desenvolvidas as distintas etapas do trabalho realizado.

O Capítulo 1 introduz a dissertação, expondo os principais elementos que sustentam o tema em estudo. Apresenta os resíduos de equipamentos elétricos e eletrónicos, o seu crescimento e a complexidade da sua composição, assim como os impactes ambientais e de saúde decorrentes da sua gestão inadequada. Aborda as dificuldades técnicas e económicas da reciclagem e as estratégias sustentáveis essenciais, como a recolha seletiva, reutilização e reparação, inseridas no conceito de economia circular. Enquadra ainda as políticas da União Europeia que orientam a gestão destes resíduos, sublinhando a necessidade de medidas mais eficazes para a prevenção e valorização dos REEE. Além disso, apresenta o projeto EcoPorto da empresa Porto Ambiente, onde o estágio foi realizado, assim como os principais objetivos que orientam esta dissertação.

O Capítulo 2 aborda o enquadramento da reparação e reutilização no contexto da economia circular, destacando a importância destas práticas para a sustentabilidade. O capítulo explora ainda a legislação e as políticas europeias que regulam o direito à reparação dos equipamentos, bem como os principais fatores que influenciam a decisão entre reparar ou substituir um objeto. São analisadas as tecnologias e métodos de reparação atualmente utilizados, assim como as inovações que têm vindo a surgir neste campo. Adicionalmente, são discutidas as barreiras, desafios e soluções associadas à reparação de objetos fora de uso, enfatizando os impactes ambientais, sociais e económicos decorrentes da produção, do descarte precoce e da reparação destes equipamentos.

O Capítulo 3 apresenta a metodologia utilizada na avaliação do ciclo de vida, com base nas normas ISO 14040 e ISO 14044. São também apresentados os indicadores de circularidade e reparabilidade aplicados.

O Capítulo 4 é dedicado à apresentação e discussão dos resultados obtidos. A análise encontra-se igualmente estruturada em três áreas principais: avaliação do ciclo de vida, indicadores de circularidade e reparabilidade, e, análise do consumo.

O Capítulo 5 apresenta as principais conclusões do estudo, destacando os benefícios ambientais da extensão do ciclo de vida dos equipamentos através da reparação. São também sugeridas possíveis linhas de investigação futura, com vista a aprofundar o conhecimento sobre o impacto e a eficácia de modelos baseados na economia circular aplicados a equipamentos elétricos e eletrónicos.

Por último, o Capítulo 6 estabelece a ligação entre o trabalho desenvolvido nesta dissertação e os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável. Este capítulo realça a importância dos resultados obtidos para o cumprimento das metas globais definidas, demonstrando a contribuição relevante do estudo para a promoção de um desenvolvimento sustentável.

1.4 EMPRESA MUNICIPAL DE AMBIENTE DO PORTO E.M., S.A.

A Empresa Municipal de Ambiente do Porto, E.M., S.A., designada Porto Ambiente, é responsável pela gestão integrada dos resíduos urbanos e pela limpeza do espaço público no município do Porto, alinhando a sua atuação com as diretrizes do Plano de Ação do Plano Estratégico de Gestão de Resíduos Urbanos (PAPERSU) e com as metas estabelecidas no PERSU 2030. Este enquadramento estratégico tem como objetivo assegurar uma gestão eficiente, sustentável e inovadora, contribuindo para a qualidade de vida urbana e para a transição para uma economia circular.

A empresa é responsável pela gestão e construção das infraestruturas necessárias e equipamentos indispensáveis ao funcionamento do sistema municipal de resíduos e à manutenção do espaço público (Câmara Municipal do Porto, 2017). Neste âmbito, assegura, de forma regular, contínua e eficiente, a recolha dos resíduos recicláveis integrados no sistema municipal, incluindo aqueles que venham a ser incorporados pela expansão da rede de recolha seletiva, bem como o seu transporte, triagem, tratamento e valorização, em articulação com entidades como a LIPOR (Serviço Intermunicipalizado de Gestão de Resíduos do Grande Porto).

Garante igualmente a recolha seletiva de resíduos orgânicos, promovendo a sua separação adequada para posterior valorização, e a recolha e transporte dos resíduos urbanos indiferenciados ou equiparados, produzidos no município. A sua atuação abrange ainda a gestão de resíduos específicos, como os provenientes de atividades de construção e demolição (quando devidamente licenciada) e de resíduos industriais não perigosos, assim como a limpeza do espaço público, que inclui varredura manual e mecânica, lavagem de pavimentos, limpeza de sarjetas e manutenção de zonas costeiras.

A empresa opera dois ecocentros: o Ecocentro da Prelada, destinado ao atendimento dos munícipes, e o Ecocentro das Antas, que serve principalmente para apoio operacional e empresarial, facilitando a valorização de resíduos volumosos. Paralelamente, gere uma rede logística eficiente, com 74 rotas diárias que percorrem mais de 3.000 km, garantindo a cobertura total do município (Câmara Municipal do Porto, 2017).

Para além das operações diárias, a Porto Ambiente coordena a execução do Pacto do Porto para o Clima, um projeto ambicioso que incentiva cidadãos e organizações a adotarem medidas com o objetivo de alcançar a neutralidade carbónica, promovendo o seu desenvolvimento contínuo e o alargamento progressivo do número de subscritores e participantes (Câmara Municipal do Porto, 2017).

1.4.1 PROJETO EcoPORTO

O EcoPorto foi inaugurado a 24 de setembro de 2024 e é uma iniciativa da Porto Ambiente que pretende implementar o conceito de economia circular, alinhando-se com as ambiciosas metas ambientais definidas para a cidade.

O projeto EcoPorto traduz-se em benefícios ambientais, económicos, educacionais e sociais para a comunidade. Baseia-se em três eixos de atuação fundamentais (Porto Ambiente, 2024):

1. Valorização dos resíduos enquanto recurso;
2. Desenvolvimento de uma comunidade sustentável;
3. Reforço da literacia ambiental.

Instalado no Ecocentro da Prelada, o EcoPorto está acessível a toda a comunidade e tem como missão promover a reparação e a reutilização de equipamentos elétricos, eletrónicos e mobiliário de madeira. Para este efeito, disponibiliza um espaço multidisciplinar que inclui uma oficina e um armazém, integrando ainda ações de formação no âmbito do projeto.

O espaço está equipado com bancadas de trabalho reaproveitadas, mobiliário reutilizado para organização e armazenamento, bem como um conjunto de ferramentas, destinadas à reparação e restauro de diversos bens. Além disso, o projeto dispõe de um armazém destinado ao acondicionamento adequado dos materiais e equipamentos que tenham sido reparados, assegurando a sua preservação até ao momento da redistribuição. A oficina de reparação está ilustrada na Figura 1 e na Figura 2A, enquanto o armazém é apresentado na Figura 1 e na Figura 2B.



Figura 1. Oficina de reparação (EcoPorto) e armazém, visão geral dos espaços que integram o projeto.



Figura 2. Interior da oficina de reparação (EcoPorto), equipado com bancadas de trabalho, mobiliário de arrumação e organização reutilizados (A) e armazém destinado ao acondicionamento de materiais para teste inicial e equipamentos já reparados (B).

A *European Recycling Platform* (ERP), em parceria com a LIPOR, integrou a Porto Ambiente na rede CREW – Centros de Recuperação de Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrónicos, promovendo a qualificação técnica e a extensão do ciclo de vida destes equipamentos. Através de oficinas de reutilização, workshops e *repair cafés*, o projeto capacita a população para a reparação de bens, incentiva o desenvolvimento de competências técnicas e impulsiona oportunidades de emprego e novos modelos de negócio circulares.

O objetivo final do EcoPorto é garantir que os bens reparados sejam doados, sem qualquer custo associado, a instituições de solidariedade social ou disponibilizados através de uma plataforma online cujo acesso é exclusivo para munícipes titulares do Cartão Porto. Desta forma, para além de garantir uma nova vida útil aos equipamentos e evitar o desperdício, o projeto assegura que os seus benefícios são direcionados para a comunidade local (Porto Ambiente, 2024).

2 ESTADO DA ARTE

2.1 RESÍDUOS DE EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS E ELETRÓNICOS (REEE)

Os resíduos de equipamentos elétricos e eletrónicos abrangem uma ampla gama de equipamentos, desde pequenos dispositivos eletrónicos pessoais, como smartphones e tablets, até grandes eletrodomésticos, como frigoríficos e máquinas de lavar. O uso generalizado de equipamentos elétricos e eletrónicos é essencial para a vida moderna, porém, destaca-se também que os modos de produção, consumo e descarte desses materiais são, atualmente, insustentáveis, resultando em desafios ambientais significativos, tanto pela presença de metais passíveis de lixiviação quanto pelo rápido aumento na quantidade desses resíduos. Os REEE são constituídos por uma diversidade de materiais, incluindo metais preciosos, tal como o ouro (Au), prata (Ag), paládio (Pd), metais pesados tóxicos, nomeadamente, chumbo (Pb), mercúrio (Hg), cádmio (Cd), plásticos, vidro e componentes eletrónicos que podem incluir substâncias tais como retardadores de chama e outras substâncias químicas perigosas (Widmer et al., 2005; Kiddee, Naidu & Wong, 2013).

O avanço tecnológico acelerado e a crescente dependência de dispositivos eletrónicos levam, ainda, a uma renovação frequente dos mesmos, o que contribui para o aumento exponencial da produção de REEE em todo o mundo (Baldé et al., 2020).

De acordo com o estudo *Global E-waste Monitor 2020*, o mundo produziu cerca de 53,6 milhões de toneladas (Mt) de REEE em 2019. Este valor, que reflete um crescimento de 21% no período de cinco anos, face aos 44,4 Mt registados em 2014, consolida os REEE como o fluxo de resíduos urbanos com o crescimento mais acelerado a nível mundial. O relatório prevê ainda que, mantendo esta trajetória, a produção global de REEE atingirá 74,7 Mt até 2030. A gestão inadequada destes resíduos é evidenciada pelo facto de apenas 17,4% terem sido formalmente reciclados em 2019, representando uma perda económica estimada em 57 mil milhões de dólares em materiais valorizáveis (Baldé et al., 2020). Este crescimento acelerado é particularmente preocupante devido ao elevado índice de descarte informal, especialmente em países em desenvolvimento, provocando graves impactes ambientais e sociais (Lundgren, 2012).

A crescente complexidade do *design* dos equipamentos tem contribuído significativamente para o aumento do fluxo de resíduos em aterros e incineradores, sobrecarregando os sistemas de gestão de resíduos e intensificando os impactes ambientais associados (Widmer et al., 2005). A presença de metais pesados e substâncias tóxicas nos resíduos eletrónicos acarreta poluição do solo, da água e do ar, impactando ecossistemas e cadeias tróficas, uma vez que esses contaminantes podem ser absorvidos por plantas e animais, entrando assim na cadeia alimentar (Kiddee, Naidu & Wong, 2013).

Adicionalmente, Lundgren (2012) revela que práticas inadequadas de gestão, associadas a países com menos recursos e práticas informáveis, como a incineração a céu aberto, levam à emissão de dioxinas e furanos, compostos altamente tóxicos e persistentes no ambiente, que se acumulam em organismos vivos e estão associados a efeitos carcinogénicos e à disrupção do sistema endócrino.

A exposição contínua a essas substâncias pode também provocar danos nos sistemas imunitário, reprodutor e neurológico, evidenciando a severidade dos riscos à saúde humana decorrentes do tratamento inadequado desses resíduos. Para além desses impactos diretos, a perda de materiais valiosos contidos nos REEE configura um impacto ambiental indireto relevante (Lundgren, 2012).

A extração primária de metais, atividade intensiva em consumo energético e uma das mais poluentes industrialmente, é responsável por emissões significativas de gases com efeito de estufa (GEE) e outros impactos ambientais associados à mineração e ao processamento de recursos naturais (Baldé et al., 2020). Por conseguinte, a recuperação eficiente desses materiais, através de uma gestão adequada dos REEE, contribui substancialmente para a mitigação das emissões globais de GEE, bem como para a conservação dos recursos naturais (Geissdoerfer et al., 2017).

2.1.1 EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS E ELETRÓNICOS COLOCADOS NO MERCADO E REEE PROCESSADOS NA UE

A Figura 3 ilustra a evolução das quantidades de EEE introduzidos no mercado europeu, bem como dos resíduos de equipamentos elétricos e eletrónicos recolhidos, tratados, valorizados, reciclados e preparados para reutilização, no período compreendido entre 2012 e 2022. Para garantir uma representação mais completa da realidade europeia, os dados em falta relativos a alguns Estados-Membros foram estimados, permitindo uma análise mais precisa da tendência geral na União Europeia (Eurostat, 2024).

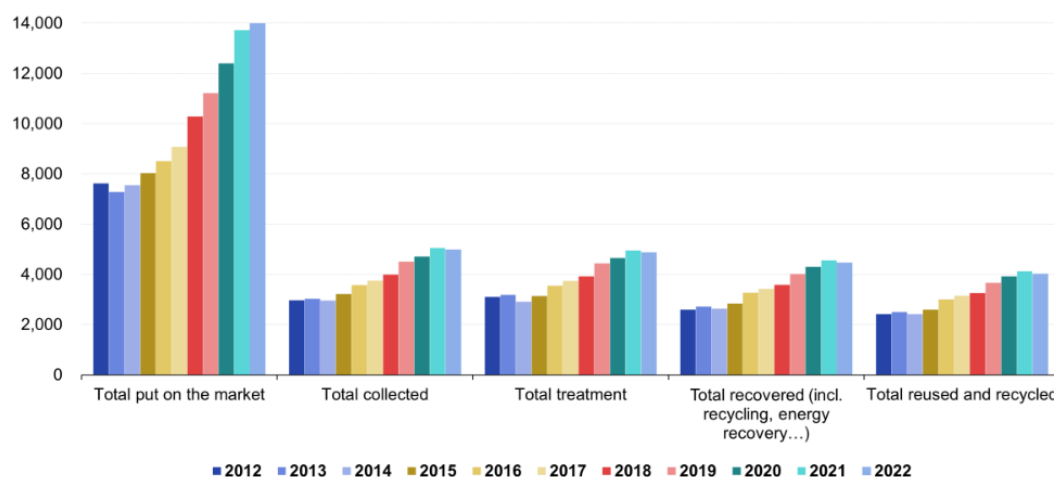


Figura 3. EEE colocados no mercado e REEE recolhidos, tratados, reciclados, recuperados ou preparados para reutilização na UE (2012–2022, mil toneladas) (Eurostat, 2024).

Importa destacar que atualmente os dados recolhidos para efeitos de monitorização das metas de recolha de REEE não contemplam informações relativas à vida útil dos produtos, isto é, o intervalo temporal entre a sua colocação no mercado e o momento em que se tornam resíduos. Esta lacuna estatística é particularmente relevante, uma vez que a meta de recolha foi revista a partir do ano de referência de 2016 (Eurostat, 2024).

Entre 2012 e 2022, observou-se um crescimento expressivo na quantidade de EEE colocados no mercado europeu, passando de 7,6 milhões de toneladas em 2012 para um valor máximo de 14,4 milhões de toneladas em 2022, o que representa um aumento acumulado de 89,3% no período em análise. O ponto mais baixo foi registado em 2013, com 7,3 milhões de toneladas (Eurostat, 2024).

Em paralelo, a quantidade de REEE recolhidos também registou um crescimento significativo, evoluindo de 3,0 milhões de toneladas em 2012 para 5,0 milhões de toneladas em 2022, refletindo um acréscimo de 67,9%. No mesmo intervalo, os resíduos tratados aumentaram de 3,1 para 4,9 milhões de toneladas (+56,8%), enquanto a quantidade de resíduos recuperados subiu de 2,6 para 4,5 milhões de toneladas (+72,1%). Por fim, os REEE reciclados e preparados para reutilização passaram de 2,4 para 4,0 milhões de toneladas, o que representa um crescimento de 66,6% (Eurostat,2024).

2.1.2 EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS E ELETRÔNICOS (EEE) COLOCADOS NO MERCADO E REEE RECOLHIDOS POR PAÍS

A revisão da Diretiva 2012/19/EU, que entrou em vigor a 13 de agosto de 2012, estabeleceu metas progressivas de recolha de resíduos, a serem aplicadas a partir dos anos de referência de 2016 e 2019, respetivamente. Desde 2016, a meta anual de recolha passou a ser determinada com base na proporção entre a quantidade de REEE recolhida no ano de referência e a média, em peso, de equipamentos elétricos e eletrônicos colocados no mercado durante os três anos precedentes. Esta abordagem pretende alinhar as metas de recolha com a dinâmica real do mercado de EEE, promovendo uma maior coerência entre o consumo e a responsabilidade ambiental (Eurostat,2024).

Inicialmente, foi fixada uma meta de recolha correspondente a 45% do valor médio de EEE introduzidos no mercado, aumentando para 65% a partir de 2019, reforçando assim os compromissos da União Europeia com os princípios da economia circular. No entanto, a própria Diretiva prevê exceções para determinados Estados-Membros. De acordo com o disposto no artigo 7.º, ponto 3, foi concedida uma isenção a 10 países, Bulgária, República Checa, Letónia, Lituânia, Hungria, Malta, Polónia, Roménia, Eslovénia e Eslováquia, permitindo-lhes adiar o cumprimento das metas obrigatórias de recolha até 14 de agosto de 2021 (Eurostat,2024).

A Figura 4 apresenta o desempenho dos países da UE em relação a estas metas, expressando os REEE recolhidos como uma fração dos EEE colocados no mercado. Especificamente, a taxa de recolha foi calculada dividindo a quantidade de REEE recolhida em 2022 pela média de EEE introduzidos entre 2019 e 2021. Esta métrica permite uma avaliação padronizada do cumprimento das metas de 45% e 65% estabelecidas pela legislação europeia (Eurostat,2024).

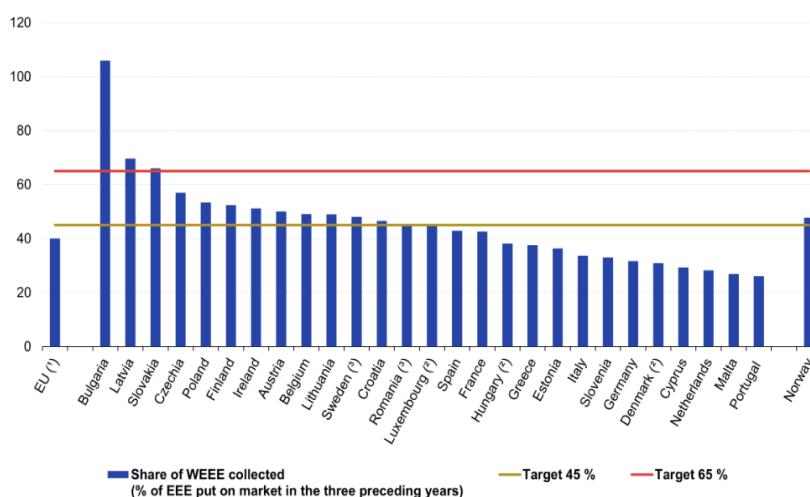


Figura 4. Percentagem total de resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos recolhidos em 2022, com base no peso médio dos equipamentos colocados no mercado nos 3 anos anteriores (Eurostat,2024).

Os dados demonstram que, em 2022, 14 Estados-Membros superaram a meta mínima de 45% de recolha de REEE. Adicionalmente, a Roménia e o Luxemburgo reportaram valores muito próximos a esta meta, com taxas de 43,0% e 42,7%, respetivamente. No mesmo ano, a Bulgária, a Letónia e a Eslováquia conseguiram atingir a meta mais exigente de 65%, evidenciando um progresso significativo no reforço da recolha seletiva e na gestão os resíduos eletrónicos.

A Figura 5 ilustra, com base em dados padronizados por habitante, a comparação entre a quantidade de REEE recolhidos em 2022, a média de EEE colocados no mercado entre 2019 e 2021, e os REEE efetivamente produzidos em 2022. Estes indicadores são expressos em quilogramas por habitante, tomando como base a média populacional da União Europeia em 2022. Nesse ano, a UE registou uma média de 11,2 kg de REEE recolhidos por habitante, enquanto o volume médio de EEE introduzidos no mercado nos 3 anos anteriores foi estimado em 27,9 kg/hab. Estas variações nas quantidades recolhidas refletem, em parte, as assimetrias entre os níveis de consumo de equipamentos eletrónicos nos diferentes Estados-Membros, mas também evidenciam disparidades na eficácia dos respetivos sistemas nacionais de recolha seletiva e gestão de resíduos.

A partir do ano de referência de 2019 foi adotada a nova metodologia europeia de categorização dos EEE, consolidando a classificação em seis categorias principais. Como resultado, os países passaram a calcular a percentagem de recolha com base no peso médio de EEE colocados no mercado nos 3 anos anteriores, ajustando retroativamente os dados relativos ao período de 2019 a 2021 em conformidade com a nova categorização. Devido a limitações na publicação dos dados ajustados, esses valores não se encontram disponíveis ao público (Eurostat,2024)

Para efeitos de cálculo, a média da quantidade de EEE colocados no mercado durante os 3 anos, 2019–2021, segundo o novo critério de classificação, foi inferida dividindo-se a quantidade de REEE efetivamente recolhida pela percentagem de recolha verificada. Esta metodologia assegura a coerência estatística no acompanhamento das metas estabelecidas, permitindo uma análise mais precisa do desempenho dos Estados-Membros no âmbito da Diretiva REEE (2012/19/UE) (Eurostat, 2024).

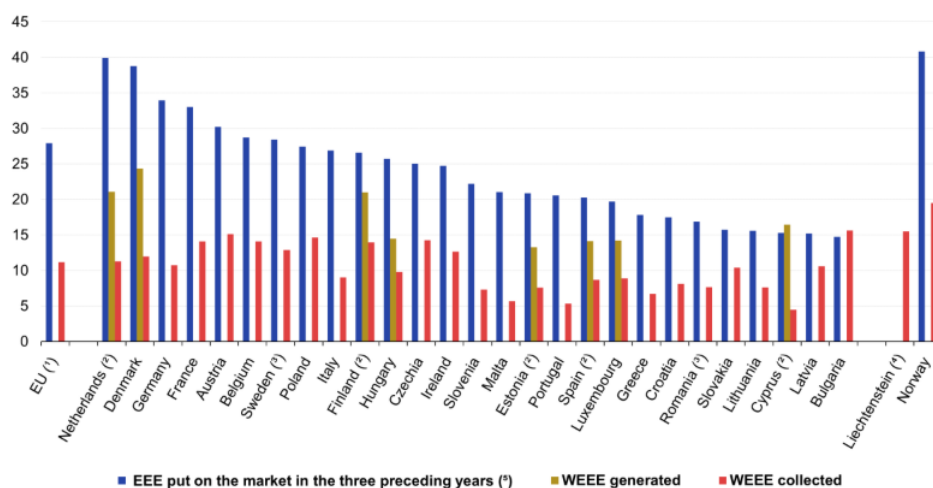


Figura 5. Quantidade de equipamentos elétricos e eletrónicos introduzidos no mercado nos 3 anos anteriores, bem como os resíduos produzidos e recolhidos em 2022, expressos em kg/hab (Eurostat, 2024).

2.2 ENQUADRAMENTO DA REPARAÇÃO E REUTILIZAÇÃO NO CONTEXTO DA ECONOMIA CIRCULAR

A transição do modelo económico linear para um paradigma circular representa uma mudança estrutural necessária face aos constrangimentos ecológicos globais. O modelo linear tradicional, caracterizado pela sequência "extração-produção-descarte" (Stahel, 2016), revela-se cada vez mais insustentável, provocando impactos adversos significativos, nomeadamente o esgotamento de recursos naturais, a acumulação de resíduos e a degradação ambiental (Geissdoerfer et al., 2017).

Em contraste, a economia circular propõe um sistema regenerativo baseado em três princípios fundamentais: a eliminação de resíduos e poluição desde a fase de conceção, a manutenção de produtos e materiais em circulação no seu máximo valor útil e a regeneração dos sistemas naturais (Ellen MacArthur Foundation, 2015; Kirchherr et al., 2017). Estes princípios materializam-se num modelo conceptual que distingue claramente os fluxos técnicos dos biológicos, ilustrado no diagrama da borboleta, amplamente reconhecido como o paradigma visual da economia circular (Ellen MacArthur Foundation, 2015).

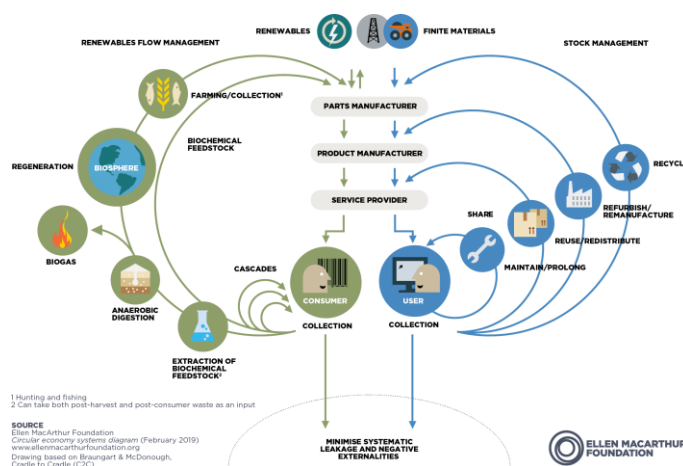


Figura 6. Diagrama da borboleta da economia circular (Ellen MacArthur Foundation, 2015).

Como ilustrado na Figura 6, o diagrama da borboleta demonstra a circulação de materiais em dois ciclos distintos: o técnico na parte direita e o biológico na parte esquerda. As práticas de reparação e reutilização, centrais a esta dissertação, situam-se no coração do ciclo técnico, representando os mecanismos mais eficazes para manter produtos e materiais em circulação e de desacelerar os ciclos de utilização de recursos (Bocken et al., 2016), enquanto a reciclagem e valorização de materiais complementam o ciclo, assegurando a recuperação de valor e a minimização de resíduos/externalidades negativas.

A reparação, enquanto prática que restaura a funcionalidade de produtos, permite prolongar significativamente o seu ciclo de vida, enquanto a reutilização mantém os produtos e componentes em circulação sem perda substancial de valor. Estas práticas não só reduzem a pressão sobre os recursos naturais, como também minimizam os impactos ambientais associados à produção de novos bens, desde a extração de matérias-primas até aos processos industriais, nomeadamente os consumos energéticos (Haas et al., 2015; Geissdoerfer et al., 2017).

A hierarquia de resíduos, institucionalizada pela Diretiva-Quadro 2008/98/CE de 19 de novembro de 2008 e alterada pela Diretiva 2018/851, consagra esta priorização ao estabelecer uma ordem decrescente de preferência, Figura 7, prevenção, preparação para reutilização, reciclagem, outras formas de valorização e, finalmente, eliminação. Esta estrutura normativa, inspirada na *Ladder van Lansink*, reflete o princípio fundamental de que é geralmente ambientalmente preferível manter produtos e materiais no seu estado original do que submetê-los a processos de transformação que impliquem perda de valor (European Commission, 2024).

A prevenção surge, assim, como a estratégia mais eficaz, uma vez que evita a geração de resíduos, reduzindo simultaneamente o consumo de recursos naturais e a pressão sobre os sistemas de gestão de resíduos. Segue-se a preparação para reutilização, que prolonga a vida útil dos produtos, promovendo a economia circular e diminuindo a necessidade de novos recursos.

A reciclagem, por sua vez, transforma materiais já utilizados em novos produtos, minimizando a extração de matérias-primas e os impactos ambientais associados.

Outras formas de valorização, como a valorização energética, permitem recuperar algum valor dos resíduos, embora impliquem transformação e, muitas vezes, perda de matéria-prima. Por último, a eliminação, através de aterros ou incineração sem recuperação de energia, representa a solução menos desejável, devendo ser utilizada apenas quando não existam alternativas viáveis (European Commission, 2018).



Figura 7. Representação da hierarquia de resíduos da União Europeia.

A análise de Bocken et al. (2016) oferece um enquadramento conceptual valioso ao categorizar as estratégias de economia circular em três grupos: desaceleração, fecho e estreitamento dos ciclos de recursos. A reparação insere-se claramente na categoria de desaceleração ("slowing resource loops"), pois permite prolongar a fase de utilização dos produtos, retardando a sua conversão em resíduo e reduzindo a necessidade de extração de novas matérias-primas (Bocken et al., 2016).

A transição para modelos mais circulares pode ser impulsionada através da inovação no *ecodesign*, com o desenvolvimento de produtos que apresentem maior durabilidade e facilidade de reparação (Mugge et al., 2017). Exige igualmente a reestruturação das cadeias de valor, através da criação de redes de reparação acessíveis e economicamente viáveis, bem como o envolvimento dos retalhistas, que devem integrar critérios de reparabilidade nos processos de seleção de fornecedores e assegurar uma comunicação transparente aos consumidores (Bocken et al., 2016).

Neste contexto, a etapa do fim de vida revela-se um ponto chave no ciclo de vida dos equipamentos, pois é nesta fase que se definem as possibilidades de recuperação, reutilização ou reciclagem dos materiais, mitigando os impactes ambientais associados.

A monitorização da transição para modelos económicos mais circulares requer a criação e utilização de indicadores de circularidade rigorosos e fiáveis. Entre estes, destaca-se a Taxa de Utilização Circular de Materiais, que quantifica a proporção de materiais reciclados ou reutilizados em relação ao consumo total (consumo doméstico/interno de materiais). Os dados atuais para a União Europeia, que apontam para valores entre 11% e 12% (Eurostat, 2024), evidenciam a persistência do modelo linear.

Um exemplo representativo da aplicação prática destes princípios é o trabalho desenvolvido pela *Asociación Española de Recuperadores de Economía Social y Solidaria* (AERESS), uma rede que reúne 37 entidades da Economia Social e Solidária (ESS) em Espanha, com atuação direcionada para a inserção social e para o mercado de trabalho de pessoas em situação de vulnerabilidade, bem como para a gestão sustentável de resíduos (AERESS, 2023a).

O processo de gestão dos REEE desenvolvido pelas entidades da AERESS numa lógica circular e coordenada tem como objetivo maximizar a reutilização e reduzir o impacto ambiental. O ciclo de vida inicia-se nos processos industriais, passando pelos produtores e distribuidores, até chegar aos utilizadores domésticos, onde os equipamentos em fim de vida são recolhidos por entidades da rede AERESS, através de ecopontos, canais de distribuição, redes de produtores, gestores autorizados e Sistemas Coletivos de Responsabilidade Alargada do Produtor (SCRAP), como está demonstrado na Figura 8.



Figura 8. Gestão dos REEE efetuada pela AERESS (Adaptado de AERESS, 2023b).

Após a recolha na etapa 1, os equipamentos são encaminhados para os Centros de Preparação para a Reutilização, CPR, na etapa 2. Nestes centros, são realizadas operações como verificação, separação, recuperação, limpeza e preparação dos aparelhos com vista à sua revenda, prolongando assim o seu ciclo de vida útil.

Na fase seguinte, etapa 3, os equipamentos ou os seus componentes são alvo de seleção e classificação, sendo armazenados temporariamente para posterior encaminhamento. Dependendo do seu estado e viabilidade técnica, os resíduos seguem para tratamento, etapa 4, que pode consistir na preparação para reutilização ou para reciclagem.

Os aparelhos que são recuperados e considerados aptos voltam a entrar no mercado através da venda em lojas de segunda mão, etapa 5, promovendo o consumo responsável e sustentável.

Finalmente, é garantido o serviço de pós-venda, assegurando a manutenção e suporte técnico dos equipamentos reutilizados, etapa 6, contribuindo para a confiança do consumidor e o encerramento eficiente do ciclo.

O relatório anual da AERESS (2023) evidencia o duplo impacto da reutilização: ambientalmente, processou 49.865 toneladas de materiais, reutilizando diretamente 8.215 toneladas e evitando a emissão de 52.709 toneladas de CO₂, o equivalente a retirar 9,2 milhões de carros das estradas durante um ano. Socialmente, gerou 1.800 postos de trabalho, dos quais 845 foram destinados a grupos em situação de vulnerabilidade (AERESS, 2023a).

Para quantificar estes benefícios, a AERESS desenvolveu a Calculadora Reutiliza y Evita CO₂, ferramenta que estima a redução de emissões de CO₂ associada à prevenção da produção de novos produtos, a poupança de matérias-primas pela reintrodução de bens reparados no mercado e o impacto social em termos de oportunidades de emprego. Por exemplo, estima-se que a reparação de 100 pequenos eletrodomésticos evite a emissão de 97 kg de CO₂, aproximadamente equivalente à capacidade de sumidouro diária de 4.912 árvores (AERESS, 2023b). Complementarmente, a Calculadora Social traduz estes resultados no equivalente a 1,89 meses de salário de uma trabalhadora, correspondendo a um retorno económico de 2.190,75 euros (AERESS, 2023c).

A rede de mais de 110 lojas da AERESS desempenha ainda um papel social duplo: comercializa produtos reutilizados a preços acessíveis, promovendo a inclusão socioeconómica, e reinveste os benefícios no território, fomentando o emprego local e combatendo a deslocalização industrial associada a modelos lineares de produção (European Commission, 2012).

Em 2023, a gestão dos REEE efetuada pela AERESS resultou na recolha e processamento de 6.528,79 toneladas. A distribuição por destinos finais revela que a reciclagem predominou, correspondendo a 72,2%, seguida da reutilização com 4,4%, eliminação com 22,6% e outras categorias com 0,8%.

Apesar da percentagem de reutilização parecer modesta, representa um contributo significativo para prolongar o ciclo de vida dos equipamentos e reduzir o volume de materiais encaminhados para eliminação, demonstrando o potencial para aumentar a taxa de preparação para reutilização no setor.

Este caso evidencia a aplicabilidade prática dos princípios da economia circular e a convergência com o modelo implementado pelo projeto EcoPorto, apresentado na secção 4.1.1 reforçando que a combinação de objetivos ambientais e sociais potencia os impactos positivos da reparação e reutilização de equipamentos elétricos e eletrónicos.

2.3 LEGISLAÇÃO E POLÍTICAS EUROPEIAS PARA OS EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS E ELETRÓNICOS (EEE)

O enquadramento classificativo dos Equipamentos Elétricos e Eletrónicos foi profundamente alterado com a entrada em vigor da Diretiva 2012/19/UE. Até 14 de agosto de 2018, vigorava um sistema composto por dez categorias distintas, que incluíam, por exemplo, grandes e pequenos eletrodomésticos, equipamentos de informática e telecomunicações, equipamentos de consumo, iluminação, ferramentas elétricas e eletrónicas, brinquedos, equipamentos médicos, instrumentos de monitorização e distribuidores automáticos.

A partir dessa data, foi implementado um regime simplificado, previsto no Anexo III da Diretiva, que consolidou as dez categorias anteriores em apenas seis, tal como apresentado na Tabela 1.

Contudo, uma avaliação recente da Diretiva concluiu que, apesar de este sistema se manter globalmente relevante, é evidente a necessidade de criar uma categoria autónoma para painéis fotovoltaicos, devido ao seu ciclo de vida específico e às práticas diferenciadas de recolha e reciclagem que exigem (European Commission, 2025).

Tabela 1. Classificação dos EEE por categorias. Adaptado do Anexo III da Diretiva 2012/19/UE do Parlamento Europeu e do Conselho, de 4 de julho de 2012, relativa aos REEE.

Categoria	Equipamentos
1	Equipamentos de regulação da temperatura
2	Ecrãs, monitores e equipamentos com ecrãs de superfície superior a 100 cm ²
3	Lâmpadas
4	Equipamentos de grandes dimensões (com qualquer dimensão externa superior a 50 cm), incluindo, mas não limitados a: Eletrodomésticos; equipamentos informáticos e de telecomunicações; equipamentos de consumo; aparelhos de iluminação; equipamento para reproduzir sons ou imagens, equipamento musical; ferramentas elétricas e eletrónicas; brinquedos e equipamento de desporto e lazer; dispositivos médicos; instrumentos de monitorização e controlo; distribuidores automáticos; equipamento para geração de corrente elétrica. Não se incluem nesta categoria os equipamentos abrangidos pelas categorias 1 a 3.
5	Equipamentos de pequenas dimensões (com nenhuma dimensão externa superior a 50 cm), incluindo, mas não limitados a: Eletrodomésticos; equipamentos de consumo; aparelhos de iluminação; equipamento para reproduzir sons ou imagens, equipamento musical; ferramentas elétricas e eletrónicas; brinquedos e equipamento de desporto e lazer; dispositivos médicos; instrumentos de monitorização e controlo; distribuidores automáticos; equipamento para geração de corrente elétrica. Não se incluem nesta categoria os equipamentos abrangidos pelas categorias 1 a 3 e 6.
6	Equipamentos informáticos e de telecomunicações de pequenas dimensões (com nenhuma dimensão externa superior a 50 cm)

A Diretiva supramencionada estabeleceu as bases para a gestão sustentável de REEE, introduzindo o princípio da Responsabilidade Alargada do Produtor (RAP), que atribui aos fabricantes a obrigação de assegurar o tratamento ambientalmente adequado dos equipamentos no fim de vida, incentivando o design ecológico e a redução do impacto ambiental (European Commission, 2012). Não obstante, a avaliação realizada pela Comissão Europeia constatou que a Diretiva tem tido uma eficácia limitada em garantir que todos os produtores, em particular os vendedores online, cumpram as suas obrigações no âmbito da RAP (European Commission, 2025).

Além disso, impõe metas quantitativas para a recolha e reciclagem/valorização, que devem ser cumpridas pelos Estados-Membros. Estas metas são diferenciadas em função das categorias de equipamentos, de modo a refletir as especificidades técnicas e o potencial de valorização de cada tipologia de REEE, tal como sintetizado na Tabela 2.

A avaliação da Diretiva revela, porém, que os seus dois principais instrumentos, as metas de recolha e de valorização, se revelaram insuficientes tanto para abordar integralmente as preocupações ambientais ligadas à gestão de REEE e ao design dos EEE, como para apoiar significativamente a implementação de um modelo de economia circular e a criação de um mercado de matérias-primas secundárias na UE (European Commission, 2025).

Apesar de a recolha de REEE ter aumentado cerca de 65% entre 2012 e 2021, 24 Estados-Membros não cumpriram as metas de recolha de 85% ou 65%, o que levou a Comissão a abrir processos de infração em julho de 2024. Adicionalmente, cerca de 46% dos REEE produzidos na UE não são recolhidos separadamente, sendo ilegalmente exportados, descartados como sucata metálica ou tendo um destino desconhecido (European Commission, 2025).

No que concerne às taxas de preparação para reutilização e reciclagem, reportadas pelos Estados-Membros, estas mantiveram-se consistentemente elevadas, entre 80% e 84%. Contudo, o contributo da preparação para a reutilização para o cumprimento destas metas é residual, situando-se em cerca de apenas 2%. A avaliação conclui que o aumento da reciclagem e valorização é sobretudo o resultado do aumento da recolha e não de um impulso específico da Diretiva. Em média, apenas 40% dos REEE são efetivamente reciclados na UE, e as atuais metas de reciclagem, baseadas no peso total e não em materiais específicos, não incentivam a recuperação de matérias-primas críticas (MPC) (European Commission, 2025).

Tabela 2. Objetivos mínimos de valorização, preparação para reutilização e/ou reciclagem de REEE (a partir de 15 de agosto de 2018), Diretiva 2012/19/EU, anexo V.

Categoria de REE	Meta de Valorização	Meta de Preparação para Reutilização e/ou Reciclagem
Categoria 1: Equipamentos de regulação de temperatura	85%	80%
Categoria 2: Ecrãs, monitores e equipamentos com ecrãs de superfície superior a 100 cm²	80%	70%
Categoria 3: Lâmpadas	-	80% (Reciclagem)
Categoria 4: Equipamentos de grandes dimensões com qualquer dimensão externa a 50 cm	85%	80%
Categoria 5: Equipamentos de pequenas dimensões com nenhuma dimensão externa superior a 50 cm	75%	55%
Categoria 6: Pequenos equipamentos de informática e telecomunicações de pequenas dimensões com nenhuma dimensão externa superior a 50 cm	75%	55%

As práticas de gestão incluem a aplicação de processos tecnológicos capazes de permitir a separação e valorização eficiente dos materiais, como a separação mecânica, a hidrometalurgia e a pirometalurgia (Robinson, 2009).

A separação mecânica consiste na passagem dos resíduos eletrónicos por etapas de desmontagem e separação física, permitindo isolar diferentes tipos de materiais antes de os submeter a processos químicos ou térmicos subsequentes. Por outro lado, a hidrometalurgia utiliza soluções aquosas para dissolver e recuperar os metais valiosos presentes nos resíduos eletrónicos, enquanto a pirometalurgia recorre a altas temperaturas para fundir e separar os metais (Zhang, L., & Xu, Z., 2016).

A avaliação salienta que, apesar dos progressos no tratamento ambientalmente correto, apenas cerca de 23% das instalações de reciclagem implementam normas de alta qualidade para o tratamento de REEE, existindo um potencial significativo para melhorar a qualidade da reciclagem, principalmente para recuperar quantidades consideráveis de matérias-primas secundárias valiosas, incluindo MPC (European Commission, 2025).

Após a extração dos materiais valorizáveis, as frações residuais perigosas resultantes do tratamento, para as quais não é tecnológica ou economicamente viável a recuperação, devem ser encaminhadas para destinos finais adequados. Estas frações, que podem incluir concentrados de contaminantes, pós de filtros ou plásticos com substâncias perigosas, requerem eliminação em instalações licenciadas para resíduos perigosos, garantindo-se assim a neutralização ou confinamento seguro dos poluentes remanescentes, em estrita conformidade com a hierarquia de gestão de resíduos (European Commission, 2025).

No entanto, a crescente pressão social pelo Direito à Reparação evidenciou a necessidade de políticas mais robustas, capazes de combater a obsolescência programada e promover a reparação como estratégia prioritária. Este movimento foi sustentado através de instrumentos como o Pacto Ecológico Europeu, o Plano de Ação para a Economia Circular e a Nova Agenda do Consumidor, que reconhecem a reparação como um pilar da transição sustentável (European Commission, 2020).

A avaliação da Diretiva REEE confirma esta lacuna, concluindo que a mesma teve um sucesso limitado nos esforços de prevenção de resíduos e que, embora a reutilização e reparação tenham aumentado no período em análise, as quantidades são muito reduzidas face aos EEE colocados no mercado. Adicionalmente, como a Diretiva não possui disposições específicas sobre o *design* dos EEE, oferece poucos incentivos para uma conceção de produtos mais sustentável (European Commission, 2025).

A Diretiva (UE) 2024/1799, aprovada em junho de 2024, surge como resposta à necessidade de promover a reparação de bens, estabelecendo regras comuns nesse domínio no espaço da União Europeia. Entre as suas principais inovações destaca-se a imposição de uma obrigação de reparação aos fabricantes de determinadas categorias de bens, como eletrodomésticos e telemóveis, mesmo para além do período de garantia legal, desde que técnica e economicamente viável, bem como a obrigação de disponibilizar peças sobresselentes a preços razoáveis que não dissuadam a reparação.

Adicionalmente, a diretiva introduz exigências de transparência, obrigando os fabricantes a divulgar online informações sobre os preços indicativos de reparação, e proíbe práticas que impeçam a reparação por reparadores independentes ou que restrinjam o uso de peças de reposição compatíveis ou impressas em 3D. Prevê ainda a extensão do prazo de garantia em mais 12 meses se o consumidor optar pela reparação em vez da substituição durante o período de garantia legal, bem como a criação de um Formulário Europeu de Informação sobre reparações de uso voluntário e de uma plataforma online europeia para facilitar o contacto entre consumidores e reparadores.

Em Portugal, a gestão de resíduos alinha-se com as diretrizes europeias através do PERSU 2030 e dos planos de ação PAPERSU, que priorizam a prevenção de resíduos e a valorização material. Contudo, o país parte de uma posição desafiadora, com uma taxa de preparação para reutilização e/ou reciclagem de 32% em 2021, aquém das metas ambiciosas estabelecidas de atingir 60% até 2030 e 65% até 2035.

Esta lacuna revela a urgência de estratégias complementares, como a promoção da economia circular e a reparação de equipamentos, áreas onde a avaliação da Diretiva REEE aponta para a necessidade de novas abordagens que proporcionem incentivos para melhor refletir a hierarquia dos resíduos. O PERSU 2030 prevê um conjunto de incentivos financeiros, como a aplicação da Taxa de Gestão de Resíduos (TGR) para reinvestimento em projetos que promovam a recolha seletiva, e um pacote financeiro avultado no âmbito do Portugal 2030. Estes recursos destinam-se a financiar a expansão da rede de ecopontos, a implementação de sistemas inteligentes de recolha seletiva e o desenvolvimento de centrais de triagem de elevada sofisticação tecnológica, medidas essenciais para colmatar o défice de recolha identificado pela avaliação da UE.

2.4 FATORES QUE INFLUENCIAM A ESCOLHA ENTRE REPARAR OU SUBSTITUIR UM OBJETO

A decisão entre reparar ou substituir um objeto, especialmente no caso de EEE é influenciada por uma complexa interação de fatores económicos, técnicos, psicológicos e ambientais. Esta escolha não se resume a uma avaliação estritamente funcional, mas reflete dinâmicas mais amplas, como estratégias de produção, padrões de consumo e condicionantes socioculturais. Um dos conceitos centrais para compreender esta problemática é o da obsolescência, que ocorre quando um produto deixa de ser desejado pelo utilizador, independentemente do seu estado de funcionamento.

A Agência Europeia do Ambiente distingue entre obsolescência absoluta, quando o produto se torna inutilizável devido a falhas técnicas, incompatibilidades tecnológicas ou falta de peças e obsolescência relativa, quando o consumidor o considera desatualizado por razões estéticas, psicológicas ou sociais. Em muitos casos, esta obsolescência é intencionalmente induzida pelas empresas através da obsolescência programada, uma estratégia que limita deliberadamente a vida útil dos produtos para promover a substituição frequente.

A possibilidade de reparar um objeto depende da disponibilidade de peças de substituição, ferramentas especializadas e conhecimento técnico. Alguns produtos, como determinados aparelhos de autocuidado, nomeadamente barbeadores elétricos, são concebidos de forma a dificultar a desmontagem, o que faz com que sejam mais frequentemente substituídos do que reparados (Maitre-Ekern et al., 2021).

Por outro lado, equipamentos com *designs* modulares ou componentes facilmente substituíveis incentivam a extensão da sua vida útil, uma vez que facilitam a reparação e a substituição de partes avariadas. A Diretiva (UE) 2024/1799, promove ativamente este tipo de design ao obrigar os fabricantes a disponibilizarem peças de reposição. Contudo, a ausência de redes de reparação devidamente estruturadas em muitas regiões agrava o problema, desencorajando os consumidores de optar por serviços de reparação.

Do ponto de vista económico, o principal fator que condiciona a escolha entre reparar e substituir é o custo. Se o valor da reparação se aproxima ou excede o preço de um produto novo, os consumidores tendem a optar pela substituição, sobretudo em mercados onde os EEE são relativamente baratos (Zhang et al., 2024). No entanto, quando existem mecanismos que reduzem o custo da reparação, como oficinas comunitárias ou subsídios, a preferência por esta opção aumenta significativamente.

Além das questões económicas e técnicas, fatores psicológicos e sociais influenciam significativamente a decisão. A conveniência e o imediatismo levam muitos consumidores a preferir a substituição rápida, evitando interrupções no seu quotidiano. Paralelamente, persiste um certo estigma em relação a produtos reparados, muitas vezes vistos como "inferiores" ou "obsoletos", o que desencoraja a reparação mesmo quando esta é a opção mais racional (Guiltinan, 2009).

Finalmente, o enquadramento político e legal atua como um fator transversal e determinante, podendo mitigar ou agravar as barreiras anteriores. A ausência de políticas que incentivem a reparação, como a redução do IVA (Imposto sobre Valor Acrescentado) sobre serviços de reparação ou a obrigatoriedade de disponibilizar peças de substituição, limita a adoção desta prática. Para que a reparação se torne uma opção viável em larga escala, é essencial não apenas criar incentivos económicos, mas também promover *designs* mais fáceis de reparar e educar os consumidores sobre as vantagens de prolongar a vida útil dos produtos (Ellen MacArthur Foundation, 2015).

2.5 TECNOLOGIAS E MÉTODOS DE REPARAÇÃO

A reparação de EEE baseia-se em metodologias consolidadas que envolvem diagnóstico preciso, desmontagem estruturada, substituição de componentes avariados e restauro funcional completo, sendo essencial para o sucesso destas operações o acesso a peças suplentes e a formação técnica especializada, uma vez que uma percentagem significativa de avarias está diretamente associada à falha de componentes padronizados (European Environment Agency, 2022).

Contudo, a inovação tecnológica tem vindo a redefinir os processos de reparação, destacando-se o uso de sensores para diagnóstico avançado, que, quando integrados nos equipamentos, permitem a deteção precoce de falhas e antecipam intervenções, as plataformas digitais colaborativas, que facilitam a partilha de conhecimento entre técnicos e otimizam soluções para avarias complexas, e a realidade aumentada, que orienta utilizadores e técnicos em procedimentos de reparação passo a passo, contribuindo para a redução de erros (Palmarini et al., 2018). A rastreabilidade de componentes é fundamental para assegurar a disponibilidade de peças originais e minimizar o desperdício. A tecnologia *blockchain*, ao garantir registos imutáveis e descentralizados ao longo do ciclo de vida dos produtos, tem sido adotada por empresas como a Bosch para otimizar a gestão de peças de substituição e aumentar a eficiência operacional (Kouhizadeh et al., 2021). Neste contexto, plataformas como a *Circularise* utilizam *blockchain* para certificar materiais reciclados, aumentando a confiança no mercado de produtos reconicionados (Circularise, 2022).

Além disso, os contratos inteligentes, *smart contracts*, automatizam processos como a encomenda de componentes ou a validação de garantias, eliminando intermediários e reduzindo custos (Biswas et al., 2024)

A implementação do Índice de Reparabilidade representa uma transformação estrutural na avaliação de produtos, estabelecendo um sistema padronizado que integra múltiplas dimensões técnico-funcionais, como a facilidade de desmontagem e a disponibilidade de peças, logísticas, incluindo o acesso a documentação técnica, e económicas, considerando o custo relativo da reparação.

Este índice atua como um mecanismo regulatório de duplo impacto: enquanto ferramenta de transparência, fornece aos consumidores dados objetivos sobre a longevidade e reparabilidade dos produtos, permitindo escolhas informadas; simultaneamente, funciona como um instrumento de incentivo de mercado, transformando a alta pontuação em vantagem competitiva para os fabricantes, o que tem impulsionado a integração de critérios de *ecodesign* em todo o ciclo de desenvolvimento de produtos.

2.6 BARREIRAS, DESAFIOS E SOLUÇÕES À REPARAÇÃO DE OBJETOS FORA DE USO

A reparação de produtos constitui uma estratégia fundamental no âmbito da economia circular, destacando-se como mecanismo prioritário para mitigar impactes ambientais, promover equidade social e gerar valor económico.

Um dos principais entraves à reparação como já referido está relacionado com o *design* não modular dos produtos, onde componentes fixos e interdependentes impossibilitam a substituição, reparação ou atualização de peças individuais. Esta falta de modularidade, frequentemente intencional e associada à obsolescência programada, como supramencionado, limita a durabilidade dos equipamentos e dificulta intervenções de reparação (Bocken et al., 2016; Widmer et al., 2005). Acrescem a este problema a escassez de peças de substituição, a ausência de sistemas eficazes de logística reversa e políticas fiscais pouco favoráveis, sendo estes fatores responsáveis por intensificar a dependência de modelos lineares de descarte e dificultar a adoção generalizada da reparação (Kirchherr et al., 2017; Widmer et al., 2005).

A reparação preserva, em média, 85% do valor original do produto (Bakker et al., 2014) e reduz a pegada ambiental em mais de 80% em comparação com a substituição por artigos novos (Bovea et al., 2020). Paralelamente, o setor de eletrónicos enfrenta um desafio crítico devido à redução progressiva da vida útil dos dispositivos. Por exemplo, a vida média dos smartphones decresceu de 4,7 anos em 2014 para menos de 2 anos em 2023 (Circle Economy, 2023), impulsionando um aumento de 82% na produção de resíduos eletrónicos entre 2010 e 2022 (Global E-waste Monitor, 2024).

Em termos económicos, a reparação ativa cadeias locais de valor, estimulando a criação de emprego em pequenas e médias empresas e reduzindo os custos para os consumidores. A reparação é uma atividade intensiva em mão-de-obra que gera importantes oportunidades de emprego para grupos vulneráveis, como jovens e seniores, contribuindo assim para o desenvolvimento das economias locais e regionais (RREUSE, 2022; European Environmental Bureau, 2019). A oferta e comercialização de produtos reconicionados promovem também a inclusão digital, ao disponibilizarem tecnologia acessível a segmentos da população menos favorecidos (European Commission, 2020).

Contudo, a ausência de incentivos fiscais e políticas públicas estruturadas para apoiar a reparação constitui um obstáculo relevante à sua adoção em larga escala (Stahel, 2016). Soma-se a isso a fragmentação das políticas locais e a insuficiente fiscalização das metas de sustentabilidade, fatores que comprometem a eficácia das iniciativas em curso e dificultam a criação de um ambiente propício para a inovação circular em que a reparação seja economicamente viável e integrada sistemicamente (Geissdoerfer et al., 2017).

Para além dos constrangimentos ambientais, técnicos e económicos, persistem barreiras culturais profundamente enraizadas. A normalização do descarte prematuro e a associação de produtos reparados a menor qualidade limitam a sua aceitação (Hazen et al., 2017).

Esta desvalorização social reflete-se nos padrões de consumo, onde a conveniência e a novidade são frequentemente priorizadas em detrimento da durabilidade (Mugge et al., 2017).

As iniciativas inovadoras, como os Repair Cafés, combinam benefícios ambientais com a promoção da coesão social, estimulando uma cultura de autossuficiência e de consumo responsável (Wieser & Tröger, 2022). Paralelamente, intervenções comportamentais, nomeadamente campanhas de sensibilização que valorizam a qualidade e a sustentabilidade dos produtos reparados, desempenham um papel fundamental na mudança de perceções e na valorização da reparação como prática sustentável e socialmente relevante (Mugge et al., 2017).

2.7 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DA REPARAÇÃO DE EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS E ELETRÓNICOS

A Avaliação do Ciclo de Vida constitui uma metodologia amplamente reconhecida para quantificar os impactos ambientais associados a um produto, processo ou serviço ao longo das diferentes fases do seu ciclo de vida. No contexto da reparação de EEE, a ACV oferece uma ferramenta elaborada para avaliar de forma comparativa os benefícios ambientais da reparação face à substituição, integrando uma perspetiva sistémica e baseada em dados científicos (ISO, 2006a; ISO, 2006b).

De acordo com as normas ISO 14040:2006 – Princípios e Enquadramento e ISO 14044:2006 – Requisitos e Linhas de Orientação, a ACV é estruturada em quatro fases fundamentais:

1. Definição dos objetivos e do âmbito;
2. Análise do inventário do ciclo de vida (ICV);
3. Avaliação dos impactos do ciclo de vida (AICV);
4. Interpretação dos resultados (ISO 14040:2006; ISO 14044:2006).

A economia circular afirma-se atualmente como um quadro estratégico essencial para promover padrões de produção e consumo mais sustentáveis, centrados na manutenção do valor dos recursos ao longo do tempo, na minimização da extração de matérias-primas virgens e na regeneração dos sistemas naturais. Contudo, a ausência de uma metodologia padronizada para avaliar a eficácia real das estratégias de circularidade levanta riscos de se adotarem soluções que, embora circulares em aparência, não se traduzam necessariamente em benefícios ambientais ou sociais.

Neste contexto, a Avaliação do Ciclo de Vida constitui uma abordagem metodológica particularmente relevante, ao permitir quantificar de forma sistemática e comparável os impactos ambientais associados a diferentes cenários, garantindo uma análise abrangente que contempla todas as fases do ciclo de vida e evitando fenómenos de transferência de impactos entre etapas ou categorias (Peña et al., 2021).

A integração da ACV na avaliação de estratégias de economia circular acrescenta robustez científica ao processo decisório, ao possibilitar a identificação de compromissos e sinergias entre alternativas como a reparação, a reutilização, a reciclagem ou a substituição tecnológica. Para além de assegurar maior consistência metodológica, a ACV fornece uma base objetiva para comparar opções de circularidade, quantificando os reais benefícios e eventuais limitações em termos de sustentabilidade ambiental, económica e social. Assim, a ACV consolida-se não apenas como uma ferramenta de suporte, mas como um elemento estruturante para a implementação e monitorização da economia circular, garantindo que as promessas de circularidade se traduzam em ganhos efetivos para a sociedade e para o ambiente (Peña et al., 2021).

Gallego-Schmid et al. (2016) seguiu as quatro fases clássicas da Avaliação do Ciclo de Vida, com os objetivos principais de avaliar os impactos ambientais ao longo do ciclo de vida dos aspiradores e identificar oportunidades de otimização, e, simultaneamente, analisar os efeitos, a nível da União Europeia, da implementação dos regulamentos de *ecodesign*. O âmbito do estudo foi definido de forma abrangente, incluindo todas as etapas relevantes, desde a extração e processamento de matérias-primas (como metais, plásticos e cartão), passando pela produção (montagem, moldagem e impressão), utilização (consumo de eletricidade e substituição de filtros), fim de vida (aterro, reciclagem e incineração com recuperação de energia) e os transportes associados entre estas fases. A unidade funcional escolhida foi a utilização do aspirador durante 50 horas por ano ao longo de oito anos, para limpar uma habitação europeia típica de 87 m².

Na fase de Análise do Inventário do Ciclo de Vida (ICV), foram compilados todos os fluxos elementares de entradas e saídas associados ao sistema. Os autores realizaram um inventário detalhado, baseado na desmontagem e pesagem de um aspirador sem saco de 1400 W, representativo do mercado europeu. Quanto às matérias-primas e produção, foram quantificadas as massas específicas de cada material, como 1,112 kg de ABS, 0,408 kg de aço inoxidável e 0,177 kg de cobre, assim como os consumos energéticos dos processos de moldagem por injeção, estampagem de metal e montagem, utilizando dados primários de um fabricante e complementando lacunas com bases de dados como a *Ecoinvent*. A fase de utilização considerou o consumo de eletricidade de 560 kWh ao longo da vida útil, com base no *mix* médio de eletricidade da UE28 de 2013, incluindo ainda a substituição de três filtros de ar.

Para o fim de vida, aplicaram-se taxas específicas de gestão de resíduos, com 95% de reciclagem para metais, 26% de reciclagem, 36% de incineração e 38% de aterro para componentes plásticos, e 84% de reciclagem para embalagens. Os transportes incluíram a movimentação de matérias-primas, o transporte do produto final da fábrica na China para a Europa via marítima, a distribuição para retalhistas e o encaminhamento dos resíduos para as respetivas instalações de tratamento (Gallego-Schmid et al., 2016).

Na fase de AICV, os fluxos de inventário foram convertidos em potenciais impactes ambientais utilizando o método CML 2001, avaliando 12 categorias de impacte, como o Potencial de Aquecimento Global e o Potencial de Acidificação. Os resultados mostraram que a fase de utilização é a predominante, contribuindo com mais de 78% para a maioria dos impactes devido ao consumo de eletricidade com forte presença de combustíveis fósseis na sua obtenção.

No entanto, as matérias-primas, em particular o cobre e o aço inoxidável, constituem pontos críticos para a depleção de elementos abióticos e para a toxicidade humana. A produção apresenta relevância apenas na depleção da camada de ozono, devido às emissões de compostos orgânicos halogenados dos solventes, enquanto a fase de fim de vida tem um efeito líquido benéfico na maioria das categorias, graças aos créditos obtidos com a reciclagem de metais. Estes resultados evidenciam a importância de considerar todo o ciclo de vida, pois focar-se apenas na eficiência energética durante a utilização pode negligenciar impactes significativos noutras fases (Gallego-Schmid et al., 2016).

Gallego-Schmid et al. (2016) avaliou, também, o efeito de possíveis cenários futuros e de algumas políticas. Os autores projetaram que a implementação do regulamento de *ecodesign*, que limita a potência dos aspiradores, seria a medida mais impactante, reduzindo a maioria dos impactes entre 37% e 44% até 2020, em comparação com o cenário de 2013.

Sem este regulamento, os impactes em 2020 seriam 82% para o Potencial de Aquecimento Global a 109% para o Potencial de Formação de Oxidantes Fotoquímicos superiores aos impactes esperados com a sua implementação. Em contraste, a aplicação da Diretiva dos Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrónicos (DREEE), ao promover a reciclagem, teria um efeito positivo, mas modesto, com uma redução de impactes inferior a 1% em 2020 face ao cenário de 2013.

Importa contextualizar este valor aparentemente baixo. Num cenário extremo de fim de vida, com deposição total em aterro (0% de reciclagem ou recuperação de energia) em vez do cumprimento da diretiva, os impactes totais em 2020 aumentariam entre 2% e 21%. Este aumento seria em relação ao cenário futuro (2020) onde a diretiva é implementada, e não em relação a 2013. Os impactes que mais aumentariam seriam o Potencial de Ecotoxicidade Terrestre (+21%), o Potencial de Depleção de Elementos Abióticos (+17%) e o Potencial de Toxicidade Humana (+15%).

Adicionalmente, a descarbonização do *mix* energético europeu poderia contribuir para reduções adicionais de 6% a 20% na maioria dos impactes em 2020. Contudo, esta transição poderia aumentar a depleção de elementos abióticos em +34%, devido ao uso de metais raros em painéis fotovoltaicos. As análises de sensibilidade mostraram que o país de utilização, devido ao seu *mix* energético, influencia significativamente os resultados, e que uma redução da vida útil de oito para cinco anos aumentaria os impactes entre 6% (Procura de Energia Primária) e 19% (Potencial de Toxicidade Humana), indicando que, à medida que a fase de utilização se torna menos impactante, as fases de materiais, produção e fim de vida ganham relevância, tornando-se alvos críticos para melhorias futuras (Gallego-Schmid et al., 2016).

Os resultados da ACV demonstraram que os impactes ambientais da preparação para reutilização de EEE variam significativamente consoante a categoria de impacto e o tipo de produto. Para os grandes eletrodomésticos (máquina de lavar, frigorífico, forno, arcas congeladoras), cujo consumo energético durante a fase de utilização é dominante, a reutilização de equipamentos com classes de eficiência energética inferiores (D e C) revelou-se desfavorável nas categorias de aquecimento global, consumo de água e procura acumulada de energia, podendo mesmo resultar em impactes superiores aos da aquisição de um produto novo e mais eficiente (Boldoczki et al., 2021).

Em contrapartida, para os pequenos equipamentos eletrónicos (computador portátil, monitor, PC fixo, impressora), nos quais a fase de produção é mais impactante, a reutilização mostrou-se vantajosa em quase todas as categorias de impacto, incluindo ecotoxicidade terrestre e escassez de recursos minerais, confirmando o potencial da preparação para a reutilização para promover eficiência material e reduzir a pressão ambiental associada à produção de novos (Boldoczki et al., 2021).

Com base na análise de ciclo de vida realizada, os resultados indicam que, de forma geral, a opção de reparação e reutilização apresenta um impacto ambiental menor quando comparada à substituição por um equipamento novo equivalente. Essa tendência verifica-se na maioria das categorias de pequenos equipamentos elétricos e eletrónicos domésticos analisados, abrangendo também a maioria das categorias de impacto consideradas, tanto ao longo do ciclo de vida, como no caso do aquecimento global e da toxicidade humana, quanto nos impactes finais avaliados pelo método *ReCiPe* (Crenna et al., 2021).

Esta vantagem ambiental da reparação é particularmente evidente quando a avaria ocorre nos primeiros anos do ciclo de vida do equipamento.

No entanto, para avarias específicas que envolvem a substituição de componentes complexos e com elevada pegada ambiental, como placas de circuito impresso (PCI) ou motores, e especialmente quando estas ocorrem numa fase tardia da vida útil do produto, o cenário de substituição pode revelar-se ambientalmente mais favorável. Isto deve-se ao facto de o impacto ambiental associado ao processo de reparação (produção da peça sobresselente e operação) não ser compensado pelos benefícios de uma extensão curta da vida útil, tornando a produção de um novo equipamento mais eficiente a opção preferível (Crenna et al., 2021).

No contexto específico da reparação de EEE, a ACV assume particular relevância ao permitir uma análise comparativa objetiva entre os benefícios ambientais decorrentes da reparação e os impactes inerentes à substituição por um novo equipamento. O estudo de Gallego-Schmid et al. (2016) ilustra de forma clara a utilidade crucial desta ferramenta normalizada, ao demonstrar como a ACV pode quantificar e comparar os benefícios de diferentes estratégias de política ambiental, como o *ecodesign* e a gestão de fim de vida, evitando assim a transferência de impactes entre fases do ciclo de vida.

Desta forma, a ACV revela-se um instrumento fundamental para um projeto como o EcoPorto, pois fornece a base científica e metodológica necessária para avaliar de forma sólida se as suas estratégias de reparação e reutilização geram, efetivamente, benefícios ambientais positivos face ao paradigma linear de substituição, permitindo contabilizar e validar de forma credível a sua contribuição para uma economia circular.

3 METODOLOGIA

3.1 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA (ACV)

A metodologia da ACV baseia-se nos requisitos definidos pelas normas internacionais ISO 14040:2006 e ISO 14044:2006, que estabelecem os princípios gerais, o enquadramento e os requisitos específicos para a sua execução. Conforme estipulado, o estudo é estruturado em quatro fases sequenciais e interdependentes.

A primeira fase, de Definição do Objetivo e do Âmbito, estabelece os fundamentos da avaliação, especificando a sua finalidade, o contexto de aplicação e o público-alvo. Nesta etapa, determinam-se, entre outros, dois elementos estruturantes: a unidade funcional, que quantifica precisamente a função do sistema em estudo, servindo como base comparativa para todas as análises posteriores, e as fronteiras do sistema, que delimitam o âmbito da avaliação através de múltiplas dimensões. Estas incluem a fronteira técnica, normalmente integrando todo o ciclo desde a extração de matérias-primas até à gestão de fim de vida, a fronteira geográfica, definindo o contexto espacial relevante e a fronteira temporal, estabelecendo o horizonte temporal de análise (ISO, 2006a).

A segunda fase, designada por Análise de Inventário, corresponde à compilação sistemática e quantificação de todos os fluxos materiais e energéticos relevantes associados ao sistema em estudo (ISO, 2006b). Esta etapa requer a recolha de dados relativos aos consumos de recursos, emissões para a atmosfera, águas e solos, bem como a produção de resíduos em cada etapa do ciclo de vida. As entradas englobam recursos naturais, como minérios, água e solo, materiais, incluindo componentes novos e consumíveis, bem como energia, como eletricidade e combustíveis utilizados no transporte. As saídas incluem as emissões para o ar, como CO₂, CH₄, NO_x, SO_x e partículas, as emissões para a água, incluindo metais pesados e nutrientes, bem como as emissões para o solo e os resíduos sólidos produzidos (ISO, 2006b).

A terceira fase da ACV consiste na Avaliação de Impactes Ambientais, etapa em que os potenciais impactes ambientais são quantificados a partir dos dados obtidos no Inventário do Ciclo de Vida. Este processo consiste na associação dos fluxos inventariados com as categorias de impacto relevantes, de modo a estabelecer a sua relação com os danos ambientais específicos e, posteriormente, proceder à respetiva Interpretação (ISO, 2006a).

Esta fase integra alguns passos obrigatórios, nomeadamente: a Classificação dos fluxos do inventário nas categorias de impacto selecionadas, e a Caracterização propriamente dita, isto é, a quantificação do contributo de cada fluxo para cada categoria de impacto. Para além destes, existem também procedimentos opcionais, que podem ser aplicados em função dos objetivos e âmbito do estudo, como o agrupamento ou hierarquização das categorias, a normalização dos resultados, permitindo a comparação entre impactes de natureza distinta e, em casos específicos, a ponderação, que corresponde à agregação dos resultados com base em critérios de relevância ou de política ambiental (ISO, 2006a).

A etapa final da ACV, designada por Interpretação, consiste na análise integrada dos resultados obtidos, orientada para a extração de conclusões ambientalmente fundamentadas, recomendações operacionais e contributos relevantes que respondam diretamente aos objetivos estabelecidos no início do estudo. Nesta etapa, procede-se à identificação de pontos críticos ao longo do ciclo de vida, determinando quais as fases e quais os processos unitários que mais contribuem para os impactos ambientais em cada cenário considerado. Esta análise permite localizar com precisão os segmentos do ciclo de vida com maior potencial de otimização, particularmente, no caso em estudo, através da comparação sistemática entre o cenário linear convencional e o cenário circular de reparação.

Nas ACVs comparativas, como no presente caso de estudo, realiza-se também uma análise comparativa aprofundada que avalia a significância das diferenças ambientais entre os dois ou mais cenários. No presente contexto, esta avaliação permitirá quantificar potenciais benefícios associados à reparação, identificando tanto as vantagens em categorias de impacto atualmente consideradas críticas, como as alterações climáticas ou a depleção de recursos não renováveis, como eventuais compromissos ambientais que possam surgir noutras categorias. A análise deteta ainda possíveis fenómenos de transferência de impactos, em que a redução verificada numa categoria pode corresponder a um aumento noutra.

Complementarmente, executa-se uma análise de sensibilidade e incerteza que examina a consistência dos resultados face a parâmetros-chave variáveis, como a eficiência dos processos, as distâncias de transporte ou, no caso em específico, a vida útil prolongada do equipamento reparado. Esta validação é essencial para quantificar a sensibilidade dos resultados e aferir a fiabilidade das conclusões perante diferentes cenários metodológicos e variações nos pressupostos adotados.

Por fim, sintetizam-se conclusões claras quanto aos cenários avaliados, discute-se as limitações do estudo, incluindo a qualidade dos dados, os pressupostos de adotados, e formulam-se recomendações concretas destinadas à prática operacional (ISO, 2006a).

3.2 CÁLCULO DE INDICADORES DE CIRCULARIDADE E REPARABILIDADE

Os dados para o seu cálculo foram integralmente obtidos a partir de duas fontes primárias, a base de dados interna de gestão do EcoPorto e os registos de pesagem dos componentes dos equipamentos, realizados diretamente pelo autor no local.

Índice de Reparabilidade – O Índice de Reparabilidade (IR), foi definido como a percentagem de equipamentos efetivamente reparados em relação ao total de equipamentos analisados para possível reparação e é determinado a partir da Equação 1.

$$IR (\%) = \frac{\text{Número de equipamentos reparados}}{\text{Número total de equipamentos avaliados para reparação}} \times 100 \quad (1)$$

Índice de Circularidade – O Índice de Circularidade (IC), corresponde à massa dos materiais dos equipamentos que é efetivamente aproveitada em relação ao peso total dos equipamentos. É expresso pela Equação 2.

$$IC = \frac{\text{Massa dos materiais aproveitados}}{\text{Massa total dos equipamentos}} \quad (2)$$

A circularidade mede a capacidade de manter materiais e componentes em utilização, reduzindo a extração de novos recursos e a produção de resíduos, enquanto a reparabilidade reflete a eficácia dos processos que prolongam a vida útil dos equipamentos (BCSD Portugal, 2021).

4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

4.1 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA (ACV)

4.1.1 DEFINIÇÃO DE OBJETIVO E ÂMBITO

De forma a contextualizar o caso de estudo, definindo o âmbito da ACV, começa-se por apresentar os detalhes necessários sobre o projeto EcoPorto.

A entrada de equipamentos no circuito do EcoPorto processa-se através de dois canais principais: os Ecocentros, infraestruturas físicas e o serviço de Recolha ao Domicílio. Em ambos, a primeira e mais crítica etapa é a triagem inicial, um mecanismo de decisão que determina o destino do equipamento, privilegiando sempre a reutilização face à reciclagem.

Nos Ecocentros, a triagem é realizada no momento da receção do equipamento pelo munícipe, seguindo rigorosamente o fluxo operacional definido na Figura 9. Este procedimento obedece a um fluxo decisório binário, iniciado pela categorização do artigo como equipamento informático ou restante EEE.

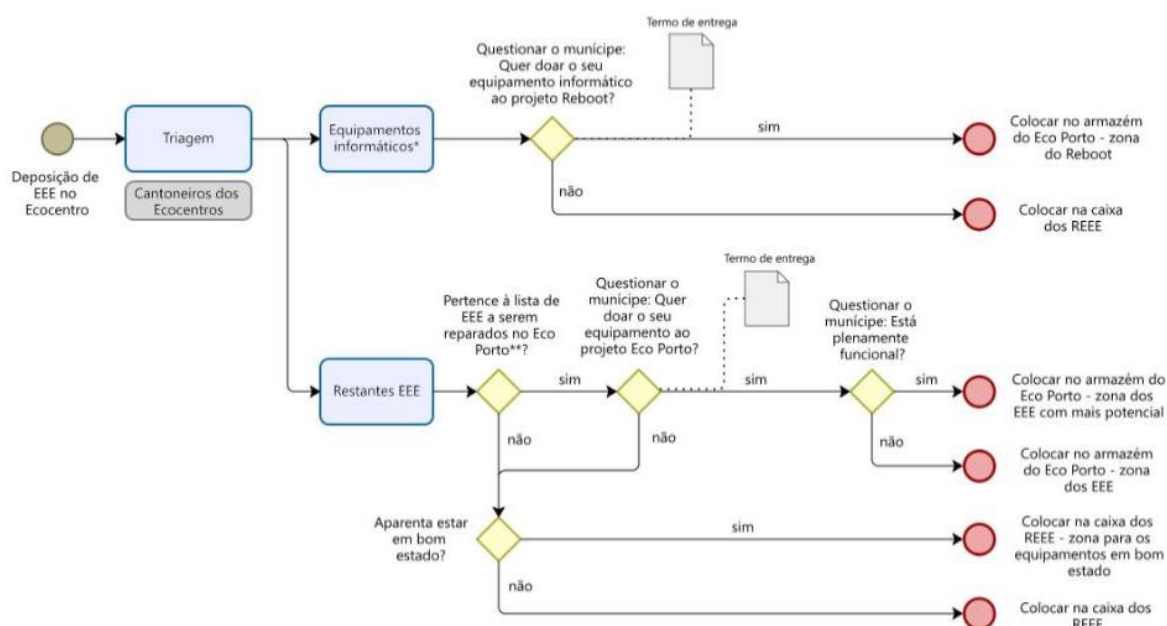


Figura 9. Instrução de Trabalho, Ecocentro, fornecido pela Empresa Municipal de Ambiente do Porto.

Para os equipamentos informáticos, o colaborador questiona ativamente o munícipe sobre a sua vontade de doar o artigo para o projeto EcoPorto. Em caso afirmativo, o equipamento é depois encaminhado para o armazém do EcoPorto. Se a doação for recusada, o item segue diretamente para o contentor de REEE para reciclagem.

Para os restantes EEE, o fluxo é mais complexo. Após a receção, verifica-se se o artigo consta de uma lista pré-definida de equipamentos prioritários para reparação. Integrando esta lista, o munícipe é novamente inquirido sobre a disponibilidade para doação. Consentindo, e após a assinatura do Termo de Entrega, o equipamento é sujeito a uma avaliação sumária do seu estado aparente.

Os bens considerados funcionalmente aptos são armazenados numa zona de reutilização e os que necessitam de intervenção são direcionados para uma área de equipamentos a reparar. Este processo de verificação segue um protocolo estruturado que começa com uma avaliação visual rigorosa no momento da entrada. Em casos de dúvida ou para uma classificação mais precisa, são realizados testes funcionais adicionais que permitem identificar o estado real do equipamento e o seu potencial de reparação com maior exatidão.

Se o equipamento não for elegível para reparação, mas apresentar boas condições visuais, é colocado numa caixa de REEE diferenciada para potenciais outros circuitos de valorização. Procede-se então à desmontagem e à extração seletiva de componentes que se encontrem em bom estado e possam ter utilidade futura como peças de sobressalentes, promovendo a economia de materiais. Tanto estes componentes como os equipamentos completos são meticulosamente pesados durante o processo. Esta pesagem, que também ocorre com todos os artigos reparados e listados no website, é fundamental para a determinação de indicadores quantitativos de reutilização e recuperação de materiais, permitindo uma avaliação mais precisa do desempenho ambiental do projeto.

O serviço de recolha ao domicílio integra uma camada adicional de complexidade, pois a triagem inicial é efetuada de forma remota, através do serviço de atendimento telefónico Ecolinha, conforme detalhado na Figura 10.

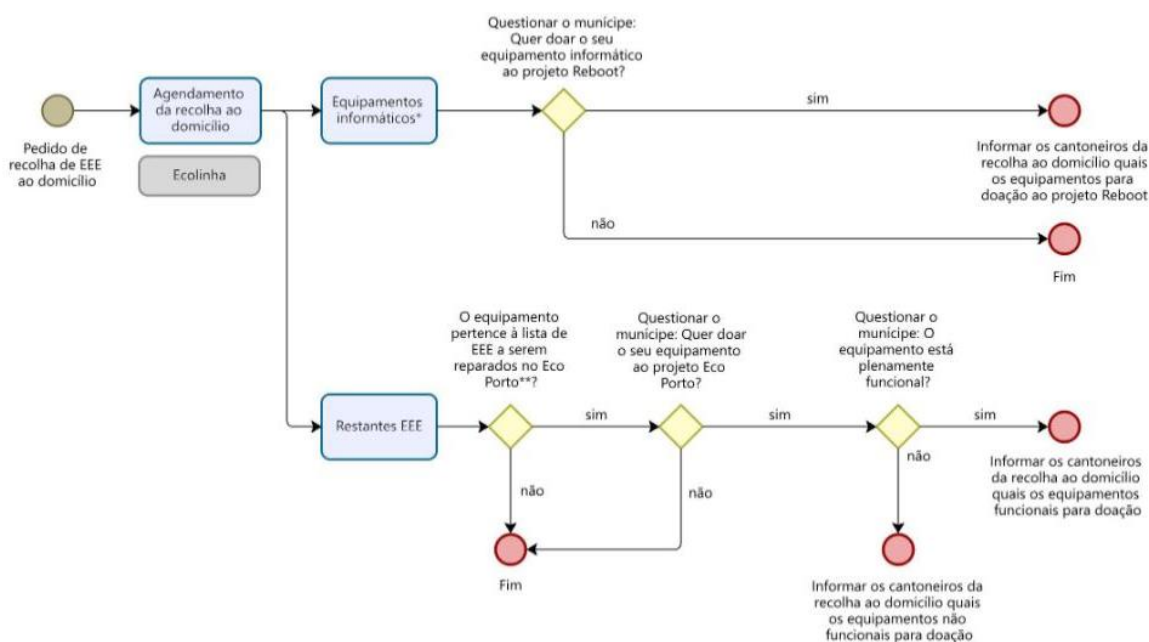


Figura 10. Instrução de Trabalho, Agendamento da Recolha ao Domicílio, fornecido pela Empresa Municipal de Ambiente do Porto.

Para os EEE, o operador verifica a sua elegibilidade para reparação com base na lista do EcoPorto. Sendo elegível, o município é confrontado com a questão da doação. A sua decisão, registada e vinculada ao pedido de agendamento, orientará as ações da equipa operacional.

No momento físico da recolha, seguindo o protocolo/instrução da Figura 11, os cantoneiros, informados previamente sobre a natureza dos artigos e a vontade de doação, confirmam *in situ* a identificação dos equipamentos com potencial.

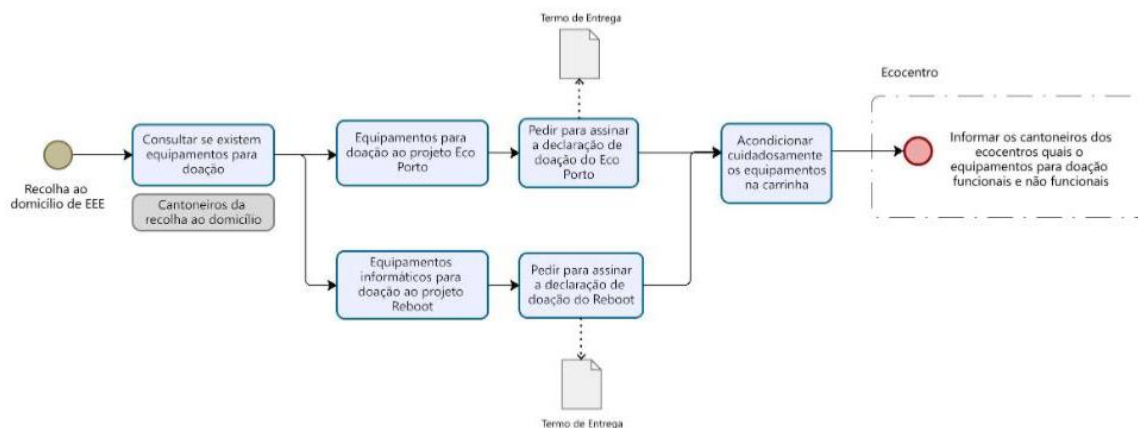


Figura 11. Instrução de Trabalho, Recolha ao Domicílio, fornecido pela Empresa Municipal de Ambiente do Porto.

O passo seguinte é a formalização da doação com a assinatura presencial de uma Declaração de Doação. Na descarga no ecocentro, os bens entregues são sujeitos a uma avaliação inicial rigorosa que combina critérios técnicos e administrativos, que definem o seu encaminhamento final. Verifica-se a tipologia do artigo e o seu estado de conservação para determinar o potencial para reutilização direta, reparação ou aproveitamento como fonte de peças. Os itens irrecuperáveis são imediatamente reencaminhados para o Ecocentro.

Os bens com potencial de segunda vida são encaminhados para o EcoPorto, infraestrutura que centraliza o processo de regeneração. Nesta fase, cada equipamento é sujeito a um ciclo estruturado de intervenção técnica composto por quatro etapas sequenciais: avaliação inicial, destinada a identificar avarias e aferir a viabilidade de reparação, reparação propriamente dita, que envolve substituição ou recuperação de componentes, limpeza e higienização, assegurando não apenas a funcionalidade, mas também a condição estética e sanitária dos bens e registo sistemático de todas as intervenções.

A etapa seguinte é a publicação em *BackOffice* e reserva para entidades. As Instituições Particulares de Solidariedade Social (IPSS) parceiras têm prioridade. Os técnicos cruzam a lista de necessidades destas instituições com o inventário de artigos reparados, reservando os itens solicitados. Para bens sem procura institucional imediata, é acionando um protocolo de publicação na plataforma digital interna, envolvendo fotografia, descrição pormenorizada e atribuição de um identificador único. Segue-se a fase de registo e sistematização de dados.

Cada bem é registado em formulários físicos específicos por categoria. De seguida, toda a informação é transposta para a base de dados. O processo de registo tem início logo na triagem inicial, sendo preenchida uma ficha técnica específica pelo colaborador que avalia o equipamento.

Para otimizar a transparência e atratividade do processo de redistribuição, cada artigo é fotografado após a intervenção técnica. Esta imagem, que acompanhará a descrição pormenorizada no *website*, permite aos municípios visualizar claramente o estado e o modelo do equipamento disponível para reserva.

A decisão de publicar um equipamento na plataforma online ou de o direcionar para as IPSS parceiras não obedece a um protocolo rígido, mas sim uma avaliação contextual dinâmica. Prioriza-se sempre a satisfação das necessidades identificadas na lista de carências das IPSS. No entanto, para manter a plataforma digital como um canal vivo e atrativo para a comunidade, é imperativo garantir um fluxo contínuo de novos artigos. Assim, estabelece-se um equilíbrio pragmático entre a prioridade institucional e a disponibilização pública, assegurando que ambos os circuitos de redistribuição, o socialmente prioritário e o comunitariamente aberto.

Após esta intervenção técnica, os equipamentos considerados aptos para reutilização são inseridos no *website* do EcoPorto.

Paralelamente, o armazém principal constitui o espaço destinado ao armazenamento organizado de bens em triagem, à espera de reparação ou já reparados. Nesse contexto, os beneficiários podem levantar os artigos reparados previamente reservados através da plataforma online.

De forma a sintetizar os fluxos descritos, apresenta-se de seguida a Figura 12, que corresponde ao circuito operacional do EcoPorto, desde a recolha inicial até à disponibilização final dos equipamentos recuperados.

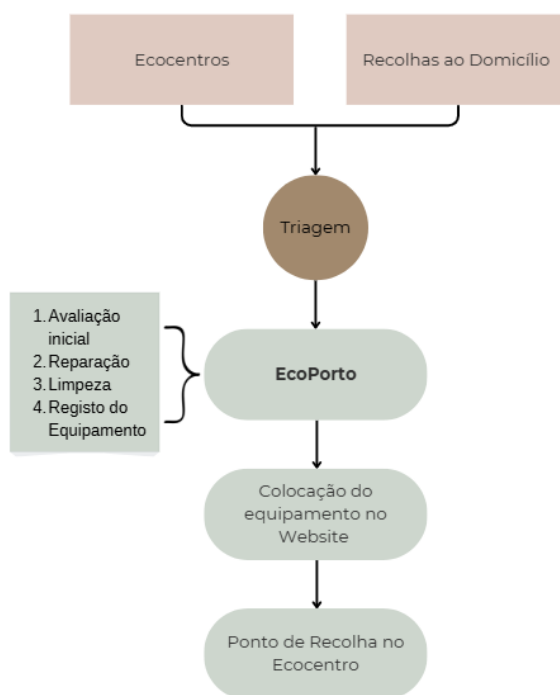


Figura 12. Circuito operacional do Projeto EcoPorto.

O sistema de descarte responsável assegura que todos os materiais sem potencial sejam triados e encaminhados para os contentores apropriados do Ecocentro, segregados por tipologia.

O presente estudo, enquadrado na avaliação do ciclo de vida de objetos elétricos e eletrónicos fora de uso, foca-se na fase de fim de vida. No entanto, para garantir uma comparação abrangente e contextualizada, é imperativo modelar todo o ciclo de vida do produto (avaliação do berço-ao-túmulo), uma vez que as fases iniciais representam uma porção significativa dos impactes totais e porque a intervenção no fim de vida gera efeitos em cascata que influenciam todo o sistema.

O objetivo principal deste estudo consiste em avaliar e comparar os impactos ambientais potenciais associados a dois cenários distintos de fim de vida: um cenário convencional linear, no qual o equipamento, atingido o seu fim de vida útil primário, é descartado como resíduo através dos circuitos convencionais de gestão de resíduos, e um cenário circular de prolongamento, resultante da intervenção do projeto EcoPorto, que integra processos de triagem, reparação e a consequente reintrodução do equipamento no ciclo de utilização através de doação, evitando assim a produção de um novo equipamento e os respetivos impactos inerentes à sua produção.

Solicitado pela própria organização EcoPorto no âmbito da presente dissertação, este trabalho pretende, com base numa metodologia de ACV, quantificar e demonstrar em que medida a operação do projeto compensa ambientalmente, ou seja, determinar a magnitude dos benefícios ambientais obtidos com a sua atividade de economia circular face ao percurso linear tradicional. Deste modo, o estudo procura avaliar se a existência do EcoPorto compensa do ponto de vista do desempenho ambiental e em que medida essa compensação ocorre.

Os resultados obtidos serão de primordial interesse para a EcoPorto, fornecendo-lhe uma métrica quantificável do valor do seu contributo para a sustentabilidade, que poderá ser utilizada para comunicação, melhoria de processos e suporte a decisões estratégicas. Paralelamente, a investigação pretende servir como um caso de estudo e um modelo metodológico replicável, pelo que os seus resultados e conclusões serão igualmente do interesse de empresas similares de gestão de resíduos e entidades do terceiro setor que operam na área da economia circular.

Finalmente, ao evidenciar os benefícios concretos da reparação e reutilização, este estudo contribui para informar e educar o público em geral sobre o impacto das suas escolhas de consumo e destino de resíduos, promovendo uma maior consciencialização ambiental.

No presente estudo, o EEE selecionado foi o aspirador, escolhido por ser o equipamento com maior número de reparações registadas no EcoPorto, apresentar uma complexidade técnica média que permite avaliar de forma representativa os processos de reparação, e possuir relevância prática devido à sua utilização generalizada nos domicílios, o que assegura que os resultados obtidos sejam aplicáveis e de interesse tanto para o EcoPorto como para outras entidades de gestão de resíduos.

A unidade funcional assegura a comparabilidade dos sistemas em avaliação, garantindo que todos os fluxos de entrada e saída são referidos a uma função quantificada comum e inequívoca. No âmbito do presente estudo, estabeleceu-se a seguinte unidade funcional: utilização de um aspirador durante 60 horas anuais, ao longo de toda a sua vida útil estimada em 8 anos.

No presente estudo, a alocação do fim de vida foi integralmente atribuída ao produto principal, sem contabilizar créditos de reciclagem ou valorização energética. Nos sistemas multifuncionais, como o EcoPorto, a distribuição dos fluxos elementares foi realizada com base em critérios físicos, garantindo que os impactos associados à triagem, reparação e redistribuição fossem corretamente alocados à função principal de prolongamento da vida útil.

Para a presente dissertação, a Avaliação do Ciclo de Vida de um aspirador foi efetuada com o software *SimaPro Classroom*, ferramenta líder no domínio da ACV, aplicando-se o método *ReCiPe* 2016 para a avaliação de impactos. Este programa constitui um suporte fundamental para a recolha de dados, para a organização estruturada do inventário e para a análise do desempenho ambiental de produtos e sistemas.

Esta escolha metodológica fundamenta-se no carácter abrangente e atualizado deste método, que incorpora o conhecimento científico mais recente na disciplina, permitindo uma avaliação integrada através de 18 categorias de impacto ambiental distintas. Estas incluem a depleção do ozono estratosférico, a radiação ionizante, a formação de ozono para a saúde humana, a formação de matéria particulada fina, a formação de ozono para ecossistemas terrestres, a acidificação terrestre, a eutrofização de água doce, a eutrofização marinha, a ecotoxicidade terrestre, a ecotoxicidade de água doce, a ecotoxicidade marinha, a toxicidade humana carcinogénica, a toxicidade humana não carcinogénica, o uso do solo, a escassez de recursos minerais, a escassez de recursos fósseis e o consumo de água. A análise abrangendo diferentes categorias de impacto permite obter uma visão mais completa e multifacetada dos resultados, evitando interpretações tendenciosas ou parciais que poderiam emergir da avaliação limitada a uma única categoria.

A opção pela abordagem *midpoint* (ponto intermédio) sob a perspetiva *hierarchist* (H) representa um equilíbrio ótimo entre fiabilidade científica e solidez interpretativa (Huijbregts et al., 2017). Esta abordagem modela o impacto ambiental num ponto intermédio da cadeia causal, quantificando, por exemplo, as emissões de dióxido de carbono equivalente para a categoria de aquecimento global, antes que estas se desdobrem numa diversidade de efeitos finais. A vantagem desta perspetiva reside no facto de os cálculos se basearem em relações físicas mais consolidadas, fornecendo resultados mais pormenorizados e menos incertos para cada mecanismo de impacto específico quando comparada com a abordagem *endpoint* (ponto final).

A modelação foi desenvolvida com base na base de dados *Ecoinvent 3 - allocation, cut-off by classification - system/unit* (Wernet et al., 2016), selecionada pela sua abordagem metodológica rigorosa e consolidada na atribuição de impactes. A opção pelo sistema de alocação *cut-off* é consistente com a estrutura conceptual deste estudo, permitindo atribuir os encargos ambientais da reciclagem ao sistema subsequente que utiliza os materiais secundários. A perspetiva *hierarchist*, por sua vez, foi selecionada por representar o consenso científico baseado em relações de causa-efeito médias e horizontes temporais equilibrados (Huijbregts et al., 2017), assumindo que os mecanismos ambientais seguem as teorias científicas mais consensuais, proporcionando assim um equilíbrio entre o otimismo da perspetiva individualista e o princípio da precaução inerente à perspetiva equalitária.

4.1.2 ANÁLISE DO INVENTÁRIO DO CICLO DE VIDA (ICV)

Para o presente estudo, o inventário foi construído através de uma abordagem híbrida, que combina dados primários e secundários para garantir tanto a precisão contextual como a viabilidade. Os dados primários foram recolhidos especificamente para este estudo através de observação direta no EcoPorto, pesagens detalhadas dos equipamentos e registos contidos na base de dados do projeto.

Para os processos não diretamente medidos, recorreram-se a dados secundários obtidos através de literatura e bases de dados de ACV de referência.

O modelo de sistema de *cut-off*, ou corte, adotado na base de dados *Ecoinvent 3.7.1*, estabelece uma distinção fundamental entre resíduos e recicláveis. De acordo com esta convenção, os produtores de resíduos assumem integralmente os encargos ambientais associados ao tratamento e destino final desses materiais, sem receber quaisquer créditos ou benefícios pela potencial reciclagem, valorização ou reutilização que possa ocorrer a jusante no ciclo de vida. Paralelamente, os utilizadores de matérias-primas secundárias (recicladas) iniciam os seus inventários com um impacto ambiental nulo para esses materiais, herdando apenas os encargos do próprio processo de reciclagem. Esta abordagem atribui os créditos ambientais da reciclagem ao utilizador do material secundário e não ao produtor do resíduo, promovendo assim uma contabilização conservadora e evitando a dupla contagem de benefícios.

O ciclo de vida de um aspirador inicia-se universalmente com a extração e processamento de matérias-primas, fase fundamental onde os recursos naturais são obtidos e transformados em materiais utilizáveis na produção, incluindo a exploração de recursos naturais para a produção de polímeros, metais e borracha. Esta etapa constitui a base de todo o processo posterior, representando o primeiro contributo significativo de energia e matéria. Estes materiais seguem para a fase de produção integrando os processos de fabrico e montagem, onde são processados e transformados em componentes e posteriormente integrados num produto final funcional, prontos a entrar no circuito comercial (Gallego-Schmid et al., 2016).

O equipamento completo é então sujeito a distribuição e comercialização, envolvendo o seu transporte desde o produtor até ao ponto de venda e, posteriormente, até ao consumidor final. De seguida, a utilização pelo consumidor representa a fase de operação do produto, durante a qual este cumpre a função para a qual foi concebido, caracterizada pelo consumo de energia elétrica ao longo da sua vida útil operacional e, no caso, de consumíveis como sacos de depósito.

É neste ponto que o fluxo se bifurca, delineando dois destinos distintos consoante o modelo económico adotado. No modelo linear tradicional, o produto segue um percurso unidirecional. Após a utilização, atinge o seu fim de vida útil e é encaminhado para um Ecocentro, neste caso o da Prelada. Aqui, caso não apresente potencial de recuperação, o produto é descartado como resíduo, sendo posteriormente direcionado para um contentor e para um sistema de gestão de resíduos como a LIPOR.

Em contrapartida, o modelo circular em estudo introduz uma lógica de regeneração e otimização de recursos que preserva a uma superior magnitude o valor e utilidade do produto. Neste modelo, após a fase de utilização, o produto que ainda possui valor intrínseco não é descartado, mas sim direcionado para um EcoPorto, correspondente ao fim de vida útil primário.

Esta informação está ilustrada na Figura 13, uma vez que é um esquema comparativo entre o modelo linear descartável e o modelo circular de reparação e reutilização no ciclo de vida de equipamentos. Nesta encontra-se descrito o diagrama de fluxo, incluído na sua totalidade nas fronteiras do sistema.

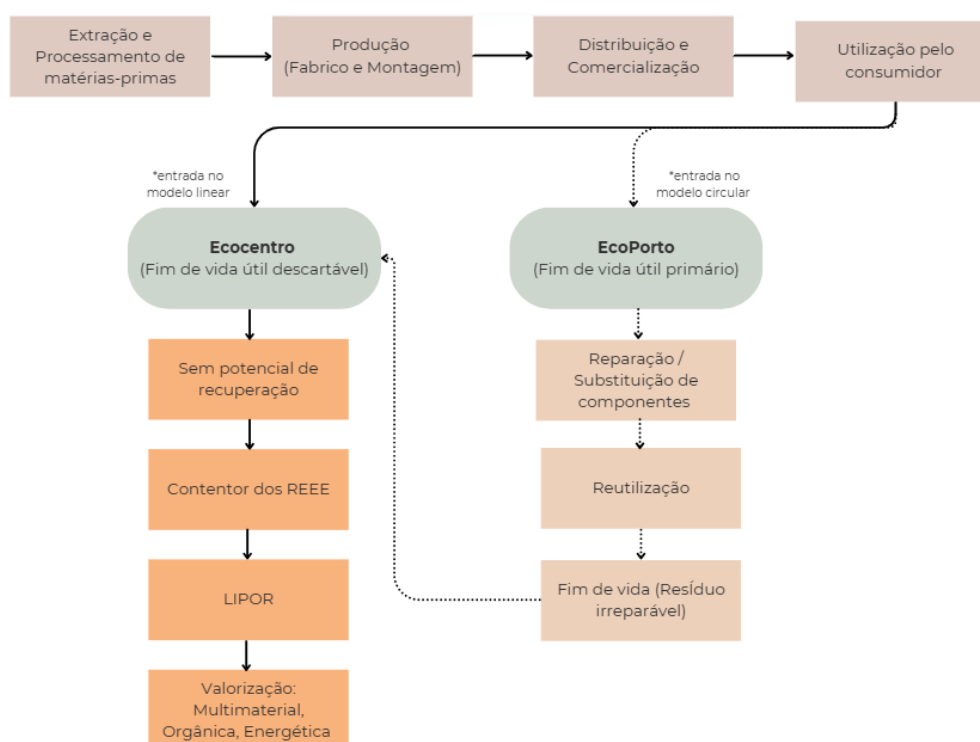


Figura 13. Comparação entre um modelo linear e um modelo circular na ACV de um equipamento.

Definida a informação a recolher, a estratégia de obtenção de dados para a construção do inventário do ciclo de vida decorreu, como mencionado, combinando técnicas de recolha de dados primários, com dados secundários, provenientes de literatura científica e bases de dados reconhecidas.

Esta recolha de dados beneficiou dos registos institucionais fornecidos pela Porto Ambiente, organizados em bases de dados estruturadas em formato Excel que englobavam todo o universo de bens processados pelo EcoPorto, categorizados segundo o seu estado operacional, incluindo equipamentos reparados com sucesso, artigos aguardando intervenção técnica, equipamentos sem potencial de reparação, classificados como resíduo, bens em fase de teste inicial, artigos pendentes de aquisição de peças, equipamentos que não requereram intervenção e bens destinados a sessões de capacitação/formação.

Um elemento particularmente relevante da recolha de dados consistiu na análise das fichas técnicas de reparação, documentos padronizados que registam com precisão todo o ciclo de vida operacional de cada equipamento no âmbito do projeto. Estas fichas e a base de dados depois de ser preenchida contém informação que posteriormente vai ser inserida na plataforma online do EcoPorto nomeadamente:

1. Dados de identificação:

- a. Data de entrada no armazém;
- b. Identificação única do equipamento (ID);
- c. Nome do técnico responsável;
- d. Origem (ecocentro - particular/empresa, ou recolha domiciliária);
- e. Categoria e por vezes a Subcategoria do produto;
- f. Marca, modelo e número de série;
- g. Peso e dimensões físicas.

2. Informação técnica:

- a. Observações do teste inicial de diagnóstico;
- b. Plano de reparação estabelecido;
- c. Localização física no circuito operacional (oficina/armazém);
- d. Tempo efetivo de execução da reparação;
- e. Identificação única na plataforma online no caso de serem disponibilizados, porque alguns equipamentos são doados diretamente ao destinatário;
- f. Registo de peças retiradas (sim/não);
- g. Observações detalhadas sobre as peças removidas;
- h. Peso exato do material retirado para peças de substituição.

3. Dados de saída:

- a. Data de entrega/doação;
- b. Identificação do destinatário final.

Paralelamente, foram analisados os registos completos da plataforma online de doação, contendo informação detalhada sobre todos os bens disponibilizados e respetivos processos de doação até à data de 14 de abril de 2025. Esta análise permitiu reconstituir os fluxos de saída dos equipamentos reparados e os padrões de aceitação por parte dos utilizadores finais. Estes registos incluíram não apenas a data e a descrição dos equipamentos, mas também o seu estado administrativo, permitindo caracterizar o ciclo de disponibilização e recolha. No sistema, cada registo foi categorizado segundo o seu estado, sendo estes designados como publicado, reservado, terminado, arquivado e rascunho.

Extração de matérias-primas e produção

A primeira análise centra-se na fase de extração e processamento de matérias-primas relativas a um aspirador doméstico e da respetiva produção, excluindo a embalagem. Esta etapa inicial do ciclo de vida do produto é particularmente relevante, uma vez que define o conjunto de recursos necessários para a sua conceção e condiciona, desde logo, a pegada ambiental associada.

Para caracterizar de forma precisa a composição material dos aspiradores em fim de vida, executou-se um processo de desmontagem e pesagem de uma amostra representativa de aspiradores. Alguns destes equipamentos foram minuciosamente desconstruídos peça a peça, com cada componente sendo individualmente identificado e pesado com recurso a uma balança de precisão calibrada, para posteriormente ser classificado com base na sua composição.

A Tabela 3, sintetiza os dados relativos à composição material do aspirador analisado, detalhando o peso individual de cada componente, o material constituinte e os processos de manufatura associados. No presente estudo, os processos de manufatura considerados para a fase de produção do aspirador, incluindo operações de transformação de materiais fundamentais como moldagem por injeção, extrusão, remoção de material por perfuração e fundição, foram baseados em dados da literatura científica, especificamente no estudo de Pérez-Belis et al. (2017).

É importante referir que os dados relativos ao peso dos componentes apresentados na Tabela 3 resultaram da desmontagem e medição direta de aspiradores realizada in situ no âmbito do projeto EcoPorto, com exceção dos valores assinalados com asterisco (*), os quais foram obtidos do estudo já referenciado anteriormente.

No estudo de Gallego-Schmid et al. (2016), o consumo hídrico de 13 L foi criteriosamente inventariado em conjunto com o consumo elétrico de 26,3 MJ, ambos atribuídos às fases de Montagem e Embalagem. Para a componente específica da embalagem e com base no referido estudo, consideraram-se os materiais cartão de embalagem dobrável e película plástica (filme).

Esta dupla inclusão material e energética fundamenta-se no objetivo de conferir maior representatividade realista à análise. A incorporação destes parâmetros reflete, assim, uma preocupação metodológica integral em capturar não apenas os consumos diretos de materiais, mas também os fluxos secundários de energia e água que caracterizam o contexto industrial real, aproximando de forma robusta a modelação do ciclo de vida das condições efetivas de fabrico.

Distribuição do aspirador

Para caracterizar o transporte de resíduos entre o Ecocentro e a LIPOR, realizado pela Porto Ambiente com frota própria, foi analisado o Documento Único Automóvel (DUA) de 5 veículos ligeiros de mercadorias, da marca Fuso, cujas características principais se encontram sumariadas na Tabela 4.

Tabela 3. Identificação, composição material e peso individual de cada componente constituinte do equipamento, resultante do processo de desmontagem e análise (Pérez-Belis et al., 2017).

Componente	Material/Processo <i>Ecoinvent</i>	Massa (kg)
Botão de ligar	ABS (Acrilonitrilo Butadieno Estireno) Moldagem por injeção	0,025
Depósito	PA (Poliamida) Moldagem por injeção	0,300
Bocal de sucção	PP (Polipropileno) Moldagem por injeção	0,038
Mangueira	ABS (Acrilonitrilo Butadieno Estireno) Extrusão de tubo plástico	0,470
Rodas principais	PP (Polipropileno) Moldagem por injeção	0,300
Rodas pequenas	TPE (Elastómero Termoplástico) Moldagem por injeção	0,001*
Revestimento do cabo	PMMA (acrílico) Moldagem por injeção	0,063*
Parafusos	Metal ferroso Enformação a frio (Cold heading) Roscagem (Thread rolling)	0,007*
Tampa superior	ABS (Acrilonitrilo Butadieno Estireno) Moldagem por injeção	0,660
Tampa inferior	PP (Polipropileno) Moldagem por injeção	0,760
Tampa do motor	PP (Polipropileno) Moldagem por injeção	0,280*
Peça de suporte para cabo	PC (Policarbonato) Moldagem por injeção	0,019*
Pega	ABS (Acrilonitrilo Butadieno Estireno) Moldagem por injeção	0,110*
Cabo	Cobre (Cu) Perfuração de fios (Wire drilling) Polietileno de Alta Densidade Extrusão de tubo plástico	0,250
Motor	Metal ferroso Fundição (Casting)	1,300
Saco	Papel kraft	0,026
Placa eletrónica	PCI (Placa de Circuito Impresso)	0,035

Deste documento, extraíram-se dados essenciais como o tipo de veículo, combustível (gasóleo) e ano de matrícula (2023), que permitiram inferir a categoria Euro. Devido à ausência de informação detalhada na base de dados *Ecoinvent* sobre a especificidade da frota, optou-se por considerar o pior cenário de emissões Euro para veículos ligeiros a gasolina, garantindo assim uma abordagem conservadora na quantificação dos impactes ambientais. Esta seleção reflete uma precaução metodológica face à incerteza associada aos perfis de emissões reais.

Tabela 4. Características da frota de distribuição e comercialização (dados fornecidos pela Empresa Municipal do Ambiente).

Veículo	Marca	Modelo	Categoria EURO	Combustível	Capacidade (kg)	Distância (km)
1	Fuso	FE4P10TF1N1	EURO 6	Gasóleo	1550	13
2	Fuso	FE4P10TF1N1	EURO 6	Gasóleo	980	13
3	Fuso	FE4P10TF1N1	EURO 6	Gasóleo	840	13
4	Fuso	FE4P10TF1N1	EURO 6	Gasóleo	640	13
5	Fuso	FE4P10TF1N1	EURO 6	Gasóleo	1550	13

No que diz respeito à componente operacional, o valor de 13 km, considerado para as deslocações específicas de recolha de aspiradores, resultou de uma análise detalhada dos registos de pedidos ao domicílio realizados no primeiro trimestre de operação do projeto EcoPorto. Com base nas moradas registadas e na otimização logística aplicada pela Porto Ambiente, calculou-se a distância efetivamente percorrida pelos veículos dedicados a estas operações.

Utilização do aspirador

Para caracterizar o consumo energético associado à fase de utilização dos aspiradores em estudo, adotou-se uma abordagem que combina dados técnicos fornecidos pelos fabricantes com parâmetros consolidados na literatura científica, assegurando a representatividade dos resultados.

A potência nominal de cada equipamento foi obtida diretamente dos protocolos técnicos disponibilizados pelas respetivas marcas. Esta opção metodológica evitou discrepâncias decorrentes de medições empíricas, que podem ser influenciadas por variações operacionais ou condições ambientais, e alinou-se com as especificações padronizadas de desempenho energético declaradas pelos fabricantes. Após análise comparativa dos dados disponíveis, selecionou-se o valor de 2000 W como potência de referência, por corresponder à potência nominal mais frequente nos equipamentos analisados.

Posteriormente, para a caracterização dos padrões de utilização ao longo do ciclo de vida dos equipamentos, recorreu-se a dados publicados no artigo *Durability assessment of vacuum cleaners*, do qual se extraíram duas variáveis fundamentais relacionadas com a avaliação da durabilidade dos equipamentos:

1. Tempo médio de vida útil: Tempo esperado de operação antes da obsolescência (8 anos);
2. Utilização anual: Frequência típica de uso reportada para contextos residenciais (60 horas).

A integração destes parâmetros permitiu calcular o consumo energético total, em kWh, conforme detalhado na Tabela 5.

Tabela 5. Consumo energético total dos aspiradores, kWh, em função da potência nominal, do tempo médio de vida útil e da utilização anual.

Potência(W)	Tempo médio de vida útil (anos)	Utilização anual (horas)	Energia (kWh)
700	8	60	336
1200	8	60	576
1400	8	60	672
2000	8	60	960
7000	8	60	3360

Fim-de-vida primário do aspirador

Este estudo estrutura-se na comparação de quatro cenários distintos de uso e fim de vida de um aspirador, com o objetivo principal de avaliar o impacto da extensão da sua vida útil através da reparação. O horizonte temporal de análise é fixado em 8 anos para todos os cenários, permitindo uma comparação homogênea.

A base metodológica assenta na simulação de uma avaria pressuposta em três momentos distintos da vida do produto (curta, média e longa).

Em cada um destes momentos, contrastam-se dois percursos alternativos: a substituição imediata por um novo equipamento e a reparação para extensão da vida útil. Um quarto cenário, sem avarias, serve como referência de uma prática linear.

No primeiro cenário, que assume uma vida útil curta com substituição, o consumidor utiliza o equipamento por um período inicial de 2 anos. Findo este prazo, o cenário 1a prevê o seu descarte para aterro e a aquisição de um novo aspirador, que será usado pelos 6 anos restantes. Em contraponto, o cenário 1b demonstra a intervenção do EcoPorto, onde a reparação do mesmo equipamento evita o seu descarte e a necessidade de uma nova compra, permitindo a sua utilização contínua durante os mesmos 6 anos.

O segundo cenário, de vida útil média, repete esta lógica, mas com um período inicial de uso de 4 anos. Assim, no cenário 2a, após esse período o aspirador é enviado para aterro e substituído por um novo para os 4 anos finais, enquanto no 2b a reparação no EcoPorto assegura a sua funcionalidade para os restantes 4 anos em falta, sem nova aquisição.

O terceiro cenário parte de uma vida útil longa de 6 anos para o produto original. No cenário 3a, após este ciclo, o equipamento é descartado e um novo é adquirido para os 2 anos finais, ao passo que no 3b a reparação no EcoPorto mais uma vez elimina a necessidade de substituição, mantendo o aparelho em funcionamento até ao final do período de estudo.

Por fim, o quarto cenário estabelece-se como cenário de referência de prática linear, no qual o consumidor adquire um aspirador e usa-o continuamente até ao final da sua vida útil, estimada em 8 anos, findos os quais o produto é enviado para aterro, não havendo lugar a qualquer operação de reparação ou aquisição de um segundo equipamento. Nesse contexto, todos os cenários abordados, estão sintetizados na Tabela 6.

Tabela 6. Descrição dos cenários (1a,1b,2a,2b,3a,3b,4a) analisados para avaliação do impacto da reparação vs. substituição de um aspirador num período de 8 anos.

Cenário	Descrição do Cenário
Cenário 1: Vida Útil Curta (2 anos)	1a (Substituição): Uso por 2 anos → Descarte para aterro → Aquisição de um novo para 6 anos. Extração de matérias-primas e Produção do Aspirador (Sem embalagem): 4,644 kg. Embalagem do Aspirador: 1,2145 kg. Transporte de 1 aspirador (Com embalagem): 5,86 kg. Utilização de um aspirador durante 1 ano: 9,29 kg. Fim de vida de um aspirador: 4,644 kg.
	Extração de matérias-primas e Produção do Aspirador (Sem embalagem): 3,48 kg. Embalagem do Aspirador: 0,911 kg. Transporte de 1 Aspirador (Com embalagem): 4,39 kg. Utilização de um Aspirador durante 1 ano: 27,9 kg.
Cenário 2: Vida Útil Média (4 anos)	1b (Reparação): Uso por 2 anos → Reparação no EcoPorto → Uso contínuo por mais 6 anos. Extração de matérias-primas e Produção do Aspirador (Sem embalagem): 4,644 kg. Embalagem do Aspirador: 1,2145 kg. Transporte de 1 Aspirador (Com embalagem): 5,86 kg. Utilização de um Aspirador durante 1 ano: 9,29 kg. Transporte de 1 Aspirador (Sem embalagem): 9,29 kg. Utilização de um Aspirador durante 1 ano: 27,9 kg.
	2a (Substituição): Uso por 4 anos → Descarte para aterro → Aquisição de um novo para 4 anos. Extração de matérias-primas e Produção do Aspirador (Sem embalagem): 4,644 kg. Embalagem do Aspirador: 1,2145 kg. Transporte de 1 Aspirador (Com embalagem): 5,86 kg.

	Utilização de um aspirador durante 1 ano: 18,6 kg. Fim de vida de um aspirador: 4,644 kg. Extração de matérias-primas e Produção do Aspirador (Sem embalagem): 2,32 kg. Embalagem do Aspirador: 0,607 kg. Transporte de 1 Aspirador (Com embalagem): 2,93 kg. Utilização de um Aspirador durante 1 ano: 18,6 kg.
	2b (Reparação): Uso por 4 anos → Reparação no EcoPorto → Uso contínuo por mais 4 anos. Extração de matérias-primas e Produção do Aspirador (Sem embalagem): 4,644 kg. Embalagem do Aspirador: 1,2145 kg. Transporte de 1 Aspirador (Com embalagem): 5,86 kg. Utilização de um Aspirador durante 1 ano: 18,6 kg. Transporte de 1 Aspirador (Sem embalagem): 9,29 kg. Utilização de um Aspirador durante 1 ano: 18,6 kg.
	3a (Substituição): Uso por 6 anos → Descarte para aterro → Aquisição de um novo para 2 anos. Extração de matérias-primas e Produção do Aspirador (Sem embalagem): 4,644 kg. Embalagem do Aspirador: 1,2145 kg. Transporte de 1 aspirador (Com embalagem): 5,86 kg. Utilização de um aspirador durante 1 ano: 27,9 kg. Fim de vida de um aspirador: 4,644 kg. Extração de matérias-primas e Produção do Aspirador (Sem embalagem): 1,16 kg. Embalagem do Aspirador: 0,304 kg. Transporte de 1 Aspirador (Com embalagem): 1,46 kg. Utilização de um Aspirador durante 1 ano: 9,29 kg.
Cenário 3: Vida Útil Longa (6 anos)	3b (Reparação): Uso por 6 anos → Reparação no EcoPorto → Uso contínuo por mais 2 anos. Extração de matérias-primas e Produção do Aspirador (Sem embalagem): 4,644 kg. Embalagem do Aspirador: 1,2145 kg. Transporte de 1 Aspirador (Com embalagem): 5,86 kg. Utilização de um Aspirador durante 1 ano: 27,9 kg. Transporte de 1 Aspirador (Sem embalagem): 9,29 kg. Utilização de um Aspirador durante 1 ano: 9,29 kg.
	Uso contínuo do mesmo aspirador pela sua vida útil total (8 anos) → Descarte para aterro. Extração de matérias-primas e Produção do Aspirador (Sem embalagem): 4,644 kg. Embalagem do Aspirador: 1,2145 kg. Transporte de 1 Aspirador (Com embalagem): 5,86 kg. Utilização de um Aspirador durante 1 ano: 37,2 kg. Fim de vida de um aspirador: 4,644 kg.
Cenário 4: Vida útil média	

Para modelar o processo de reparação no EcoPorto, consideraram-se apenas os impactos associados à distribuição, nomeadamente o transporte de ida e volta do equipamento entre o consumidor e a unidade de reparação. Esta simplificação é justificada pela observação presencial efetuada, que permitiu constatar que as operações de triagem e reparação são maioritariamente manuais e envolvem consumos materiais e energéticos irreversíveis insignificantes, uma vez que se limitam a reparações simples. Desta forma, o impacto ambiental direto da atividade de reparação foi considerado mínimo e, portanto, desprezado para efeitos desta análise.

Em oposição, para modelar o cenário de fim de vida linear na ausência do EcoPorto (cenários 1a, 2a, 3a), considerou-se o pior cenário possível de destino final: o encaminhamento através das entidades gestoras. Importa ainda referir que, em termos metodológicos, o melhor cenário teórico seria um fim de vida com impacto nulo, através da alocação dos fluxos a montante, sem contabilizar os créditos pela reciclagem.

Importa salientar que o descarte em aterro apenas ocorre nos cenários de substituição, uma vez que, nesses casos, o equipamento é considerado inoperacional após a avaria e é imediatamente substituído por um novo aspirador.

Pelo contrário, nos cenários de reparação, o aspirador original é recuperado e mantido em utilização durante todo o horizonte temporal de análise (8 anos), evitando-se o seu envio para destino final.

A Tabela 7 sintetiza os valores totais para cada categoria de impacto, permitindo observar de forma comparativa a evolução dos cenários 1a, 2a, 3a, 4a e o conjunto dos cenários com reparação (1b, 2b, 3b).

Tabela 7. Contributo das diferentes fases do ciclo de vida para cada categoria de Impacte Ambiental em todos os cenários de acordo com a modelação no *SimaPro* utilizando o método *ReCiPe 2016 Midpoint (H)*.

Categoria de Impacte	Unidade	Totalt				
		Cenário 1a	Cenário 2a	Cenário 3a	Cenário 4a	Cenários 1b,2b,3b
Aquecimento Global	kg CO2 eq	647	627	606	586	585
Depleção do Ozono Estratosférico	kg CFC11 eq	0,00024	0,000232	0,000224	0,000215	0,000215
Radiação Ionizante	kBq Co-60 eq	40,8	38,7	36,6	34,4	34,4
Formação de Ozono, Saúde Humana	kg NOx eq	1,66	1,61	1,56	1,51	1,51
Formação de Matéria Particulada Fina	kg PM2.5 eq	1,15	1,11	1,06	1,02	1,02
Formação de Ozono, Ecossistemas Terrestres	kg NOx eq	1,67	1,62	1,57	1,52	1,52
Acidificação Terrestre	kg SO2 eq	3,1	3,03	2,95	2,88	2,88
Eutrofização de Água Doce	kg P eq	0,282	0,268	0,254	0,24	0,24
Eutrofização Marinha	kg N eq	0,0358	0,0342	0,0326	0,0309	0,0191
Ecotoxicidade Terrestre	kg 1,4-DCB	1450	1300	1160	1020	1020
Ecotoxicidade de Água doce	kg 1,4-DCB	77,6	72,2	66,8	61,3	59,2
Ecotoxicidade Marinha	kg 1,4-DCB	98,4	91,5	84,5	77,5	74,8
Toxicidade Humana Carcinogénica	kg 1,4-DCB	75,7	68,8	61,8	54,9	54,9
Toxicidade Humana Não Carcinogénica	kg 1,4-DCB	1010	924	843	761	748
Uso do Solo	m2a crop eq	17,8	17	16,2	15,4	15,4
Escassez de Recursos Minerais	kg Cu eq	5,07	4,44	3,81	3,18	3,18
Escassez de Recursos Fósseis	kg oil eq	183	177	171	165	165
Consumo de Água	m ³	4,2	3,96	3,73	3,49	3,49

De modo a garantir total transparência metodológica e permitir a completa rastreabilidade dos dados de inventário utilizados, apresenta-se de seguida a Tabela 8 com a descrição de todos os processos da base de dados *Ecoinvent* utilizados na modelagem, organizados por fase do ciclo de vida e na Tabela A.1 do Apêndice, com a respetiva justificação da seleção para cada processo da *Ecoinvent*.

Tabela 8. Inventário do ciclo de vida de um aspirador organizado por fase, com identificação dos materiais, componentes correspondentes e processos associados na base de dados *Ecoinvent*.

Fase	Componente	Processo (<i>Ecoinvent</i>)
Extração e Produção	Botão de ligar - Acrilonitrilo Butadieno Estireno	Acrylonitrile-butadiene-styrene copolymer {RER} production Cut-off, S Injection moulding {RER} processing Cut-off, S
Extração e Produção	Tampa superior - Acrilonitrilo Butadieno Estireno	Acrylonitrile-butadiene-styrene copolymer {RER} production Cut-off, S Injection moulding {RER} processing Cut-off, S
Extração e Produção	Pega - Acrilonitrilo Butadieno Estireno	Acrylonitrile-butadiene-styrene copolymer {RER} production Cut-off, S Injection moulding {RER} processing Cut-off, S
Extração e Produção	Mangueira - Acrilonitrilo Butadieno Estireno	Acrylonitrile-butadiene-styrene copolymer {RER} production Cut-off, S Extrusion, plastic pipes {RER} extrusion, plastic pipes Cut-off, S
Extração e Produção	Depósito - Nylon	Nylon 6-6 {RER} market for nylon 6-6 Cut-off, S Injection moulding {RER} processing Cut-off, S
Extração e Produção	Bocal de sucção - Polipropileno	Polypropylene, granulate {RER} production Cut-off, S Injection moulding {RER} processing Cut-off, S
Extração e Produção	Rodas principais - Polipropileno	Polypropylene, granulate {RER} production Cut-off, S Injection moulding {RER} processing Cut-off, S
Extração e Produção	Tampa inferior - Polipropileno	Polypropylene, granulate {RER} production Cut-off, S Injection moulding {RER} processing Cut-off, S
Extração e Produção	Tampa do motor - Polipropileno	Polypropylene, granulate {RER} production Cut-off, S Injection moulding {RER} processing Cut-off, S
Extração e Produção	Rodas pequenas - Borracha	Synthetic rubber {RER} production Cut-off, S Injection moulding {RER} processing Cut-off, S
Extração e Produção	Revestimento do cabo - Polimetilmetacrilato	Polymethyl methacrylate, beads {RER} production Cut-off, S Injection moulding {RER} processing Cut-off, S
Extração e Produção	Peça de suporte para cabo - Policarbonato	Polycarbonate {RER} production Cut-off, S Injection moulding {RER} processing Cut-off, S
Extração e Produção	Cabo – Cobre	Copper, cathode {GLO} market for Cut-off, S Copper removed by drilling, conventional {RER} drilling, conventional (no metal input) Cut-off, U
Extração e Produção	Motor - Aço	Steel, low-alloyed {RER} steel production, converter, low-alloyed Cut-off, S Casting, steel, lost-wax {GLO} market for Cut-off, S
Extração e Produção	Parafusos - Aço	Steel, low-alloyed, hot rolled {RER} production Cut-off, S
Extração e Produção	Placa eletrónica - Placa de Circuito Impresso	Printed wiring board, surface mounted, unspecified, Pb free {GLO} market for Cut-off, S
Embalagem	Saco - Papel Kraft	Kraft paper {RER} market for kraft paper Cut-off, S
Embalagem	Elettricidade	Electricity, high voltage {RER} market group for Cut-off, S
Embalagem	Caixa cartão	Folding boxboard carton {RER} market for folding boxboard carton Cut-off, S
Embalagem	Filme plástico	Packaging film, low density polyethylene {RER} production Cut-off, S
Embalagem	Água de rede pública	Tap water {RER} market group for Cut-off, S
Embalagem	Águas residuais	Wastewater, average {Europe without Switzerland} market for wastewater, average Cut-off, S
Transporte	Veículo comercial ligeiro	Transport, freight, light commercial vehicle {RER} market group for Cut-off, S
Utilização	Consumo elétrico	Electricity, low voltage {RER} market group for Cut-off, S
Utilização	Saco - Papel Kraft	Kraft paper {RER} market for kraft paper Cut-off, S
Fim de Vida	Resíduo Sólido Urbano	Municipal solid waste {PT} market for municipal solid waste Cut-off, S
Fim de Vida	Resíduo de plástico (aterro)	Waste plastic, consumer electronics {GLO} treatment of waste plastic, consumer electronics, sanitary landfill Cut-off, S
Fim de Vida	Sucata de aço (aterro inerte)	Scrap steel {Europe without Switzerland} treatment of scrap steel, inert material landfill Cut-off, S

Fim de Vida	Resíduo de papelcartão (aterro)	Waste paperboard {CH} treatment of sanitary landfill Cut-off, S
--------------------	---------------------------------	--

4.1.3 AVALIAÇÃO DOS IMPACTES DO CICLO DE VIDA (IACV) E INTERPRETAÇÃO

De um modo geral, os resultados demonstram que a fase de utilização do aspirador constitui a principal fonte de impactes ambientais na grande maioria das categorias analisadas (13 a 16 das 18), independentemente do cenário considerado (Figuras 14-18). Esta preponderância é um indicador claro de que o consumo de energia elétrica durante a vida operacional do equipamento é o fator mais significativo para o impacto ambiental, sobrepondo-se até mesmo aos processos de produção e fim de vida.

Nos cenários de substituição por novo equipamento (1a, 2a e 3a), observa-se uma evolução na preponderância dos impactes. No Cenário 1a, onde se considera a vida útil mais curta (2 anos antes de avaria e substituição), a fase de extração de matérias-primas e produção emerge como o ponto crítico para cinco categorias de impacto: ecotoxicidade terrestre, ecotoxicidade marinha, toxicidade humana carcinogénica, toxicidade humana não-carcinogénica e escassez de recursos minerais, como está representado na Figura 14.

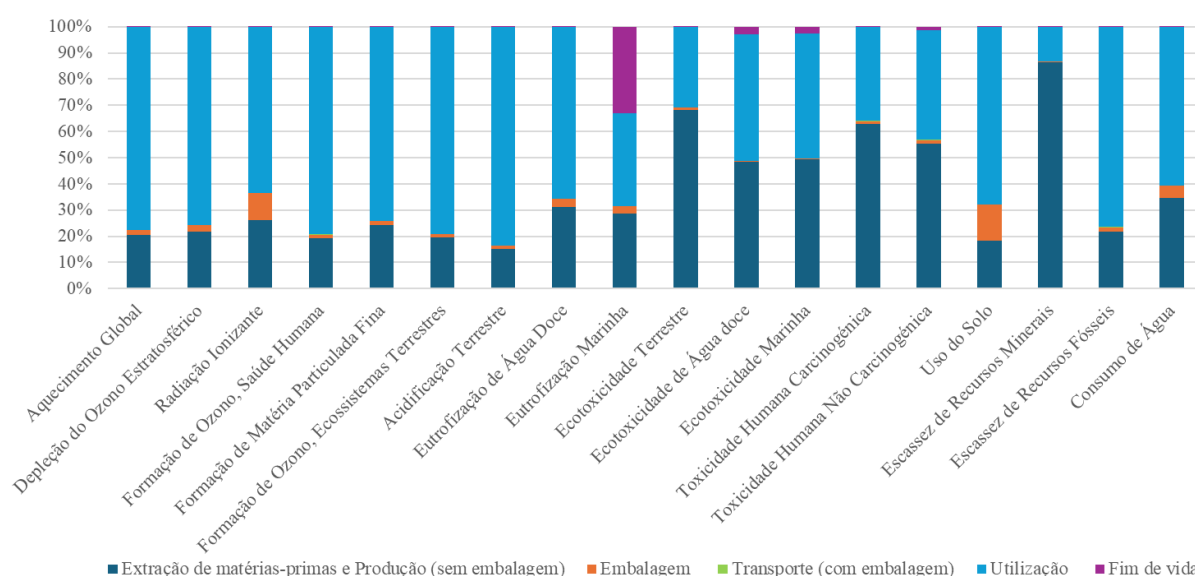


Figura 14. Representação do impacto ambiental do Cenário 1a (substituição após 2 anos de uso) nas 18 categorias de ACV. Este cenário contempla a utilização do aspirador durante 2 anos, seguida de descarte para aterro e aquisição de novo equipamento para os restantes 6 anos do período de análise.

Este fenómeno é diretamente atribuído à necessidade de fabricar um segundo aspirador, duplicando assim a carga ambiental inerente aos processos de manufatura. É particularmente relevante notar que, para a categoria de ecotoxicidade de água doce, as fases de utilização e produção apresentam contributos quase equivalentes, sublinhando a dupla pressão ambiental provocada por um modelo de substituição precoce.

À medida que a vida útil inicial do primeiro equipamento aumenta, verifica-se, no Cenário 2a, representado pela Figura 15 e no Cenário 3a representado pela Figura 16, uma ligeira diminuição do peso relativo associado à fase de extração de matérias-primas e produção. No entanto, esta fase continua a ser particularmente crítica em três categorias de impacto: ecotoxicidade terrestre, toxicidade humana carcinogénica e escassez de recursos minerais, o que demonstra que, para as restantes 15 categorias, a fase de utilização do aspirador constitui a principal contribuição para os impactes ambientais. Isto confirma que, mesmo com ciclos de vida mais longos, a decisão de substituir um equipamento funcional

por um novo incorre invariavelmente num impacto ambiental adicional significativo proveniente da cadeia de produção.

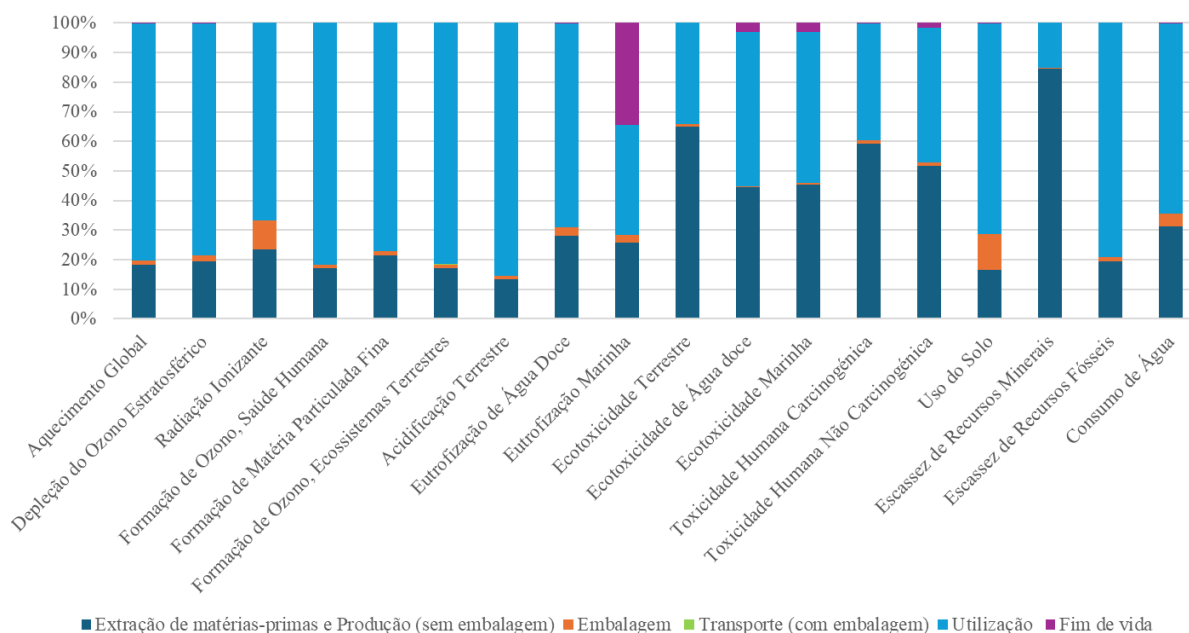


Figura 15. Representação do impacto ambiental do Cenário 2a (substituição após 4 anos de uso) nas 18 categorias de ACV. Este cenário contempla a utilização do aspirador durante 4 anos, seguida de descarte para aterro e aquisição de novo equipamento para os restantes 4 anos do período de análise.

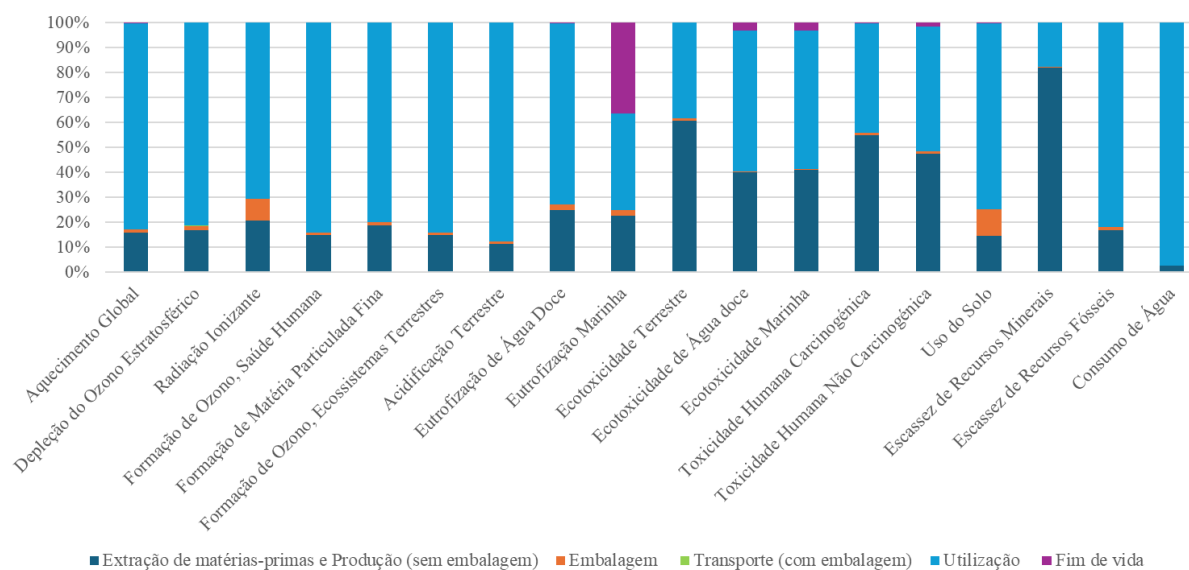


Figura 16. Representação do impacto ambiental do Cenário 3a (substituição após 6 anos de uso) nas 18 categorias de ACV. Este cenário contempla a utilização do aspirador durante 6 anos, seguida de descarte para aterro e aquisição de novo equipamento para os restantes 2 anos do período de análise.

Em contrapartida, os cenários que incorporam a reparação no EcoPorto (1b, 2b, 3b), como ilustrado na Figura 17, bem como o cenário de referência linear (4a), Figura 18, apresentam um perfil ambiental distinto e detalhado na Tabela 7 mencionada anteriormente.

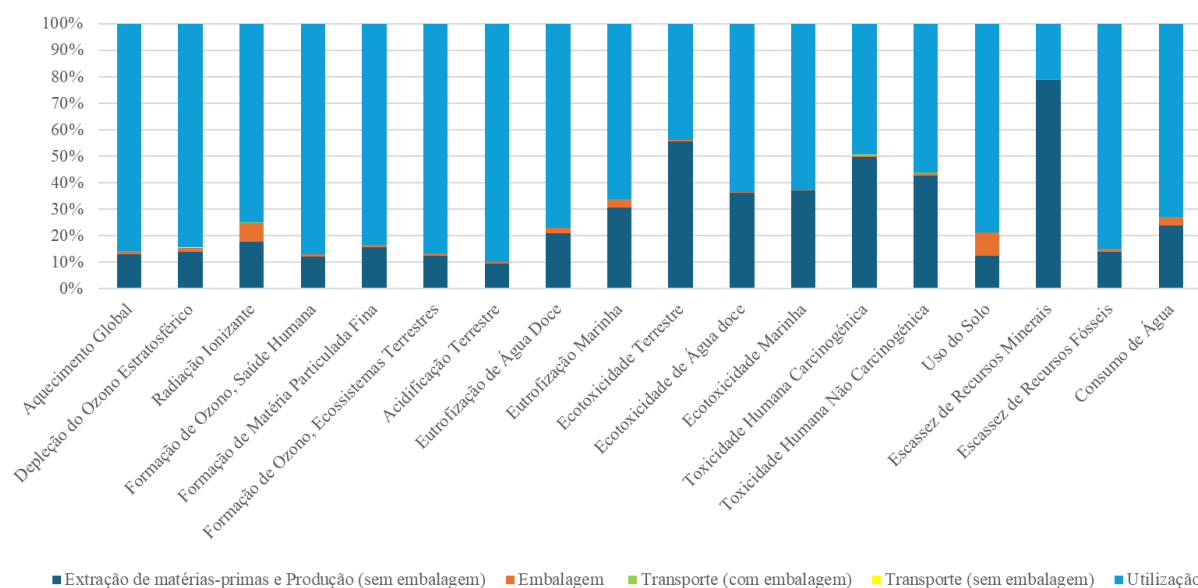


Figura 17. Representação dos impactos ambientais dos Cenários 1b, 2b e 3b (reparação no EcoPorto após avaria aos 2, 4 e 6 anos, respetivamente) nas 18 categorias de ACV. Estes cenários contemplam a reparação do equipamento após avaria e sua utilização contínua até ao final do período de 8 anos, evitando a produção de um novo aspirador.

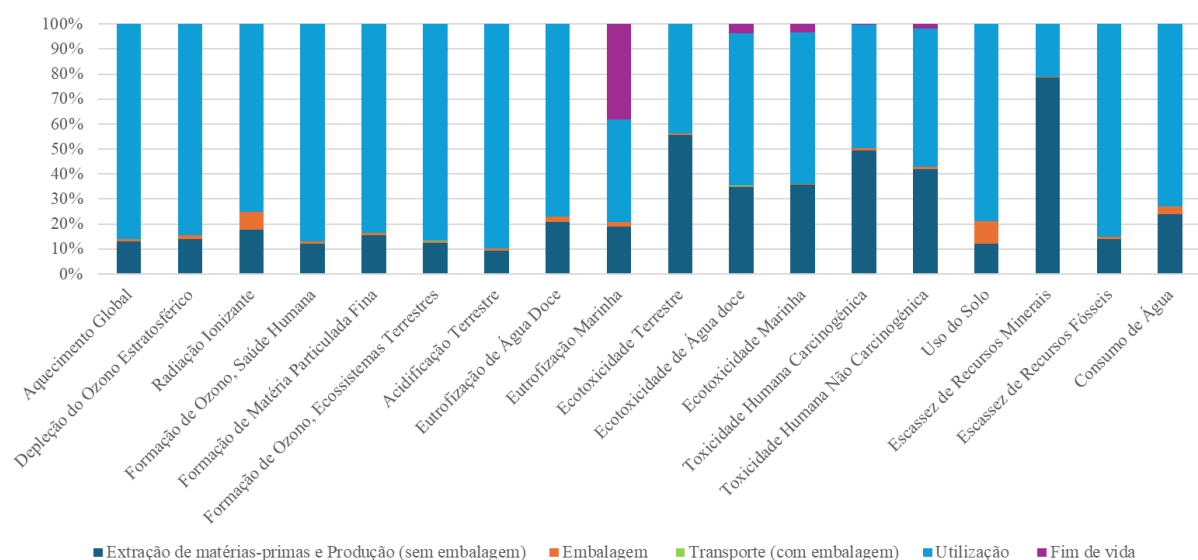


Figura 18. Representação do impacto ambiental do Cenário 4a nas 18 categorias de ACV. Este cenário contempla a utilização contínua do mesmo aspirador durante toda a sua vida útil de 8 anos, seguida de descarte para aterro, sem ocorrência de avarias ou necessidade de substituição.

Neste conjunto de cenários, a fase de utilização torna-se a dominante em 16 das 18 categorias. A intervenção do EcoPorto, ao evitar a manufatura de um segundo aspirador, elimina eficazmente os impactos críticos associados à produção. Consequentemente, o ponto crítico da extração e produção reduz-se a apenas duas categorias: ecotoxicidade terrestre e escassez de recursos minerais. No que diz respeito à toxicidade humana carcinogénica, estes cenários apresentam valores iguais na fase de utilização e na etapa de extração de matérias-primas e produção (sem embalagem).

A categoria de eutrofização marinha apresenta um padrão recorrente nos cenários 1a, 2a, 3a e 4a. Nesta categoria específica, a fase de fim de vida apresenta um impacto ambiental elevado, praticamente equiparável ao da fase de utilização.

Este resultado salienta que o descarte do equipamento em aterro, uma prática comum em todos os cenários exceto naqueles onde a reparação também evita o descarte, por exemplo cenário 1a vs 1b, provoca impactos de eutrofização significativos e que não devem ser negligenciados numa perspetiva de ciclo de vida completo.

A **fase de extração de matérias-primas e produção do aspirador**, sem considerar a embalagem, evidencia que os principais impactos ambientais estão associados à utilização de polímeros de engenharia, em particular o acrilonitrilo butadieno estireno (ABS), o polipropileno (PP), o policarbonato (PC) e os nylons.

Estes materiais, amplamente utilizados na estrutura e em componentes técnicos do aspirador, apresentam um peso muito significativo em categorias como alterações climáticas, formação de ozono, formação de material particulado e acidificação terrestre, reflexo da intensidade energética e do consumo de recursos fósseis inerentes à sua produção. Para além da produção das resinas, os processos de moldagem por injeção na fase de produção do aspirador, que correspondem à transformação dos polímeros em peças funcionais, surgem igualmente como contributo relevante, ocupando uma fração significativa dos impactos em quase todas as categorias.

Em categorias ligadas à ecotoxicidade (terrestre, marinha e em água doce) e à toxicidade humana (carcinogénica e não carcinogénica), observa-se uma maior diversidade de contributos, nomeadamente associados a borrachas sintéticas, processos específicos de transformação e à presença de metais como o cobre. Embora representem uma menor fração em termos de massa do produto, estes materiais e processos geram impactos relativamente elevados devido às emissões específicas e ao consumo de recursos associados. Também nas categorias de escassez de recursos minerais e fósseis, a produção de polímeros mantém-se como principal responsável, mas o contributo do cobre torna-se particularmente visível, refletindo a dependência da extração de metais em termos de recursos limitados.

A análise dos impactos ambientais associados especificamente à **embalagem do aspirador** revela que os principais contributos provêm, de forma consistente, dos materiais cartão dobrável para embalagens e do consumo de eletricidade de alta tensão, os quais se destacam em todas as categorias de impacto avaliadas. Estes dois elementos assumem um peso significativo no perfil ambiental da embalagem, refletindo a intensidade energética e os processos industriais envolvidos na produção e transformação deste material.

Em termos quantitativos menos expressivos, mas ainda relevantes, observa-se também a contribuição do filme de embalagem em polietileno de baixa densidade. Embora este material apresente menor impacto total quando comparado aos anteriores, regista um contributo mais notório na categoria de escassez de recursos fósseis, o que se justifica pelas origens petroquímicas do polímero.

Adicionalmente, destaca-se o papel do consumo de água potável da rede pública na categoria de consumo de água, bem como da gestão de águas residuais nas categorias de eutrofização marinha. Estes contributos, ainda que residuais em algumas categorias, são mais evidentes nas mencionadas, o que aponta para a relevância das operações de uso e descarte de água na pegada ambiental da embalagem.

A análise da **fase de utilização do aspirador** revela que os impactos ambientais estão maioritariamente associados ao consumo de eletricidade, o qual domina todas as categorias de impacto avaliadas. Este resultado é expectável, não apenas porque o funcionamento do equipamento depende diretamente do fornecimento de energia elétrica, mas também por se tratar da fase de ciclo de vida mais extensa, na qual o consumo energético se acumula ao longo de todo o tempo de utilização do produto.

Esta preponderância é claramente demonstrada ao comparar a energia total consumida durante a utilização com a energia incorporada (energia primária) necessária para a produção do próprio equipamento. Os resultados demonstram que o consumo energético na fase de utilização é dominante face à energia gasta na produção, o que evidencia de forma inequívoca a sua preponderância no impacto ambiental total do aspirador. A produção de eletricidade está, por sua vez, associada a emissões atmosféricas e à utilização intensiva de recursos, entre outros impactos.

No **fim de vida do aspirador**, a deposição de plástico em aterro sanitário, proveniente principalmente de componentes plásticos presentes em equipamentos eletrónicos, constitui o principal contributo para os impactos ambientais na maioria das categorias analisadas. Este resultado reflete a elevada proporção de materiais plásticos na composição dos equipamentos e evidencia o seu peso ambiental significativo quando destinados ao aterro.

O tratamento do aço proveniente de sucata, embora com uma representatividade inferior à do plástico em termos de quantidade, apresenta impactos relevantes em diversas categorias, nomeadamente formação de ozono, saúde humana, formação de matéria particulada fina, ecossistemas terrestres, eutrofização de água doce, escassez de recursos fósseis e consumo de água. Este contributo está associado à elevada intensidade energética envolvida no processamento do aço, bem como às emissões decorrentes do seu tratamento em aterro de inertes.

Já os resíduos de cartão, quando tratados em aterro sanitário, apresentam um contributo globalmente residual para a maioria das categorias de impacto, com ligeira maior expressão nas categorias de aquecimento global, depleção do ozono estratosférico e radiação ionizante.

A análise dos resultados demonstra como já referido que a fase de utilização é dominante em 16 das 18 categorias de impacto avaliadas, um padrão consistentemente reportado na literatura para equipamentos elétricos com consumo energético significativo durante a operação (Crenna et al., 2021). Este resultado é atribuível à combinação entre a intensidade carbónica da produção de eletricidade e a extensa duração desta fase face às restantes etapas do ciclo de vida.

A intervenção do EcoPorto, ao evitar a necessidade de produção antecipada de um novo aspirador, elimina eficazmente os impactos associados à fase de produção, redirecionando o ponto crítico do perfil ambiental para as fases de uso e fim de vida. Consequentemente, a extração e produção mantêm-se como dominantes em apenas duas categorias: ecotoxicidade terrestre e escassez de recursos minerais. Esta persistência de impactos na ecotoxicidade está frequentemente associada a emissões de metais pesados e substâncias tóxicas libertadas durante processos de mineração e refinação de metais (Huijbregts et al., 2017), enquanto a escassez de recursos reflete a dependência de materiais críticos como o cobre, cuja extração é intensiva (Nuss & Eckelman, 2014). Na categoria de toxicidade humana carcinogénica, os impactos da fase de produção e utilização revelaram-se equiparáveis, um fenómeno que pode estar associado a emissões carcinogénicas comuns a ambas as fases, como compostos orgânicos voláteis (Fantke et al., 2022).

Um padrão particularmente relevante emergiu na eutrofização marinha, onde a fase de fim de vida apresentou um impacto elevado, equiparável ao da utilização nos cenários lineares. Este resultado salienta que o descarte em aterro, uma prática comum, gera lixiviados ricos em nutrientes (azoto e fósforo) que contribuem para a eutrofização de ecossistemas aquáticos (Crenna et al., 2021). A reparação mitiga este impacto ao evitar não apenas a produção, mas também o descarte prematuro.

Os impactos da fase de produção estão maioritariamente associados a polímeros de engenharia cuja produção é energeticamente intensiva e dependente de recursos fósseis, refletindo-se em categorias como aquecimento global e formação de ozono (Crenna et al., 2021). O contributo significativo dos processos de moldagem por injeção corrobora conclusões anteriores de que a transformação de materiais consome quantidades substantivas de energia (Thiriez & Gutowski, 2006).

Em categorias de toxicidade, observou-se uma maior diversidade de contributos, incluindo borrachas sintéticas e metais como o cobre. Estes materiais, embora menos representativos em massa, geram impactos desproporcionais devido à toxicidade das suas emissões (Huijbregts et al., 2017). O cobre destacou-se ainda na escassez de recursos minerais, confirmando a sua classificação como material crítico (Nuss & Eckelman, 2014).

A embalagem contribuiu principalmente através do cartão e do consumo elétrico na sua produção, um resultado alinhado com a literatura que identifica estes como os fluxos tipicamente mais impactantes em embalagens (Crenna et al., 2021). O filme em polietileno de baixa densidade registou um contributo relevante para a escassez de recursos fósseis, dada a sua origem petroquímica.

No fim de vida, a deposição de plástico em aterro dominou a maioria das categorias, um resultado expectável dado a sua massa e persistência no ambiente (Doka, 2009). O tratamento do aço revelou impactos relevantes em categorias influenciadas pela energia intensiva da sua reciclagem/descarte (Allwood et al., 2011).

Os resultados confirmam que a eficiência energética na utilização e a extensão da vida útil são os fatores mais críticos para reduzir o impacto ambiental do aspirador, sendo a intervenção do EcoPorto particularmente eficaz em evitar os impactos incorporados na produção nova e no descarte prematuro.

A análise comparativa dos quatro cenários considerados permite retirar conclusões claras acerca do desempenho ambiental associado à vida útil dos aspiradores e, em particular, do papel decisivo desempenhado pela reparação realizada no EcoPorto, como ilustrado na Figura 19.

O pior cenário, como esperado, é o cenário 1a, correspondente a uma avaria aos dois anos sem intervenção do EcoPorto. Este cenário é assumido como referência de 100% de impacto em todas as categorias ambientais, traduzindo a maior pressão em termos de emissões, consumo de recursos e produção de resíduos. Seguidamente, observa-se que os cenários de substituição a quatro anos (cenário 2a), a seis anos (cenário 3a) e a 8 anos (cenário 4a) apresentam impactos progressivamente inferiores. Assim, verifica-se uma tendência linearmente decrescente, quanto maior a vida útil inicial do equipamento, menor o impacto global, o que corrobora a expectativa de que a durabilidade constitui um fator central na redução do impacto ambiental.

Nos cenários de substituição a quatro e seis anos, o EcoPorto volta a demonstrar um papel decisivo, embora a magnitude das reduções seja ligeiramente inferior, dado que a pressão ambiental inicial é menos severa. Ainda assim, é notória a consistência da tendência, em todas as categorias de impacto, os subcenários com EcoPorto apresentam resultados melhores do que as respetivas alternativas sem reparação.

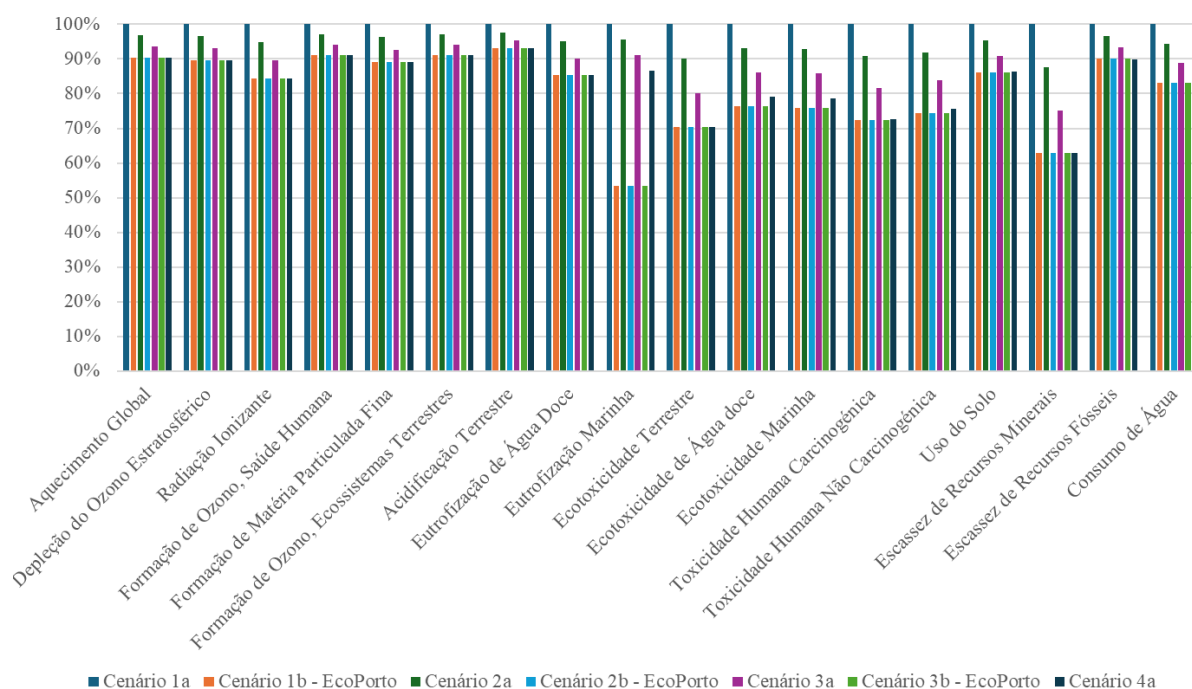


Figura 19. Representação dos impactos dos cenários de substituição (1a, 2a, 3a) e reparação (1b, 2b, 3b) após avaria aos 2, 4 e 6 anos, e do cenário de referência sem avaria após 8 anos (4a), nas 18 categorias de ACV. Para cada categoria, o cenário de maior impacto representa 100%, sendo os outros expressos em percentagem relativa.

No cenário mais penalizador, correspondente a uma avaria precoce aos dois anos, a existência do EcoPorto proporciona uma redução do impacto em todas as categorias analisadas. As menores reduções, ainda que significativas, observam-se nas categorias de acidificação terrestre (7%), formação de ozono, saúde humana (9%), e formação de ozono, ecossistemas terrestres (9%).

A eficácia da reparação torna-se progressivamente mais expressiva em categorias como aquecimento global (10%), escassez de recursos fósseis (10%), depleção do ozono estratosférico (11%), Formação de matéria particulada fina (11%), uso do solo (14%), eutrofização de água doce (15%), radiação ionizante (16%) e consumo de água (17%). Os ganhos ambientais mais substantivos da estratégia de reparação são evidentes nas categorias relacionadas com toxicidade e recursos, nomeadamente na ecotoxicidade de água doce (24%), ecotoxicidade marinha (24%), toxicidade humana não-carcinogénica (26%), toxicidade humana carcinogénica (28%), ecotoxicidade terrestre (30%), escassez de recursos minerais (37%) e, de forma mais destacada, na eutrofização marinha (47%).

Este resultado decorre do facto de a reparação evitar não apenas a deposição prematura do equipamento em aterro, mas, sobretudo, a extração e transformação de matérias-primas virgens necessárias para a produção de um novo equipamento, mitigando assim impactos ambientais ao longo de toda a cadeia de valor.

Quando se analisam os cenários em conjunto, destaca-se o seguinte fio condutor, quanto mais precoce é a avaria, maior a diferença entre reparar e substituir. Ou seja, o valor acrescentado do EcoPorto é maximizado quando o equipamento falha cedo, já que a reparação evita uma substituição completa e todos os impactos a ela associados. No extremo oposto, o cenário de referência linear, em que o aspirador é utilizado durante os oito anos sem reparação, apresenta naturalmente valores inferiores face aos cenários de falha precoce, mas já não beneficia da intervenção do EcoPorto, dado que o produto cumpre todo o ciclo de análise sem necessidade de substituição.

Em termos comparativos finais, para os dois anos, sem EcoPorto e com EcoPorto observa-se uma redução de cerca de 7% a 47%, dependendo da categoria, sendo mais expressiva na eutrofização marinha. Este resultado não só é expectável, como está alinhado com os mecanismos de impacto subjacentes aos processos evitados pela reparação, e pode ser explicado pela conjugação de dois fatores principais.: Em primeiro lugar, a reparação evita a necessidade de produzir um novo equipamento, atuando a montante. A manufatura de polímeros virgens (ABS, PP, PC) e, sobretudo, a mineração e refinação de metais presentes nos componentes eletrónicos são processos intensivos em água e energia, nos quais se podem gerar efluentes ricos em azoto (N) e fósforo (P). Estes nutrientes, quando libertados em meios hídricos, impulsionam a eutrofização, promovendo proliferação de algas, depleção de oxigénio e desequilíbrios ecológicos.

Em segundo lugar, a reparação previne o fim de vida em aterro, atuando a jusante. O depósito de resíduos plásticos e eletrónicos origina lixiviados com elevada carga poluente, incluindo matéria orgânica e compostos de azoto, que podem infiltrar-se no solo e atingir recursos hídricos, agravando a eutrofização.

Para os quatro anos, a diferença situa-se em valores médios entre 5% e 42%, refletindo ganhos consistentes, mas menos extremos do que no cenário de avaria precoce.

Para os seis anos, a redução ronda entre 2% e 38%, mantendo-se o padrão de menor impacto associado à reparação. Já para os oito anos, no cenário linear sem EcoPorto, o impacto é naturalmente mais baixo do que os cenários de substituição, mas já não existe possibilidade de redução adicional. No entanto, comparando o cenário 1a com o 4a, observa-se uma redução de cerca de 7% a 37%.

De modo a sintetizar a vantagem ambiental da reparação em função do momento da avaria, a Tabela 9 apresenta a gama de redução percentual de impacto obtida nos cenários com intervenção do EcoPorto, quando comparados com os respetivos cenários de substituição.

Tabela 9. Síntese comparativa da redução percentual do impacto ambiental da reparação face à substituição, para diferentes momentos de avaria.

Cenário (Momento da Avaria)	Variação na Redução de Impacte	Observações Contextuais
2 Anos (Vida Útil Curta)	7% a 47%	Redução mais expressiva. A reparação evita a produção de um novo produto muito cedo, maximizando os benefícios.
4 Anos (Vida Útil Média)	5% a 42%	Ganhos consistentes, mas menos extremos que na avaria precoce, uma vez que o produto original já foi usado por mais tempo.
6 Anos (Vida Útil Longa)	2% a 38%	Redução mantém-se vantajosa, mas menos pronunciada, dado o curto período de uso adicional do produto reparado.
Comparação Linear (Cenário 1a vs. 4a)	7% a 37%	Ilustra o impacto negativo da substituição precoce (Cenário 1a) face ao ciclo de vida (Cenário 4a), sem avaria.

Assim, conclui-se que a redução de impactos proporcionada pela existência do EcoPorto varia entre 2% e 47%, dependendo do momento da avaria e da categoria ambiental em análise. O ganho máximo é obtido quando o aspirador falha prematuramente, aos dois anos, e a reparação substitui a aquisição de um novo equipamento, enquanto o ganho mínimo ocorre quando a avaria se dá em fases tardias, (aos 4 e 6 anos), aproximando-se do cenário linear de oito anos, onde já não se verifica reparação. Os resultados confirmam que a reparação é sempre benéfica, sendo a magnitude da vantagem inversamente proporcional à duração da vida útil do produto original.

Análise de Sensibilidade

Para avaliar a resiliência do modelo de economia circular do EcoPorto face a um parâmetro logístico, foi realizada uma análise de sensibilidade focada no impacto associado ao transporte. Esta análise tem como objetivo responder a uma questão fundamental: até que distância é ambientalmente vantajoso para um consumidor enviar um equipamento avariado para o EcoPorto para reparação, em comparação com a aquisição de um novo produto numa loja local.

Para quantificar este limiar, o cenário 3b (avaria aos 6 anos, com intervenção do EcoPorto) foi selecionado como caso de estudo, por representar um ponto onde os benefícios da reparação, embora presentes, são menos pronunciados do que numa avaria precoce (aos 2 ou 4 anos). Partindo da distância base utilizada no estudo principal, a distância de transporte de ida e volta (do consumidor para o EcoPorto e de volta para o consumidor) foi progressivamente aumentada. O valor máximo considerado para esta simulação foi de 1100 km (aproximadamente a distância de ida e volta do ponto mais a sul de Portugal Continental, Faro, até ao EcoPorto, no Porto), assegurando que a análise se mantém dentro de um contexto logisticamente plausível. Importa salientar que este cenário de 1100 km constitui um limite extremo, utilizado exclusivamente para fins de análise de sensibilidade. A sua consideração não pressupõe a existência atual de um serviço formal de aceitação de REEE de fora do município pelo EcoPorto, mas visa testar a solidez da conclusão sobre a vantagem ambiental da reparação mesmo perante custos logísticos significativamente ampliados.

Os resultados desta simulação demonstram a notável resiliência ambiental do modelo de reparação. Verificou-se que, mesmo no cenário de reparação menos vantajoso (avaria aos 6 anos) e com uma distância de transporte total de 1100 km, a opção de reparação no EcoPorto mantém-se vantajosa em todas as categorias de impacto ambiental quando comparada com a compra de um novo aspirador.

A explicação para esta conclusão reside na elevada intensidade de impactos ambientais inerentes à na produção de um novo equipamento e recetiva utilização. Os impactos associados às restantes fases são de tal magnitude que o impacto adicional do transporte de longa distância (associado à reparação) se revela marginal em comparação. Em termos simples, os impactos evitados ao não se produzir um novo aspirador são tão significativos que compensam amplamente os impactos incrementais de um transporte mais longo.

4.2 ANÁLISE INTEGRADA DOS INDICADORES DE DESEMPENHO: REPARABILIDADE E CIRCULARIDADE EM ASPIRADORES E MICRO-ONDAS

Os resultados obtidos revelam padrões distintos de desempenho entre as duas categorias de equipamentos analisadas, nomeadamente aspiradores e micro-ondas, refletindo diferenças significativas na sua conceção técnica, complexidade construtiva e potencial de valorização no âmbito da economia circular.

Mais precisamente, a seleção destas duas tipologias de equipamentos fundamenta-se na sua relevância operacional para o projeto EcoPorto, uma vez que se destacam entre os equipamentos mais frequentemente reparados no âmbito das suas intervenções. Esta opção metodológica permite contrastar duas realidades tecnológicas distintas, por um lado, os aspiradores, que apresentam uma complexidade técnica média, e por outro, os micro-ondas, que exibem uma complexidade técnica significativamente superior, devido à sua composição com componentes eletrónicos especializados e sistemas de controlo avançados, permitindo uma análise comparativa entre produtos com perfis tecnológicos e desafios de reparação distintos.

Relativamente aos aspiradores, os dados demonstram um Índice de Reparabilidade de 73%, correspondente a 56 equipamentos reparados com sucesso, como ilustrado na Tabela A.2 do Apêndice, em 77 unidades analisadas.

A menção “não definido*” na coluna de problemas identificados indica casos em que a base de dados do projeto não continha informação suficiente para categorizar a avaria ou o motivo de descarte. Esta limitação, inerente a projetos de economia circular em contexto real, reforça a necessidade de uniformizar protocolos de registo para futuras análises. De forma semelhante, os valores apresentados na coluna do tempo despendido correspondem a aproximações fornecidas pelo técnico responsável, uma vez que não estavam registados na base de dados. Já os dados relativos ao peso dos resíduos e ao peso de componentes reaproveitados foram obtidos diretamente através das desmontagens no local realizadas no âmbito deste estudo.

O principal problema encontrado nos aspiradores analisados foi a sujidade acumulada, não apenas de forma geral, mas também de modo recorrente nos filtros. Além disso, foram identificados outros problemas, como: tubo de aspiração partido ou até mesmo, ausente e, ficha elétrica, cabo, bocal e carcaça danificados. Nesse contexto, os aspiradores conseguiram ser reparados, principalmente devido a uma boa limpeza efetuada e à substituição das peças danificadas.

Os problemas identificados nos aspiradores encaminhados para resíduos, incluíram bateria danificada, equipamento partido totalmente, falta de peças de reposição e motor queimado. No entanto, a análise revelou uma limitação significativa na documentação, uma vez que a maioria dos equipamentos foi considerada sem potencial de recuperação sem que os motivos concretos para o descarte estivessem devidamente registados. Esta lacuna evidencia uma baixa clareza na caracterização dos problemas, dificultando a avaliação detalhada das causas de falha e das oportunidades de prolongamento da vida útil dos equipamentos. Foram 14 equipamentos encaminhados como resíduos, correspondendo a 18,2%, Tabela A.3 do Apêndice.

Nos aspiradores analisados, os componentes reaproveitados apresentaram variações: em dois aspiradores foi possível reutilizar todos os componentes, exceto o motor, noutro foram reaproveitados apenas o tubo e o cabo e, num terceiro, apenas o cabo. Em três equipamentos adicionais, os componentes reaproveitáveis não foram definidos, devido à falta de registos detalhados e de uma base de dados rigorosa. Apesar destas limitações, o reaproveitamento dos componentes disponíveis representa um benefício significativo, permitindo que estas peças sirvam como substitutos em outros aspiradores necessitados de reparação, evitando assim o encaminhamento destes materiais para resíduo e contribuindo para a extensão da vida útil dos produtos. Neste estudo, a desmontagem seletiva permitiu reaproveitar 30 a 50% da massa total dos equipamentos.

A análise do Indicador de Circularidade para os aspiradores reaproveitados revela uma amplitude significativa entre 0,138 e 0,822, refletindo a variabilidade nas condições de receção e no potencial efetivo de reaproveitamento de cada unidade, Tabela A.4 do Apêndice. Os valores mais elevados, próximos de 0,822, estão associados a equipamentos em melhor estado de conservação e com maior modularidade construtiva, características típicas dos modelos convencionais, que se mostraram mais fáceis de reparar devido ao *design* modular e facilidade de acesso aos componentes. Por outro lado, os valores inferiores, 0,138, correspondem a equipamentos com danos estruturais mais severos, situação mais frequente em modelos compactos e inteligentes, que apresentaram uma taxa de irreparabilidade superior devido à elevada integração tecnológica e dificuldade de substituição de peças específicas.

No caso dos micro-ondas, observa-se um padrão distinto, com um Índice de Reparabilidade de 64%, ligeiramente inferior ao verificado nos aspiradores, correspondente a 29 equipamentos reparados em 45 unidades analisadas, Tabela A.5 do Apêndice.

Esta diferença pode ser atribuída à maior complexidade tecnológica inerente a estes equipamentos, particularmente no que concerne aos componentes eletrónicos e sistemas de controlo. Esta complexidade, associada à formação técnica insuficiente nas áreas de eletrónica e microcontroladores, limita a capacidade de intervenção dos técnicos, levando a que avarias complexas sejam frequentemente classificadas como irrecuperáveis. A escassez de documentação técnica detalhada e ferramentas de diagnóstico apropriadas agrava este cenário, dificultando a reparação eficaz e reduzindo as taxas de reaproveitamento. Para mitigar estas limitações, torna-se imperativo investir em formação técnica avançada e estabelecer protocolos de colaboração com fabricantes para acesso a guias e recursos técnicos especializados.

As falhas mais recorrentes detetadas, que fundamentam a taxa de reparabilidade, estavam associadas à incapacidade de aquecimento, como avarias em magnetrões, transformadores, fusíveis e condensadores, problemas no motor de rotação do prato, anomalias elétricas e degradação estrutural severa. As intervenções técnicas mais comuns consistiram na substituição de magnetrões, transformadores e motores de rotação do prato, demonstrando a viabilidade técnica da reparação, mas também justificando o tempo de reparação, que variou entre 20 e 180 minutos.

Os micro-ondas encaminhados para resíduo apresentavam problemas que impediam a sua reparação eficaz. Em dois aparelhos, o seletor de funções e o temporizador estavam avariados, o que compromete o controlo de operação e exigiria a substituição de componentes complexos, muitas vezes indisponíveis ou economicamente inviáveis de substituir. Em outros dois, o interior do equipamento estava completamente queimado, indicando falha grave no sistema elétrico ou curto-circuito interno, tornando a reparação técnica extremamente difícil e arriscada. Em dois aparelhos adicionais, o diagnóstico concluiu que não existia potencial de recuperação, seja por falta de componentes de reposição, danos estruturais ou degradação de múltiplos elementos críticos, justificando o encaminhamento para resíduo.

Apenas 6 unidades foram encaminhadas como resíduos, representando 13% do total, Tabela A.6 do Apêndice. Contudo, destaca-se um percentual significativo de unidades reaproveitadas para peças, 22%, correspondente a 10 equipamentos.

Neste estudo, a extração seletiva de componentes, como transformadores, magnetrões, motores, cabos permitiu recuperar, em média, 40 a 50% da massa total de cada equipamento desmantelado, com um tempo despendido entre 30 e 60 minutos. O Indicador de Circularidade para micro-ondas reaproveitados apresenta valores entre 0,172 e 0,561, Tabela A.7 do Apêndice, com uma distribuição mais concentrada dos valores médios, refletindo a natureza mais padronizada dos seus componentes e processos de fabrico.

A análise comparativa entre ambas as categorias revelam diferenças significativas no potencial de reparação e reaproveitamento. Os aspiradores apresentam um maior potencial de reparação completa (73% vs 64% dos micro-ondas), resultado da sua construção predominantemente mecânica, da modularidade dos componentes e da maior disponibilidade de peças de reposição.

Em contrapartida, os micro-ondas, apesar de apresentarem uma menor taxa de reparação completa, demonstram um maior potencial de reaproveitamento de componentes (22% vs 9% dos aspiradores), devido à diversidade de peças reutilizáveis que podem servir como sobressalentes em outros equipamentos. Esta distinção evidencia que, enquanto os aspiradores beneficiam sobretudo da reparação

para prolongar a vida útil, os micro-ondas oferecem oportunidades relevantes de circularidade através da extração e reutilização de componentes individuais.

4.3 ANÁLISE DO CONSUMO E TENDÊNCIAS DE AQUISIÇÃO DE EQUIPAMENTOS RECUPERADOS

A análise dos padrões de consumo e das tendências de aquisição de equipamentos recuperados no âmbito do projeto EcoPorto revela dinâmicas de mercado complexas e informativas sobre o comportamento dos consumidores face aos produtos em segunda vida. Os dados quantitativos obtidos, abrangendo um total de 313 equipamentos processados, permitem traçar um perfil detalhado das preferências e padrões de aceitação por parte dos utilizadores finais, Figura 20. Neste caso, foi possível considerar todos os REEE processados, uma vez que a base de dados do projeto continha informação completa sobre cada equipamento, permitindo realizar uma análise de tendências de consumo mais abrangente e realista, refletindo de forma fidedigna a aceitação do mercado por produtos em segunda vida.

Esta distribuição reflete não apenas os padrões de consumo da população, mas também a durabilidade intrínseca e potencial de reparação de cada tipologia de equipamento.

Nesse contexto, categorias com volumes reduzidos entre 1 a 2 unidades, como intercomunicadores de bebé ou alisadores de cabelo, demonstram a diversidade de artigos abrangidos pelo projeto, enriquecendo a análise sobre tendências de circularidade.

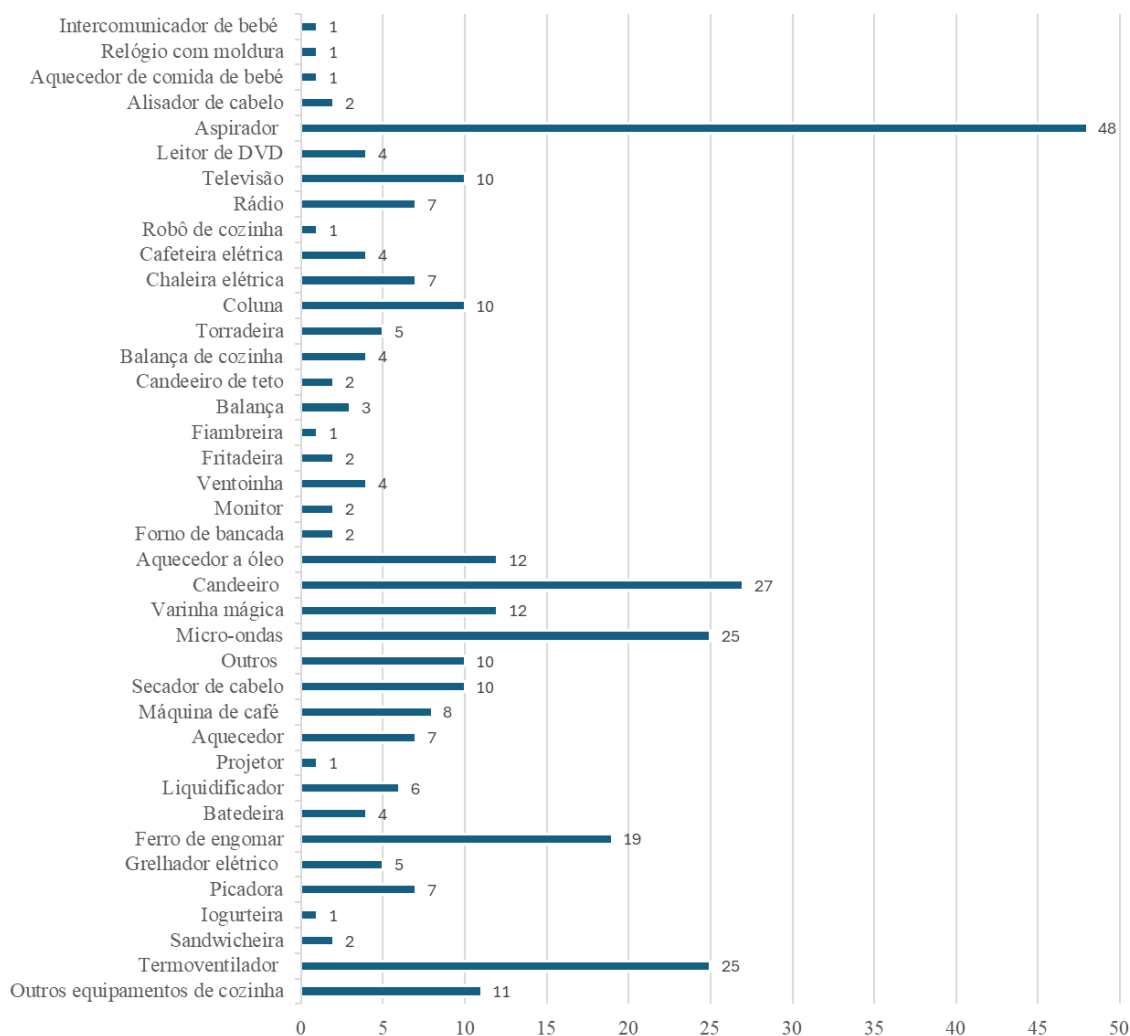


Figura 20. Distribuição das tipologias de equipamentos que chegam ao consumidor após recuperação no projeto EcoPorto (período de 24 de setembro de 2024 a 14 de abril de 2025).

A análise dos padrões de aquisição, que indica, numa primeira instância, uma clara predominância de aspiradores, candeeiros, micro-ondas e termoventiladores entre os equipamentos recuperados, necessita de uma interpretação crítica tendo em conta o volume total de equipamentos processados pelo EcoPorto. A quantidade de um equipamento disponibilizado para venda é, em primeira instância, um reflexo direto do que é encaminhado e reparado com sucesso, e não necessariamente um indicador puro da preferência do consumidor. Para isolar o fator "aceitação de mercado", é essencial contrastar a proporção de equipamentos reparados que são efetivamente adquiridos face ao universo total de equipamentos que entram no sistema.

A correta interpretação dos dados de aquisição requer uma compreensão prévia da composição do universo de equipamentos processados. Do total de 1466 artigos registados no EcoPorto, a sua distribuição por estado operacional é fundamental para contextualizar a análise: 519 equipamentos foram classificados como sem potencial de reparação e encaminhados como resíduo, 390 foram submetidos e concluíram com sucesso um processo de reparação, e 234 não necessitaram de qualquer intervenção para serem considerados aptos. Para além destes, 209 unidades foram destinadas exclusivamente para uso em sessões de capacitação, sendo de salientar que esta categoria é maioritariamente composta por computadores fixos e portáteis, o que explica, em parte, a discrepância entre o elevado volume de entrada destas tipologias (273 e 256 unidades, respetivamente) e a sua presença menos proeminente no mercado de segunda vida, como ilustrado na Tabela 10.

Tabela 10. Distribuição dos 1466 equipamentos processados no EcoPorto, por estado operacional final.

Estado	Quantidade
Sem potencial de reparação - resíduo	519
Reparado	390
Não necessitou de reparação	234
Para usar em sessões de capacitação	209
Aguarda reparação	56
Em espera para teste inicial	38
Apenas necessitou de limpeza	17
Aguarda peças	3
Total	1466

O fluxo operacional é ainda composto por equipamentos em fases intermédias, nomeadamente 56 que aguardam reparação, 38 que se encontram em espera para teste inicial, 17 que apenas necessitaram de limpeza, e 3 que aguardam a chegada de peças para intervenção.

A análise de aquisição refere-se a um subconjunto específico de 313 equipamentos que foram transacionados. Cruzando os dados de entrada, reparação e saída, é possível obter uma métrica mais fidedigna: a taxa de conversão de equipamentos reparados para equipamentos adquiridos por categoria.

Neste contexto, os aspiradores emergem novamente como uma categoria de destaque, mas por razões mais complexas e informativas. Dos 84 aspiradores que ingressaram no EcoPorto, 50 foram reparados (uma taxa de reparação de aproximadamente 60%). Desses 50 reparados, 48 foram doados, o que representa uma taxa de conversão de 96%. Esta análise representa não só uma elevada eficácia no processo de reparação desta categoria, mas, crucialmente, uma receptividade excecional por parte do mercado. A procura é, de facto, real e robusta, validando a sua posição de liderança aparente inicial.

Uma análise similar aplica-se aos micro-ondas e candeeiros. Para os candeeiros, com 35 unidades recebidas, 25 reparados (71% de taxa de reparação) e 27 doados (o que sugere que alguns dos que não necessitaram de reparação, foram também para a plataforma), apresentam uma taxa de conversão notável, reforçando o seu apelo no mercado de segunda vida.

Já os micro-ondas, dos 51 que ingressaram, 29 foram reparados (57% de taxa de reparação). As 29 unidades reparadas contrastam com as 25 unidades doadas, indicando uma taxa de conversão de cerca de 86%.

A análise para os termoventiladores revela uma dinâmica igualmente notável, embora com um volume absoluto de entrada menor (26 unidades). Deste total, 25 foram reparados com sucesso, o que corresponde a uma taxa de reparação excecional de 96%, tal como no caso dos aspiradores. Dos 25 termoventiladores reparados, todos foram doados, atingindo uma taxa de conversão de 100%. Este dado é extremamente significativo: apesar de ser uma categoria com um fluxo de entrada relativamente modesto, a sua quase total reparabilidade e a aquisição integral por parte dos consumidores indicam uma procura muito superior à oferta e uma forte confiança do mercado na qualidade dos produtos recuperados.

Adicionalmente, foi possível calcular e interpretar as taxas de distribuição por estado, o que permitiu aferir com rigor tanto a eficácia operacional do projeto como a receptividade do mercado. A taxa de sucesso, correspondente aos 259 equipamentos que atingiram o estado de "Terminado", é particularmente significativa, representando aproximadamente 83% do total, Figura 21. Este valor elevado constitui uma prova clara da existência de um mercado receptivo e interessado em produtos em segunda vida, validando o modelo de economia circular proposto.

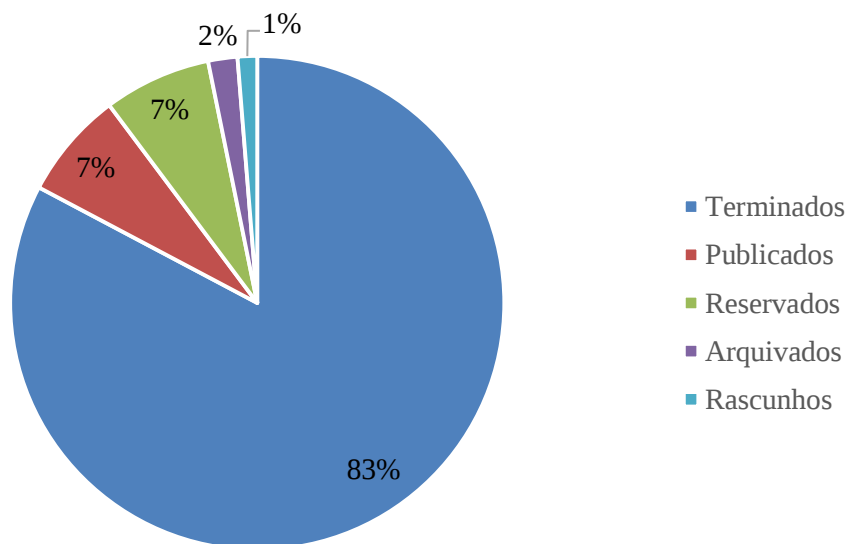


Figura 21. Distribuição por Estados de oferta dos Equipamentos.

Complementarmente aos equipamentos já concluídos, a análise revela um fluxo operacional dinâmico e em constante renovação. Os 22 equipamentos que se encontram no estado "Publicado", ou seja, visíveis no *website* e disponíveis para reserva imediata, representam 7% do total. Em paralelo, outros 22 equipamentos estão no estado "Reservado", refletindo a procura efetiva e o interesse concreto por parte dos utilizadores e também representam 7%, sendo que a oferta deixa de estar visível na plataforma informática.

Estes valores, em conjunto, demonstram que para além do sucesso já materializado, existe um fluxo ativo e contínuo de equipamentos a serem integrados no mercado e de uma procura consistente que sustenta todo o ecossistema.

A análise inclui ainda os equipamentos em estados que refletem a gestão interna e de controlo de qualidade. Cerca de 6 artigos, representando 2%, estão "Arquivados", correspondendo a situações de gestão excecional que requerem temporária indisponibilidade, enquanto aproximadamente 4 equipamentos, encontram-se em "Rascunho", aguardando validação técnica final antes da sua disponibilização ao público, representando cerca de 1%.

5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

5.1 CONCLUSÕES DO ESTUDO

Esta dissertação teve como objetivo principal avaliar o impacto ambiental, operacional e social da reparação de EEE no âmbito do projeto EcoPorto, promovido pela Porto Ambiente. Através de uma abordagem metodológica multidimensional, que integrou a Avaliação do Ciclo de Vida, o cálculo de indicadores de circularidade e reparabilidade e por fim a análise de padrões de consumo, foi possível quantificar os benefícios mensuráveis da extensão da vida útil de produtos, em particular aspiradores, e posicionar a reparação como uma estratégia central na transição para uma economia circular.

A análise de contribuição por fases do ciclo de vida demonstra, de forma clara, que a fase de utilização emerge como a etapa ambientalmente mais relevante, constituindo o ponto crítico na maioria das categorias de impacto avaliadas pelo método *ReCiPe*. Em particular, para os cenários 1b, 2b, 3b e 4a, a fase de utilização é dominante em 16 das 18 categorias, sendo as duas restantes atribuíveis à fase de extração de matérias-primas e produção. Um padrão similar verifica-se nos cenários 2a e 3a, onde a utilização domina 15 categorias, deixando três para a fase de extração e produção. Até mesmo no cenário 1a, que apresenta o menor contributo relativo da fase de utilização, esta ainda é preponderante em 13 categorias, com as cinco remanescentes a serem lideradas pela fase inicial do ciclo de vida.

A ACV comparativa realizada revelou que a intervenção do EcoPorto possibilita uma redução significativa dos impactos ambientais em todas as categorias analisadas, com destaque para diminuições particularmente expressivas em quatro categorias críticas. A redução percentual mais elevada foi observada na categoria de eutrofização marinha (47%), seguida pela categoria de escassez de recursos minerais (37%). Impactes substanciais foram igualmente mitigados nas categorias de ecotoxicidade terrestre (30%) e de toxicidade humana carcinogénica (28%). Do ponto de vista ambiental, verificou-se que a existência do EcoPorto permite reduzir consistentemente os impactos em diferentes categorias, alcançando reduções que podem atingir até 47% em cenários de avaria precoce, quando a reparação evita a produção de um novo equipamento. Embora os ganhos sejam menos expressivos em fases tardias de utilização, mantêm-se relevantes, confirmando que a reparação contribui de forma significativa para a diminuição dos impactos ambientais ao longo do ciclo de vida.

No plano técnico e operacional, a viabilidade da reparação foi comprovada através de indicadores de desempenho consistentes. A análise dos processos realizados pelo EcoPorto permitiu calcular um Índice de Reparabilidade de 73% para aspiradores e 65% para micro-ondas, valores que representam a eficácia das intervenções técnicas efetuadas. Verificou-se ainda que os aspiradores apresentaram maior reparabilidade devido à sua construção predominantemente mecânica, enquanto os micro-ondas, embora com menor taxa de reparação completa, revelaram elevado potencial de reaproveitamento de componentes valiosos, como magnetrons e transformadores.

O Índice de Circularidade variou significativamente consoante o tipo e estado de conservação dos equipamentos: para aspiradores, os valores situaram-se entre 0,138 e 0,822, enquanto para micro-ondas se registou uma variação entre 0,172 e 0,561. Estes resultados demonstram que mesmo os equipamentos considerados irrecuperáveis podem ter valor através do reaproveitamento de componentes, contribuindo decisivamente para um aproveitamento material mais eficiente.

Do ponto de vista social, os resultados confirmam a existência de uma procura consolidada por produtos reparados, validando o modelo de economia circular social implementado pelo EcoPorto. A análise aos 313 equipamentos processados revelou que 83% dos equipamentos reparados foram doados com sucesso e recebidos pela comunidade, demonstrando uma elevada aceitação e procura por produtos em segunda vida. As categorias com maior rotatividade foram os aspiradores (48 unidades), os candeeiros (27), os micro-ondas (25) e os termoventiladores (25), refletindo as necessidades práticas dos agregados familiares e a confiança no processo de reparação.

O projeto EcoPorto consolida-se, assim, como um caso de estudo paradigmático que demonstra a operacionalização de princípios de economia circular à escala municipal, contribuindo ativamente para a redução do desperdício e para a extensão do ciclo de vida dos produtos. Em síntese, configura-se como uma abordagem ambientalmente vantajosa, economicamente viável e socialmente inclusiva, posicionando a reparação como um pilar fundamental para a construção de comunidades mais resilientes e sustentáveis. A sua implementação bem-sucedida proporciona benefícios mensuráveis que se alinham de forma explícita com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável e com as ambições do Pacto Ecológico Europeu.

5.2 TRABALHOS FUTUROS

Apesar dos contributos relevantes desta investigação, identificaram-se várias limitações e oportunidades de aprofundamento, que podem servir como base para trabalhos futuros.

É essencial salientar, desde já, que os resultados obtidos e as conclusões apresentadas são diretamente aplicáveis ao contexto operacional específico do EcoPorto. O modelo de reparação aqui analisado caracteriza-se por ser maioritariamente manual, com consumos energéticos e de materiais comparativamente irrelevantes face aos impactos evitados pela não produção de um novo equipamento. Consequentemente, as expressivas reduções de impacto ambiental quantificadas não podem ser automaticamente generalizadas para outros contextos de reparação que impliquem processos mais intensivos em energia ou em materiais.

O presente trabalho focou-se em aspiradores e micro-ondas, categorias representativas, mas limitadas face à diversidade de EEE. Para além do conjunto de equipamentos já analisados, futuros estudos poderão alargar o âmbito da investigação a uma maior diversidade de tipologias, integrando equipamentos com diferentes composições materiais e perfis de impacto. Esse alargamento permitiria obter uma visão mais abrangente do potencial de circularidade do setor e apoiar a definição de prioridades de intervenção.

A recolha de dados primários foi realizada com base em registos internos e observação direta, mas seria vantajoso implementar protocolos de recolha mais harmonizados e automatizados, eventualmente recorrendo a sensores *Internet of Things* (IoT), dispositivos eletrónicos capazes de recolher dados do ambiente ou de sistemas físicos e transmitir essas informações através da internet para monitorização e análise em tempo real, para monitorizar os consumos energéticos na oficina ou efetuar pesagens automáticas de componentes, o que permitiria aumentar a precisão e a rastreabilidade dos dados de inventário.

A aplicação de métodos de análise de incerteza, como o método de Monte Carlo, constitui uma abordagem sólida para quantificar a variabilidade e a fiabilidade dos resultados obtidos na avaliação de impactes ambientais.

Este método baseia-se na realização de milhares de iterações, em que os valores dos parâmetros de entrada, tais como consumo energético, distâncias de transporte e eficiência de processos são aleatoriamente selecionados a partir de distribuições estatísticas previamente definidas. Através deste processo, é possível gerar uma distribuição de probabilidade para os impactes ambientais associados, permitindo não apenas uma estimativa mais rigorosa, mas também uma compreensão mais detalhada da variabilidade dos resultados (Lloyd & Ries, 2007; Groen et al., 2014).

A sua implementação futura permitiria avaliar a relevância estatística das diferenças entre cenários, permitindo determinar se as variações observadas nos impactes são efetivamente significativas ou se resultam apenas de variações aleatórias nos dados. Paralelamente, seria possível identificar os parâmetros de entrada que mais contribuem para a incerteza total dos resultados, direcionando assim os esforços de recolha de dados para os fatores mais críticos e otimizando tempo e recursos.

Além disso, esta abordagem facilitaria a comunicação dos resultados acompanhados de intervalos de confiança, os quais fornecem uma estimativa precisa do alcance provável do verdadeiro valor do impacto, reforçando a credibilidade das conclusões. A integração destes elementos analíticos avançados aumenta consideravelmente a fiabilidade da avaliação e permite uma tomada de decisão mais informada e fundamentada, sustentando estratégias de intervenção mais eficazes (Huijbregts et al., 2003).

Embora a presente dissertação tenha centrado a análise nos impactes ambientais, trabalhos futuros poderiam integrar também uma Análise de Ciclo de Vida Social e uma Análise de Custo do Ciclo de Vida (LCC). Esta abordagem multidimensional permitiria avaliar simultaneamente os benefícios sociais, como a criação de emprego e a promoção da inclusão social, e os benefícios económicos, incluindo a redução de custos associados à nova produção e a valorização de produtos reconicionados (Benoît Norris et al., 2020).

Os indicadores de reparabilidade e circularidade desenvolvidos no presente estudo constituem um fundamento sólido para a implementação de uma plataforma cognitiva de suporte à decisão, permitindo aos técnicos do EcoPorto otimizar a triagem e hierarquização de equipamentos mediante critérios de reparabilidade, valor económico e projeção de procura. A evolução desta infraestrutura poderá integrar sistemas de aprendizagem automática ou *machine learning*, fundamentados no histórico de intervenções e nos parâmetros quantificados. Esta sofisticação permitiria refinar continuamente os critérios de decisão, prever falhas, estimar custos de manutenção e antecipar necessidades de componentes.

Através da identificação automática de padrões e tendências nos dados, a plataforma transformaria a gestão de recursos, evoluindo de um modelo reativo, que apenas responde a problemas à medida que surgem para um sistema preditivo e adaptativo, capaz de tomar decisões informadas de forma proativa, aumentando a eficiência, a fiabilidade e a sustentabilidade do processo (Okorie et al., 2018; Wuest et al., 2016). É, no entanto, essencial abordar esta inovação de forma conservadora, assegurando que os impactes ambientais associados à automatização sejam integralmente contabilizados numa avaliação de ciclo de vida completa. Só assim se poderá garantir que os ganhos em precisão e eficiência operacional não são alcançados à custa de um aumento da pegada ambiental total (Berkhout & Hertin, 2004).

Finalmente, seria igualmente relevante realizar estudos de acompanhamento de longo prazo sobre o comportamento dos utilizadores de equipamentos reparados, avaliando a sua durabilidade real em segunda vida, padrões de utilização e taxas de avaria. Estes dados seriam essenciais para validar os pressupostos de vida útil adotados na ACV e para ajustar estratégias de *design* orientadas para a reparação, garantindo que a plataforma se mantenha alinhada com a realidade operacional e contribua efetivamente para a Economia Circular.

6 OBJETIVOS DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL

6.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DOS OBJETIVOS DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL (ODS)

Os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) constituem um apelo global à ação, adotado por todos os Estados-Membros das Nações Unidas em 2015, no âmbito da Agenda 2030. Esta estrutura universal é composta por 17 objetivos principais interligados, Figura 22, desdobrados em 169 metas específicas que pretendem abordar os desafios mais prementes da humanidade, promovendo um equilíbrio entre as dimensões económica, social e ambiental do desenvolvimento. Para monitorizar o progresso nesta ambiciosa agenda, foram estabelecidos 232 indicadores globais que permitem avaliar de forma objetiva e comparável os avanços alcançados (United Nations, 2015).



Figura 22. Os 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) (United Nations, 2015).

Neste contexto, o trabalho desenvolvido nesta dissertação, materializado no projeto EcoPorto, posiciona-se intencionalmente no cruzamento entre a inovação em engenharia e a concretização de metas específicas da Agenda 2030. O presente capítulo visa, assim, contextualizar a relevância dos ODS e, subsequentemente, detalhar de que forma a investigação e o desenvolvimento do EcoPorto contribuem de forma quantificável e mensurável para o seu cumprimento.

6.2 CONTRIBUIÇÃO DA DISSERTAÇÃO PARA OS OBJETIVOS DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL

O projeto EcoPorto encontra-se em sintonia com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável, contribuindo de forma direta para os ODS 8, 11, 12 e 13. Em particular, destaca-se o ODS 8, propõe-se a promover o crescimento económico inclusivo e sustentável, o emprego pleno e produtivo e o trabalho digno para todos, o ODS 11, que procura tornar as cidades e comunidades mais inclusivas, seguras, resilientes e sustentáveis, o ODS 12, que defende a adoção de padrões de consumo e de produção mais responsáveis e o ODS 13, que apela à implementação de medidas urgentes para combater as alterações climáticas e os seus impactes. Neste enquadramento, a presente dissertação analisa de que forma os resultados obtidos contribuem para o avanço destes objetivos, reforçando a relevância da reparação e da Economia Circular como instrumentos fundamentais para a transição sustentável.

A avaliação da contribuição deste trabalho para os ODS foi estruturada em quatro dimensões principais, organizadas de forma a garantir clareza e objetividade. Na Tabela 11, em primeiro lugar, identificou-se o número e o nome de cada ODS considerado relevante para o âmbito da dissertação. De seguida, para cada um desses objetivos, indicou-se a meta específica tal como definida no documento de referência da Câmara Municipal do Porto. Na terceira dimensão, descreve-se o contributo direto da investigação para o cumprimento dessa meta, com base nos objetivos, métodos e resultados efetivamente desenvolvidos e documentados no presente trabalho. Por fim, apresenta-se uma quarta dimensão que enumera os indicadores de desempenho e as métricas mensuráveis ou observáveis, todos eles diretamente associados às análises realizadas, aos procedimentos metodológicos aplicados e às interpretações resultantes, tal como detalhados ao longo da dissertação.

Tabela 11. Contribuição da Dissertação para os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável.

ODS	Meta	Contributos da Dissertação	Indicadores de Desempenho e Métricas
8	8.2	O estudo demonstra que o modelo de negócio circular do EcoPorto, com foco na reparação e reutilização, gera valor económico local e promove emprego em atividades de mão-de-obra intensiva e qualificada. A formação técnica proporcionada pelo projeto capacita os participantes, promovendo competências práticas alinhadas com uma economia verde e circular (Porto Ambiente, 2024).	• Criação de postos de trabalho diretos e indiretos no setor da reparação. • Índice de Reparabilidade (72,7% para aspiradores e 64,4% para micro-ondas) como indicador de eficiência e produtividade técnica.
11	11.6	A investigação quantifica os benefícios ambientais da reparação, resultando em reduções significativas de impactes ambientais. O EcoPorto atua diretamente na minimização de REEE promovendo um modelo de gestão que valoriza os resíduos como recursos e os reintegra na economia local, contribuindo para uma cidade mais circular e menos poluente.	• Toneladas de REEE desviadas de aterro através da reparação. • Percentagem de redução de impactes ambientais calculada pela ACV (varia entre 2,3% e 46,5%). • Taxa de reutilização efetiva (82,8% dos equipamentos reparados foram doados e reutilizados).
12	12.5	Através da ACV, salienta-se que a reparação é uma estratégia ambientalmente superior à substituição, prevenindo a produção de resíduos e a extração de novos recursos. Fornece uma métrica quantificável para a eficiência material e a circularidade dos produtos.	• O cálculo dos Índices de Circularidade (0,138-0,822 para aspiradores e 0,172-0,561 para micro-ondas) • Quantificação dos impactes ambientais para cada categoria evitados através da metodologia de ACV. • Demonstração da viabilidade técnica de modelos de consumo baseados na reutilização.
13	13.3	O estudo fornece dados concretos para a sensibilização sobre o impacto climático das escolhas de consumo. O projeto EcoPorto serve como um centro de literacia ambiental.	• Quantificação dos impactes ambientais para cada categoria evitados através da metodologia de ACV. • Atividades de formação e workshops realizados no âmbito do projeto.

REFERÊNCIAS

- AERESS. (2023). *Balance AERESS 2023: año en cifras*. Asociación Española de Recuperadores de Economía Social y Solidaria. <https://aeress.org/wp-content/uploads/Balance-AERESS-23-Web-Ano-en-cifras.pdf>
- AERESS. (2023). *Calculadora de Impacte Social*. Asociación Española de Recuperadores de Economía Social y solidaria. Obtido em maio de 2025, de <https://aeress.org/calculadora/calculadorasocial>
- AERESS. (2023). *Calculadora Reutiliza y Evita CO₂*. Asociación Española de Recuperadores de Economía Social y Solidaria. Obtido em maio de 2025, de <https://aeress.org/calculadora/reutilizayevitaco2>
- Arun, C. R., Pani, A. K., & Kumar, P. (2024). *Blockchain-enabled Smart Contracts and the Internet of Things: Advancing the research agenda through a narrative review*. *Multimedia Tools and Applications*.
- Bakker, C., Wang, F., Huisman, J., & den Hollander, M. (2014). *Products that go round: Exploring product life extension through design*. *Journal of Cleaner Production*, *69*, 10–16. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.01.028>
- Baldé, C. P., Forti, V., Gray, V., Kuehr, R., & Stegmann, P. (2020). *The Global E-waste Monitor 2020: Quantities, flows and the circular economy potential*. United Nations University (UNU)/United Nations Institute for Training and Research (UNITAR) – co-hosted SCYCLE Programme, International Telecommunication Union (ITU) & International Solid Waste Association (ISWA).
- BCSD Portugal. (2021). *Indicadores de Transição Circular V2.0*. BCSD Portugal.
- Benoît Norris, C., Traverso, M., Neugebauer, S., Ekener, E., Schaubroeck, S., Russo Garrido, S., Berger, M., Valdivia, S., Lehmann, A., Finkbeiner, M., & Arcese, G. (2020). *Guidelines for Social Life Cycle Assessment of Products and Organizations 2020*. United Nations Environment Programme (UNEP).
- Berkhout, F., & Hertin, J. (2004). *De-materialising and re-materialising: Digital technologies and the environment*. *Futures*, *36*(8), 903–920. <https://doi.org/10.1016/j.futures.2004.01.003>
- Bocken, N. M. P., de Pauw, I., Bakker, C., & van der Grinten, B. (2016). *Product design and business model strategies for a circular economy*. *Journal of industrial and Production Engineering*, *33*(5), 308–320. <https://doi.org/10.1080/21681015.2016.1172124>
- Boldoczki, S., Thorenz, A., & Tuma, A. (2021). *The environmental impacts of preparation for reuse: A case study of WEEE reuse in Germany*. *Journal of Cleaner Production*, 279, 119736. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119736>
- Bovea, M. D., Ibáñez-Forés, V., Pérez-Belis, V., & Quemades-Beltrán, P. (2020). *Repair vs. replacement: Selection of the best end-of-life scenario for small household electric and electronic equipment based on life cycle assessment*. *Journal of Environmental Management*, *254*, 109679. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109679>
- Câmara Municipal do Porto. (2017). *Ambiente*. Consultado em maio de 2025, em <https://ambiente.cm-porto.pt/ambiente/ambiente>
- Circle Economy. (2023). *The Circularity Gap Report 2023*.
- Crenna, E., Secchi, M., Benini, L., & Sala, S. (2021). *Global environmental impacts: Data sources and methodological choices for life cycle assessment*. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, *26*(9), 1687–1702.

Doka, G. (2003). *Life Cycle Inventories of Waste Treatment Services*. Ecoinvent report no. 13. Swiss Centre for Life Cycle Inventories.

Ellen MacArthur Foundation. (2015). *Towards a circular economy: Business rationale for an accelerated transition*.

European Commission. (2018). **Directive (EU) 2018/851 of the European Parliament and of the Council of 30 May 2018 amending Directive 2008/98/EC on waste**. Official Journal of the European Union, L 150/109. Obtido de: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32018L0851>

European Commission. (2020). *A new Circular Economy Action Plan: For a cleaner and more competitive Europe*. Obtido de: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=COM:2020:98:FIN>

European Commission. (atualizado a 29 de agosto de 2024). *Diretiva-Quadro dos Resíduos*. Direção-Geral do Ambiente. Recuperado de https://environment.ec.europa.eu/topics/waste-and-recycling/waste-framework-directive_en

European Commission. (2025). **Report on the review of the Directive 2012/19/EU on waste electrical and electronic equipment (WEEE) - Evaluation and future outlook**. Directorate-General for Environment.

European Environment Agency. (2017). *Circular by design: Products in the circular economy (EEA Report No 6/2017)*. <https://www.eea.europa.eu/publications/circular-by-design>

European Parliament and Council. (2012). **Directive 2012/19/EU of the European Parliament and of the Council of 4 July 2012 on waste electrical and electronic equipment (WEEE)**. Official Journal of the European Union, L 197/38. Obtido de: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32012L0019>

Eurostat. (2024). *Statistics on waste electrical and electronic equipment (WEEE)*. Statistics Explained. Obtido em maio de 2025, de https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Waste_statistics_-_electrical_and_electronic_equipment

Forti, V., Baldé, C. P., & Kuehr, R. (2024). **The Global E-waste Monitor 2024: Electronic waste generation, collection and recycling, 2010 to 2022 – a summary for decision makers**. United Nations Institute for Training and Research (UNITAR), International Telecommunication Union (ITU), & International Solid Waste Association (ISWA).

Geissdoerfer, M., Savaget, P., Bocken, N. M. P., & Hultink, E. J. (2017). *The Circular Economy – A new sustainability paradigm? Journal of Cleaner Production*, *143*, 757–768. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.048>

Gallego Schmid, A., Mendoza, J. M. F., Jeswani, H. K., & Azapagic, A. (2016). *Life cycle environmental impacts of vacuum cleaners and the effects of European regulation. Science of the Total Environment*, *559*, 192–203. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.03.149>

Groen, E. A., Heijungs, R., Bokkers, E. A. M., & de Boer, I. J. M. (2014). *Methods for uncertainty propagation in life cycle assessment. Environmental Modelling & Software*, *62*, 316–325. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.10.006>

- Haas, W., Krausmann, F., Wiedenhofer, D., & Heinz, M. (2015). How circular is the global economy?: An assessment of material flows, waste production, and recycling in the European Union and the world in 2005. *Journal of Industrial Ecology*, *19*(5), 765–777.
- Hazen, B. T., Mollenkopf, D. A., & Wang, Y. (2016). Remanufacturing for the circular economy: An examination of consumer switching behavior. *Business Strategy and the Environment*, *26*(4), 451–464. <https://doi.org/10.1002/bse.1929>
- Huijbregts, M. A. J., Gilijamse, W., Ragas, A. M. J., & Reijnders, L. (2003). Evaluating uncertainty in environmental life-cycle assessment. A case study comparing two insulation options for a Dutch one-family dwelling. *Environmental Science & Technology*, *37*(11), 2600–2608. <https://doi.org/10.1021/es020971+>
- Huijbregts, M. A. J., Steinmann, Z. J. N., Elshout, P. M. F., Stam, G., Verones, F., Vieira, M., Zijp, M., Hollander, A., & van Zelm, R. (2017). ReCiPe2016: a harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, *22*(2), 138–147.
- International Organization for Standardization. (2006). *ISO 14040:2006 Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework*.
- International Organization for Standardization. (2006). *ISO 14044:2006 Environmental management — Life cycle assessment — Requirements and guidelines*.
- Kiddee, P., Naidu, R., & Wong, M. H. (2013). Electronic waste management approaches: An overview. *Waste Management*, *33*(5), 1237–1250. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2013.01.006>
- Kirchherr, J., Reike, D., & Hekkert, M. (2017). Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. Resources, Conservation and Recycling, *127*, 221–232. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.09.005>
- Kouhizadeh, M., Saberi, S., & Sarkis, J. (2021). Blockchain technology and the sustainable supply chain: Theoretically exploring adoption barriers. *International Journal of Production Economics*, *231*, 107831. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925527320302012>
- Lloyd, S. M., & Ries, R. (2008). Characterizing, propagating, and analyzing uncertainty in life-cycle assessment: A survey of quantitative approaches. *Journal of Industrial Ecology*, *11*(1), 161–179.
- Lundgren, K. (2012). The global impact of e-waste: Addressing the challenge. International Labour Organization.
- Maitre-Ekern, E., Dalhammar, C., & Bugge, H. 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*, 125488. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125488>
- Mugge, R., Jockin, B., & Bocken, N. (2017). How to sell refurbished smartphones? An investigation of different customer groups and appropriate incentives. *Journal of Cleaner Production*, *147*, 284–296. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.01.111>
- Nuss, P., & Eckelman, M. J. (2014). Life cycle assessment of metals: A scientific synthesis. *PLoS ONE*, *9*(7), e101298.
- Okorie, O., Salonitis, K., Charnley, F., Moreno, M., Turner, C., & Tiwari, A. (2018). Digitisation and the circular economy: A review of current research and future trends. *Energies*, *11*(11), 3009. <https://doi.org/10.3390/en11113009>

- Palmarini, R., Erkoyuncu, J. A., Roy, R., & Torabmostaedi, H. (2018). A systematic review of augmented reality applications in maintenance. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, *49*, 215–228.
- Peña, C., Civit, B., Gallego-Schmid, A., Druckman, A., Pires, A. C., Weidema, B., Mieras, E., Wang, F., Fava, J., Canals, L. M. I., Cordella, M., Arbuckle, P., Valdivia, S., Fallaha, S., & Motta, W. (2021). Using life cycle assessment to achieve a circular economy. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, *26*(2), 215–220.
- Pérez-Belis, V., Bovea, M. D., & Ibáñez-Forés, V. (2017). Environmental performance of alternative end-of-life scenarios for electrical and electronic equipment: A case study for vacuum cleaners. *Journal of Cleaner Production*, *142*, 2996–3006. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.05.032>
- Porto Ambiente. (2024). *EcoPorto*. Consultado em maio de 2025, em <https://ecoporto.portoambiente.pt/>
- Robinson, B. H. (2009). E-waste: An assessment of global production and environmental impacts. *Science of The Total Environment*, *408*(2), 183–191. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2009.09.044>
- RREUSE. (2022). Social Enterprises in the Circular Economy: Job Creation and Social Inclusion. RREUSE.
- Stahel, W. R. (2016). The circular economy. *Nature*, *531*(7595), 435–438. <https://doi.org/10.1038/531435a>
- Thiriez, A., & Gutowski, T. (2006). An environmental analysis of injection molding. In *IEEE International Symposium on Electronics and the Environment* (pp. 195–200).
- Tukker, A. (2015). Product services for a resource-efficient and circular economy – a review. *Journal of Cleaner Production*, *97*, 76–91. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.11.049>
- United Nations. (2015). The 17 Sustainable Development Goals. <https://sdgs.un.org/goals>
- United Nations Environment Programme (UNEP). (2019). Global Chemicals Outlook II: From Legacies to Innovative Solutions.
- Wernet, G., Bauer, C., Steubing, B., Reinhard, J., Moreno-Ruiz, E., & Weidema, B. (2016). The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, *21*(9), 1218–1230.
- Widmer, R., Oswald-Krapf, H., Sinha-Khetriwal, D., Schnellmann, M., & Böni, H. (2005). Global perspectives on e-waste. *Environmental Impact Assessment Review*, *25*(5), 436–458. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2005.04.001>
- Wuest, T., Weimer, D., Irgens, C., & Thoben, K. D. (2016). Machine learning in manufacturing: advantages, challenges, and applications. *Production & Manufacturing Research*, *4*(1), 23–45. <https://doi.org/10.1080/21693277.2016.1192517>

APÊNDICE

A.1. Inventário do ciclo de vida (ICV) de um aspirador e respetiva justificação para a seleção de cada processo da *Ecoinvent*.

Tabela A. 1. Inventário do ciclo de vida (ICV) de um aspirador.

Fase	Componente	Processo (Ecoinvent)	Justificação para a Seleção do Processo
Extração e Produção	Botão de ligar - Acrilonitrilo Butadieno Estireno	Acrylonitrile-butadiene-styrene copolymer {RER} production Cut-off, S Injection moulding {RER} processing Cut-off, S	Material constituinte do botão de ligar. Assume-se produção na Europa dada a localização do projeto (Portugal). Processo padrão para moldar peças de plástico. Assume-se produção na Europa dada a localização do projeto (Portugal).
Extração e Produção	Tampa superior - Acrilonitrilo Butadieno Estireno	Acrylonitrile-butadiene-styrene copolymer {RER} production Cut-off, S Injection moulding {RER} processing Cut-off, S	Material constituinte da tampa superior. Assume-se produção na Europa dada a localização do projeto (Portugal). Processo padrão para moldar peças de plástico. Assume-se produção na Europa dada a localização do projeto (Portugal).
Extração e Produção	Pega - Acrilonitrilo Butadieno Estireno	Acrylonitrile-butadiene-styrene copolymer {RER} production Cut-off, S Injection moulding {RER} processing Cut-off, S	Material constituinte da pega. Assume-se produção na Europa dada a localização do projeto (Portugal). Processo padrão para moldar peças de plástico. Assume-se produção na Europa dada a localização do projeto (Portugal).
Extração e Produção	Mangueira - Acrilonitrilo Butadieno Estireno	Acrylonitrile-butadiene-styrene copolymer {RER} production Cut-off, S Extrusion, plastic pipes {RER} extrusion, plastic pipes Cut-off, S	Material constituinte da mangueira. Assume-se produção na Europa dada a localização do projeto (Portugal). Processo específico para fabrico de tubos e mangueiras. Assume-se produção na Europa dada a localização do projeto (Portugal).
Extração e Produção	Depósito - Nylon	Nylon 6-6 {RER} market for nylon 6-6 Cut-off, S Injection moulding {RER} processing Cut-off, S	O Nylon 6-6 é um tipo específico de Poliamida que é um material constituinte do depósito. Assume-se produção na Europa dada a localização do projeto (Portugal). Origem desconhecida pelo que se considerou transporte médio de mercado. Processo padrão para moldar peças de plástico. Assume-se produção na Europa dada a localização do projeto (Portugal).
Extração e Produção	Bocal de sucção - Polipropileno	Polypropylene, granulate {RER} production Cut-off, S Injection moulding {RER} processing Cut-off, S	Material constituinte do bocal de sucção. Assume-se produção na Europa dada a localização do projeto (Portugal). Processo padrão para moldar peças de plástico. Assume-se produção na Europa dada a localização do projeto (Portugal).
Extração e Produção	Rodas principais - Polipropileno	Polypropylene, granulate {RER} production Cut-off, S Injection moulding {RER} processing Cut-off, S	Material constituinte das rodas principais. Assume-se produção na Europa dada a localização do projeto (Portugal). Processo padrão para moldar peças de plástico. Assume-se produção na Europa dada a localização do projeto (Portugal).

Extração e Produção	Tampa inferior - Polipropileno	Polypropylene, granulate {RER} production Cut-off, S Injection moulding {RER} processing Cut-off, S	Material constituinte da tampa inferior. Assume-se produção na Europa dada a localização do projeto (Portugal). Processo padrão para moldar peças de plástico. Assume-se produção na Europa dada a localização do projeto (Portugal).
Extração e Produção	Tampa do motor - Polipropileno	Polypropylene, granulate {RER} production Cut-off, S Injection moulding {RER} processing Cut-off, S	Material constituinte da tampa do motor. Assume-se produção na Europa dada a localização do projeto (Portugal). Processo padrão para moldar peças de plástico. Assume-se produção na Europa dada a localização do projeto (Portugal).
Extração e Produção	Rodas pequenas - Borracha	Synthetic rubber {RER} production Cut-off, S Injection moulding {RER} processing Cut-off, S	Dado que não existe um processo específico para Elastómero Termoplástico na base de dados <i>Ecoinvent</i> que é um material constituinte das rodas pequenas, utilizou-se o processo para borracha sintética como substituto, por ser um material polimérico com propriedades elásticas semelhantes, permitindo uma aproximação válida para a modelação. Assume-se produção na Europa dada a localização do projeto (Portugal). Processo utilizado para moldar componentes de borracha. Assume-se produção na Europa dada a localização do projeto (Portugal).
Extração e Produção	Revestimento do cabo - Polimetilmetacrilato	Polymethyl methacrylate, beads {RER} production Cut-off, S Injection moulding {RER} processing Cut-off, S	Material constituinte do revestimento do cabo. Assume-se produção na Europa dada a localização do projeto (Portugal). Processo padrão para moldar peças de plástico. Assume-se produção na Europa dada a localização do projeto (Portugal).
Extração e Produção	Peça de suporte para cabo - Policarbonato	Polycarbonate {RER} production Cut-off, S Injection moulding {RER} processing Cut-off, S	Material constituinte da peça de suporte para cabo. Assume-se produção na Europa dada a localização do projeto (Portugal). Processo padrão para moldar peças de plástico. Assume-se produção na Europa dada a localização do projeto (Portugal).
Extração e Produção	Cabo – Cobre	Copper, cathode {GLO} market for Cut-off, S Copper removed by drilling, conventional {RER} drilling, conventional (no metal input) Cut-off, U	Material constituinte do cabo. Origem desconhecida (Global – Mundial). Considerou-se transporte médio de mercado. Não havia <i>dataset</i> específico para RER (Portugal). Processo adaptado. Representa a usinagem do cobre para formar o cabo. Assume-se que é feito no mesmo local, sem perdas adicionais de material, utilizando a mesma máquina que um processo equivalente para aço. Assume-se produção na Europa dada a localização do projeto (Portugal).

Extração e Produção	Motor - Aço	Steel, low-alloyed {RER} steel production, converter, low-alloyed Cut-off, S Casting, steel, lost-wax {GLO} market for Cut-off, S	Os componentes do motor são constituídos por um metal ferroso. Uma vez que a base de dados <i>Ecoinvent</i> não possui um processo genérico para "metal ferroso", utilizou-se o processo para aço (<i>steel</i>) como substituto, por ser o material ferroso mais comum e representativo nesta categoria de aplicações industriais, permitindo uma aproximação válida para a modelação. Assume-se produção na Europa dada a localização do projeto (Portugal). Processo de fundição para peças complexas. Origem desconhecida (Global – Mundial). Considerou-se transporte médio de mercado.
Extração e Produção	Parafusos - Aço	Steel, low-alloyed, hot rolled {RER} production Cut-off, S	Os componentes dos parafusos são constituídos por um metal ferroso. Uma vez que a base de dados <i>Ecoinvent</i> não possui um processo genérico para "metal ferroso", utilizou-se o processo para aço (<i>steel</i>) como substituto, por ser o material ferroso mais comum e representativo nesta categoria de aplicações industriais, permitindo uma aproximação válida para a modelação. Assume-se produção na Europa dada a localização do projeto (Portugal).
Extração e Produção	Placa eletrónica - Placa de Circuito Impresso	Printed wiring board, surface mounted, unspecified, Pb free {GLO} market for Cut-off, S	Material constituinte da placa eletrónica. termo <i>unspecified</i> para abranger variações tecnológicas comuns em dispositivos como aspiradores. Assumiu-se a versão sem chumbo (<i>Pb free</i>), por ser a mais comum e ambientalmente preferível. Origem desconhecida (Global – Mundial). Não havia <i>dataset</i> específico para RER (Portugal).
Embalagem	Saco - Papel Kraft	Kraft paper {RER} market for kraft paper Cut-off, S	Material constituinte do saco. Assume-se produção na Europa dada a localização do projeto (Portugal). Origem desconhecida pelo que se considerou transporte médio de mercado.
Embalagem	Eletricidade	Electricity, high voltage {RER} market group for Cut-off, S	Consumo de energia na fábrica para operações de embalagem. Assume-se <i>mix</i> elétrico médio europeu (RER), dada a localização do projeto (Portugal). Também foi considerado as perdas na distribuição (baixa tensão), refletindo o impacto ambiental do uso do equipamento em condições realistas.
Embalagem	Caixa cartão	Folding boxboard carton {RER} market for folding boxboard carton Cut-off, S	Material constituinte da embalagem. Assume-se produção na Europa dada a localização do projeto (Portugal). Origem desconhecida pelo que se considerou transporte médio de mercado.
Embalagem	Filme plástico	Packaging film, low density polyethylene {RER} production Cut-off, S	Material constituinte da embalagem. Assume-se produção na Europa dada a localização do projeto (Portugal).

Embalagem	Água de rede pública	Tap water {RER} market group for Cut-off, S	Assume-se o consumo de água tratada e distribuída pela rede pública europeia (processo <i>market group for</i>), que inclui os processos de captação, tratamento e distribuição. Dada a localização do projeto (Portugal), considera-se a representatividade do mix médio europeu (RER) para este recurso.
Embalagem	Águas residuais	Wastewater, average {Europe without Switzerland} market for wastewater, average Cut-off, S	Assume-se o tratamento médio europeu (excluindo a Suíça) para águas residuais industriais, dada a localização do projeto em Portugal. Não havia <i>dataset</i> específico para RER (Portugal). A exclusão da Suíça deve-se a possíveis diferenças nos sistemas de tratamento, mas a média europeia é considerada representativa para Portugal. Origem desconhecida pelo que se considerou transporte médio de mercado.
Transporte	Veículo comercial ligeiro	Transport, freight, light commercial vehicle {RER} market group for Cut-off, S	Assume-se o pior cenário com combustões mais elevadas, representando distâncias médias de transporte na Europa dada a localização do projeto (Portugal).
Utilização	Consumo elétrico	Electricity, low voltage {RER} market group for Cut-off, S	Consumo de energia durante a utilização do aspirador. Assume-se o <i>mix</i> elétrico médio europeu (RER), dada a localização do projeto (Portugal). Também foi considerado as perdas na distribuição (baixa tensão), refletindo o impacto ambiental do uso do equipamento em condições realistas.
Utilização	Saco - Papel Kraft	Kraft paper {RER} market for kraft paper Cut-off, S	Consumo de sacos descartáveis durante a vida útil. Assume-se produção na Europa dada a localização do projeto (Portugal). Origem desconhecida pelo que se considerou transporte médio de mercado.
Fim de Vida	Resíduo Sólido Urbano	Municipal solid waste {PT} market for municipal solid waste Cut-off, S	Geração de resíduos (ex: sacos usados) durante a utilização. Assume-se tratamento específico em Portugal.
Fim de Vida	Resíduo de plástico (aterro)	Waste plastic, consumer electronics {GLO} treatment of waste plastic, consumer electronics, sanitary landfill Cut-off, S	Cenário conservador/pessimista. Assume-se que todos os plásticos são enviados para aterro sanitário, o pior cenário de destino final. Origem desconhecida (Global – Mundial). Não havia <i>dataset</i> específico para RER (Portugal).
Fim de Vida	Sucata de aço (aterro inerte)	Scrap steel {Europe without Switzerland} treatment of scrap steel, inert material landfill Cut-off, S	Cenário conservador/pessimista. Assume-se que os metais são depositados em aterro para material inerte, não sendo reciclados. Não havia <i>dataset</i> específico para RER (Portugal), pelo que se considerou válido a Europa excluindo a Suíça.
Fim de Vida	Resíduo de papelcartão (aterro)	Waste paperboard {CH} treatment of sanitary landfill Cut-off, S	Cenário conservador/pessimista. Assume-se que as embalagens de papel e cartão são enviadas para aterro sanitário, não sendo recicladas. Não havia <i>dataset</i> específico para RER (Portugal), pelo que se considerou válido a Suíça.

A.2. Aspiradores reparados com sucesso (fornecido pela EcoPo)

Tabela A. 2. Aspiradores reparados com sucesso (fornecido pela EcoPorto).

Aspirador	Marca	Massa Total (kg)	Tempo despendido (min)	Problemas Identificados
1	Taurus	6,000	70	Ficha elétrica danificada
2	Ufesa	5,450	60	Sujidade Acumulada
3	Hoover	5,900	180	Tubo de aspiração partido e cabo danificado
4	Nilfisk	5,600	70	Sem tubo de aspiração e cabo
5	Zanussi	3,400	90	Sem tubo de aspiração e mau contacto nas ligações
6	LG	6,000	80	Sem tubo de aspiração e mau contacto nas ligações
7	Hoover	3,000	80	Sujidade acumulada
8	Polti	2,200	60	Sujidade acumulada
9	Philips	5,500	80	Sujidade acumulada
10	LG	5,000	60	Sem tubo de aspiração e escovas danificadas
11	Bosch	5,800	70	Sem tubo de aspiração e escovas danificadas
12	Rowenta	5,500	40	Sem tubo de aspiração
13	AEG	5,600	60	Sem tubo de aspiração
14	AEG	5,050	70	Não definido*
15	Karcher	6,200	60	Sujidade acumulada (Filtros)
16	Ufesa	1,600	20	Sujidade acumulada
17	Rowenta	5,300	70	Sujidade acumulada (Filtros)
18	H.Koenig	2,200	120	Tubo de aspiração e rolamentos danificados
19	Becken	6,050	60	Sujidade acumulada (Filtros)
20	Rowenta	1,250	40	Sujidade acumulada (Filtros)
21	Taurus	5,850	60	Sujidade acumulada
22	Jocel	5,650	40	Sujidade acumulada
23	Fujitsu	3,450	60	Cabo danificado
24	Hoover	1,700	45	Não definido*
25	Zanussi	3,850	60	Tubo de aspiração danificado
26	Rowenta	3,750	45	Cabo danificado
27	Hoffen	1,500	20	Não precisou de reparação
28	Bosch	5,900	30	Sujidade acumulada
29	Electrolux	6,100	60	Sujidade acumulada (Filtros)
30	Bosch	5,750	120	Sujidade acumulada
31	Tower	4,500	15	Sujidade acumulada
32	Philips	3,500	30	Sujidade acumulada
33	Qilive	4,450	20	Tubo de aspiração danificado e sujidade acumulada
34	Silvercrest	1,000	30	Sujidade acumulada
35	Taurus	3,150	40	Sujidade acumulada
36	Bosch	5,750	60	Tubo de aspiração e cabo danificados
37	Rowenta	5,850	40	Não definido*
38	Parkside	9,400	60	Sujidade acumulada
39	Bosch	4,700	40	Não definido*
40	Dirtdevil	5,450	80	Bocal partido, ficha elétrica danificada
41	Electrolux	7,200	160	Carcaça danificada, sem tubo de aspiração e filtros entupidos
42	Envirotect	12,050	100	Não definido*
43	Jocca	0,400	20	Não precisou de reparação
44	Jocca	0,500	20	Não definido*
45	LG	4,600	80	Não definido*

46	Moulinex	5,200	60	Não definido*
47	Moulinex	6,300	60	Não definido*
48	Philips	6,400	60	Não definido*
49	Philips	5,850	70	Tubo de aspiração congestionado
50	Philips	7,800	70	Bocal do tubo danificado
51	Rowenta	5,600	30	Não definido*
52	Rowenta	4,700	60	Sujidade acumulada
53	Rowenta	5,800	60	Sujidade acumulada
54	Rowenta	5,900	180	Não definido*
55	Sem marca	5,750	120	Não definido*
56	Sem marca	6,100	60	Não definido*

A.3. Aspiradores encaminhados para resíduo (fornecido pela EcoPorto).

Tabela A. 3. Aspiradores encaminhados para resíduo (fornecido pela EcoPorto).

Aspirador	Marca	Massa (kg)	Tempo despendido (min)	Problemas Identificados
1	Bosch	2,800	90	Bateria danificada
2	Electrolux	1,700	20*	Partido (totalmente)
3	Rowenta	3,800	20	Falta de peças
4	Electric Co	0,750	20*	Sem potencial de recuperação
5	Royalty Line	10,700	20*	Sem potencial de recuperação
6	Rowenta	6,500	20*	Sem potencial de recuperação
7	Bosch	2,600	15*	Sem potencial de recuperação
8	Becken	4,550	40*	Motor queimado
9	Sem marca	0,150	15*	Sem potencial de recuperação
10	Bosch	5,900	20*	Sem potencial de recuperação
11	Black & Decker	0,750	15*	Sem potencial de recuperação
12	Ilive	2,900	20*	Sem potencial de recuperação
13	Kunft	4,850	20*	Sem potencial de recuperação
14	Silvercrest	1,050	15*	Sem potencial de recuperação

A.4. Aspiradores com componentes reaproveitados (fornecido pela EcoPorto).

Tabela A. 4. Aspiradores com componentes reaproveitados (fornecido pela EcoPorto).

Aspirador	Marca	Peso Total (kg)	Massa dos Resíduos (kg)	Massa Reaproveitada (kg)	Tempo despendido (min)	Indicador de Circularidade	Problemas Identificados	Material Reaproveitado
1	AEG	3,450	1,200	2,250	100	0,652	Motor queimado	Tudo exceto o motor
2	Dexter	5,050	0,900	4,150	60	0,822	Motor queimado	Tudo exceto o motor
3	Hoover	5,050	3,400*	1,650*	40*	0,327	Motor partido	Não definido*
4	Orima	3,650	1,450*	2,200*	40*	0,603	Motor partido	Não definido*
5	Rowenta	4,600	3,200*	1,400*	60*	0,304	Enrolador do cabo danificado	Tubo e cabo
6	Ufesa	5,800	5,000*	0,800*	50*	0,138	Motor partido	Cabo
7	Hoffen	1,050	0,400*	0,650*	15*	0,619	Não definido*	Não definido*

A.5. Micro-ondas reparados com sucesso (fornecido pela EcoPorto)

Tabela A. 5. Micro-ondas reparados com sucesso (fornecido pela EcoPorto).

Micro-Ondas	Marca	Massa (kg)	Tempo despendido (min)	Problemas Identificados
1	Jocel	10,650	90	Não aquecia
2	Teka	12,750	20	Não aquecia
3	Selecline	11,100	100	Não aquecia. Magnetão e fusível danificados
4	Flama	10,050	70	Sem estabilidade na parte inferior
5	Samsung	13,500	40	Lâmpada avariada
6	LG	9,650	120	Não aquecia. Magnetão, motor e prato danificados
7	Siemens	12,550	60	Motor de rotação de prato danificado e lâmpada avariada
8	Panasonic	10,600	120	Motor de rotação de prato danificado
9	Whirlpool	10,700	120	Magnetão, cabo de alimentação, ventoinha, motor de rotação de prato
10	Alaska	11,800	60	Não aquecia. Transformador e fusível danificados
11	Electronia	11,300	60	Não aquecia. Lâmpada e fusível danificados
12	Electronia	10,800	70	Não aquecia. Magnetão e prato danificados
13	Balay	18,150	90	Cabo, magnetão e fusível danificados
14	Sem marca	10,950	120	Não aquecia. Condensador e prato danificados
15	Princess	13,700	60	Ruído. Motor de rotação de prato danificado
16	Kunft	11,450	150	Não aquecia. Magnetão, transformador, fusível e prato danificados
17	Kunft	10,150	90	Não aquecia. Fusível térmico queimado e prato e respetivo suporte danificados
18	AG	4,200	30	Sujidade e gordura
19	Silvercrest	12,450	150	Não aquecia. Transformador e condensador danificados
20	Kunft	10,200	180	Gordura e pintura danificada
21	Electronia	6,000	120	Fusível danificado
22	Hoffen	5,000	90	Não aquecia. Cabo e magnetão danificados
23	Ikohs	6,000	150	Curto-circuito. Pulsador bloqueado
24	Haeger	10,700	120	Não aquecia
25	Hotpoint	15,100	60	Não definido*
26	Kunft	9,900	70	Não definido*
27	Kunft	10,100	80	Não definido*
28	LG	10,900	60	Não definido*
29	Teka	14,800	60	Transformador e fusível danificados

A.6. Micro-ondas encaminhados para resíduo (fornecido pela EcoPorto).

Tabela A. 6. Micro-ondas encaminhados para resíduo (fornecido pela EcoPorto).

Micro-Ondas	Marca	Massa (kg)	Tempo despendido (min)	Problemas Identificados
1	Whirlpool	21,600	120	Seletor de funções e temporizador avariados
2	Jocel	6,700	5	Interior todo queimado
3	Flama	10,400	15*	Sem potencial de recuperação
4	Flama	3,200	10*	Interior todo queimado
5	Teka	16,050	15*	Sem potencial de recuperação
6	AEG	6,140	40*	Seletor de funções e temporizador avariados

A.7. Micro-ondas com componentes reaproveitados (fornecido pela EcoPorto)

Tabela A. 7. Micro-ondas com componentes reaproveitados (fornecido pela EcoPorto).

Micro-Ondas	Marca	Massa Total (kg)	Massa dos Resíduos (kg)	Massa Reaproveitada (kg)	Tempo despendido (min)	Indicador de Circularidade	Problemas identificados	Material Reaproveitado
1	Fagor	10,750	6,250	4,500	60*	0,419	A porta não fecha, motor queimado, ferrugem, pintura danificada	Cabo de alimentação, transformador, fusível, placa eletrónica e condensador
2	Flama	10,050	5,000	5,050	40*	0,502	Ferrugem	Transformador, ventoinha, fusíveis, seletor de funções, magnetão e placa eletrónica
3	Kunft	10,350	6,850	3,500	50*	0,338	Ferrugem	Magnetão, transformador, lâmpada, condensador, fusíveis térmicos
4	Kunft	10,400	7,750	2,650	30*	0,255	Interior queimado, ferrugem, pintura danificada	Cabo de alimentação, condensador, motor de rotação de prato e lâmpada
5	Siemens	11,600	9,600*	2,000*	30	0,172	Sem potencial de recuperação	Cabo de alimentação e cabo
6	Samsung	11,700	5,900	5,800	90	0,496	Sem potencial de recuperação	Transformador, ventoinha, condensador, magnetão, sensores, grill, microswitch, cabo, fusíveis
7	Electric Co	11,350	5,450	5,900	90	0,512	Carcaça, porta e magnetão danificados	Condensador, ventoinha, transformador, motor de rotação de prato, seletor de funções, parafusos
8	AG	12,700	6,140*	6,560*	60*	0,517	Pintura danificada e ferrugem	Prato, transformador, ventoinha, pulsadores, termóstato, fusível, motor de rotação de prato
9	Selecline	12,650	5,550*	7,100*	60*	0,561	Carcaça e seletor de funções danificados	Transformador, magnetão, ventoinhas, prato, cabo de alimentação, resistência, lâmpada, pulsadores, condensador, motor de rotação de prato
10	Fagor	10,750	6,250	4,500	60*	0,419	Sem potencial de recuperação	Transformador, fusível, condensador, cabo