

Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Mafalda Alexandra Ferreri de Gusmão e Silva Ramos

**A economia circular aplicada à gestão de
resíduos de equipamentos elétricos e
eletrónicos:**

**Implementação de uma linha de
desmantelamento e de um novo método de
separação de componentes numa empresa
gestora de resíduos**

Dissertação de Mestrado

Mestrado Integrado em Engenharia Biológica

Ramo Tecnologias Ambientais

Trabalho realizado sob a orientação da

Doutora Luciana Peixoto

DIREITOS DE AUTOR E CONDIÇÕES DE UTILIZAÇÃO DO TRABALHO POR TERCEIROS

Este é um trabalho académico que pode ser utilizado por terceiros desde que respeitadas as regras e boas práticas internacionalmente aceites, no que concerne aos direitos de autor e direitos conexos.

Assim, o presente trabalho pode ser utilizado nos termos previstos na licença abaixo indicada.

Caso o utilizador necessite de permissão para poder fazer um uso do trabalho em condições não previstas no licenciamento indicado, deverá contactar o autor, através do RepositóriUM da Universidade do Minho.

Licença concedida aos utilizadores deste trabalho:



Atribuição-NãoComercial-SemDerivações
CC BY-NC-ND

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

Agradecimentos

A escrita e conclusão desta dissertação marca o fim de um percurso repleto de conhecimento e aprendizagens e que contou com o contributo de muitas pessoas às quais gostaria de agradecer.

À professora Luciana Peixoto, orientadora desta dissertação e docente no Mestrado Integrado em Engenharia Biológica, pelo tempo disponibilizado, conselhos essenciais para a escrita desta dissertação e conhecimentos partilhados.

Aos restantes docentes que fizeram parte desta jornada.

Ao orientador e administradora da empresa pela paciência, apoio e ensinamentos durante a realização do estágio curricular.

A todas as empresas que precisei de contactar e que disponibilizaram o seu tempo para me ajudar e aconselhar a tomar a melhor decisão.

Aos meus amigos pelo acompanhamento, motivação e conselhos valiosos.

À minha família, principalmente aos meus pais, e ao meu namorado por tudo o que me permitiram alcançar.

A todos, muito obrigada!

DECLARAÇÃO DE INTEGRIDADE

Declaro ter atuado com integridade na elaboração do presente trabalho acadêmico e confirmo que não recorri à prática de plágio nem a qualquer forma de utilização indevida ou falsificação de informações ou resultados em nenhuma das etapas conducente à sua elaboração.

Mais declaro que conheço e que respeitei o Código de Conduta Ética da Universidade do Minho.

A economia circular aplicada à gestão de resíduos de equipamentos elétricos e eletrónicos: Implementação de uma linha de desmantelamento e de um novo método de separação de componentes numa empresa gestora de resíduos

Resumo

Os resíduos sólidos foram a primeira problemática a nível ambiental relacionada com a civilização humana. No século XXI a produção dos Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrónicos (REEE) começou a aumentar. No ano de 2019 foram produzidas 53,6 Mt de REEE em todo o mundo, o que equivale em média a 7,3 kg per capita, e em Portugal geraram-se 170 kt de REEE, o que equivale a 16,6 kg per capita. O aumento da produção de REEE ano após ano está relacionado com o aumento da utilização de Equipamentos Elétricos e Eletrónicos (EEE), a redução da vida útil dos equipamentos e a reduzida oferta de serviços de reparação.

As entidades gestoras recolhem os REEE de forma a encaminhá-los para operadores de gestão de resíduos (OGR). O desmantelamento dos REEE permite a obtenção de materiais como plásticos, metais e outros componentes que podem ser valorizados. A reintrodução destes materiais nos processos produtivos de pequenos eletrodomésticos ou outros produtos que utilizem estas matérias-primas permite a circularidade dos recursos e reduzir o uso de matérias virgens, a poluição da água e do ar.

Durante o estágio curricular, foi possível estudar diversos processos de desmantelamento de REEE de uma entidade gestora de resíduos. O desmantelamento teste dos REEE pertencentes à categoria 5 permitiu concluir que o seu desmantelamento manual não é exequível, devido à elevada quantidade de REEE rececionados e complexidade do processo de desmontagem, pelo que foi necessário encontrar uma alternativa. A melhor forma de substituir o desmantelamento manual é automatizar o processo através de uma linha de desmantelamento. O desmantelador mecânico EWD 12 foi proposto como a opção mais favorável para a entidade gestora de resíduos e tem um custo de 127 000 €. A empresa, embora concorde com a opção sugerida no âmbito deste estágio, decidiu não o adquirir e optou pelo encaminhamento dos REEE para um OGR que realiza a sua trituração, por já possuir todo o equipamento e *know-how* necessários.

Dos componentes resultantes, foi proposto um novo método de separação manual para as Placas de Circuito Impresso (PCI), que consistirá numa melhoria da sua triagem por remover componentes que fazem parte das frações que são inseridas na economia circular e valorizadas pela empresa. Desta forma, a recuperação dos metais preciosos das PCI é mais eficaz e livre de contaminações.

Palavras-chave: Gestão de Resíduos, Economia Circular, REEE, Desmantelamento, PCI.

The circular economy applied to waste management of electrical and electronic equipment: Implementation of a dismantling line and a new method of separation of components in a waste management company

Abstract

Solid waste was the first environmental issue related to human civilization. In the 21st century the production of Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE) started to increase. In 2019, 53.6 Mt of WEEE were produced worldwide, which is equivalent to an average of 7.3 kg per capita, and 170 kt of WEEE were generated in Portugal, which is equivalent to 16.6 kg per capita. The increase in the production of WEEE year after year is related to the increased use of Electrical and Electronic Equipment (EEE), reduction of useful life of the equipments and reduced offer of repair services.

Managing entities collect WEEE to forward them to waste management operators. The dismantling of WEEE allows the obtainment of materials such as plastics, metals and other components that can be valorised. The reintroduction of these materials in production processes of small household appliances or other products that use these raw materials allows the circularity of resources and reduces the use of virgin materials, and water and air pollution.

During the internship, it was possible to study various processes of dismantling WEEE from a waste management entity. The test dismantling of WEEE belonging to category 5 allowed to conclude that their manual dismantling is not feasible, due to the high amount of WEEE received and the complexity of the dismantling process, so it was necessary to find an alternative. The best way to replace manual dismantling is to automate the process through a dismantling line. The EWD 12 mechanical dismantler was proposed as the most favourable option for the waste management entity and has a cost of 127 000 €. The company, although agreeing with the option suggested in the scope of this internship, decided not to acquire it and opted to send the WEEE to a waste management operator that will crush it, as it already has all the equipment and know-how necessary.

From the resulting components, a new method of manual separation for Printed Circuit Boards (PCB) was proposed, which will consist of an improvement in their sorting by removing components that are part of the fractions that are included in the circular economy and valued by the company. In this way, the recovery of precious metals from PCB is more efficient and freer from contamination.

Key words: Waste Management, Circular Economy, WEEE, Dismantling, PCB

Índice

Agradecimentos.....	iii
Resumo.....	v
Abstract.....	vi
Índice de Figuras.....	x
Índice de Tabelas.....	xv
Lista de Abreviaturas.....	xvii
1. Introdução.....	19
1.1. Enquadramento e Motivação.....	19
1.2. Objetivos.....	20
1.3. Metodologia Geral.....	21
1.4. Estrutura da Dissertação.....	21
2. Gestão de Resíduos e Economia Circular.....	23
2.1. Introdução Histórica da Gestão de Resíduos.....	23
2.2. Políticas para a Gestão de Resíduos e Operações de Tratamento.....	24
2.3. Hierarquia dos Resíduos.....	31
2.4. Fim do Estatuto de Resíduo (FER).....	33
2.5. Economia Circular.....	33
2.6. Lista Europeia de Resíduos (LER).....	34
3. Equipamentos Elétricos e Eletrónicos e Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrónicos.....	37
3.1. Definições de EEE e REEE.....	37
3.2. Categorias dos EEE e REEE.....	37
3.3. Dados estatísticos dos REEE.....	39
3.3.1. REEE no Mundo.....	39
3.3.2. REEE em Portugal.....	44

3.3.2.1.	Comparação com a Europa.....	44
3.3.2.2.	Comparação com a União Europeia	45
3.3.2.3.	Impacto da Pandemia Covid-19.....	46
3.4.	Operações de Gestão dos REEE.....	47
3.5.	Especificidade dos REEE na LER.....	48
3.6.	Sistema de Logística Reversa e Economia Circular Aplicados aos REEE.....	49
3.7.	Entidades Gestoras de REEE em Portugal	50
3.7.1.	Electrão - Associação de Gestão de Resíduos	50
3.7.2.	ERP Portugal - Associação Gestora de Resíduos	53
3.7.3.	WEEECYCLE - Associação de Produtores de EEE.....	56
3.7.4.	Evolução da Gestão dos EEE e dos REEE pelas Entidades Gestoras	57
3.7.5.	Incumprimento das Metas Referentes à Categoria 2.....	58
3.8.	Composição química dos REEE	59
3.9.	Desmantelamento e descontaminação dos REEE.....	62
4.	Gestão dos REEE na Empresa de Acolhimento	64
4.1.	Receção e Descontaminação dos REEE	64
4.2.	Desmantelamento Teste dos REEE Pertencentes à Categoria 5	66
4.3.	Desmantelamento Comparativo dos REEE Pertencentes à Categoria 6.....	72
4.4.	Componentes Gerais Resultantes do Desmantelamento dos REEE	77
5.	Implementação de uma Linha de Desmantelamento para a Reciclagem de REEE	81
5.1.	Requisitos da empresa	81
5.2.	Processo tradicional para a reciclagem dos REEE	81
5.2.1.	MTB™	82
5.2.2.	Regulator Cetrisa™	84
5.2.3.	Custo total do processo tradicional para a reciclagem dos REEE.....	85
5.3.	Novos métodos para a reciclagem dos REEE	86

5.3.1.	Separação por Sensores	86
5.3.1.1.	Sesotec™	86
5.3.1.2.	Tomra™	89
5.3.2.	Desmantelamento mecânico	92
5.3.2.1.	Compton™	92
5.3.2.2.	BRT Hartner™	94
5.3.3.	Pré-Trituração	96
5.4.	Avaliação das opções para a linha de desmantelamento para a reciclagem dos REEE	96
5.4.1.	Avaliação Económica dos Processos e Retorno Financeiro	98
5.4.2.	Análise dos Requisitos da Empresa	99
6.	Implementação de um Novo Sistema de Separação das Placas de Circuito Impresso (PCI) Resultantes do Desmantelamento dos REEE	102
6.1.	Sistema Antigo de Separação	102
6.2.	Novo Sistema de Separação	107
6.2.1.	Classificações das Empresa Extratoras de Metais	107
6.2.1.1.	Placas-Mãe e Placas Gráficas, de Rede e de Som	107
6.2.1.2.	Outras PCI Não Especificadas	109
6.2.1.3.	Painéis Traseiros de Servidor	113
6.2.2.	Classificação Implementada na Empresa	114
7.	Conclusões	117
	Referências Bibliográficas	119
	Anexos	124
A.	Lista indicativa de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos	124
B.	Folha de Registo - Monitorização do Desmantelamento dos REEE	127
C.	Componentes das Placas de Circuito Impresso	128

Índice de Figuras

Figura 1 - Hierarquia das operações de gestão de resíduos.	32
Figura 2 - Transição da economia linear para a economia circular.	34
Figura 3 - Símbolo utilizado para a identificação dos EEE.	37
Figura 4 - (A) Produção anual (PA) de REEE no mundo de 2010 a 2019; (B) Produção mundial per capita (PMPC) de REEE de 2010 a 2019.	39
Figura 5 - Produção per capita de cada continente (PPCC) em 2019.	40
Figura 6 - Produção mundial de cada continente (PMC) de REEE em 2019.	41
Figura 7 - Taxas de recolha e reciclagem de cada continente (TRRC) em 2019.	42
Figura 8 - Número de países no mundo com políticas, legislações ou regulamentações relativas aos REEE.	42
Figura 9 - Produção anual estimada (PAE) de REEE no mundo de 2020 a 2030	43
Figura 10 - Produção por categoria legal (PCL) mundial de REEE no ano de 2019	43
Figura 11 - Taxa de recolha e de reciclagem nas diferentes regiões da Europa (TRRE) em 2019	44
Figura 12 - Comparação da taxa de recolha e reciclagem (TRR) dos REEE em Portugal e na União Europeia de 2010 até 2017.	45
Figura 13 - Comparação da taxa de circularidade (TC) em Portugal e na União Europeia de 2010 a 2019.	46
Figura 14 - Etapas do processo de logística reversa aplicado aos REEE.	49
Figura 15 - Sistema integrado de gestão de REEE e RPA do Electrão.	51
Figura 16 - Evolução do número de produtores de EEE aderentes do Electrão ($NP_{\text{Electrão}}$) de 2015 a 2019.	51
Figura 17 - Percentagem de produtores aderentes do Electrão por tipo de categoria de EEE em 2019.	51
Figura 18 - Quantidade de EEE declarados ao Electrão ($EEE_{\text{Electrão}}$) em 2019 por categoria legal.	52
Figura 19 - Quantidade de REEE recolhidos pelo Electrão ($REEE_{\text{Electrão}}$) por categoria legal em 2019	52
Figura 20 - Evolução dos produtores aderentes da ERP Portugal (NP_{ERP}) de EEE de 2015 a 2019	54

Figura 21 - Percentagem de produtores aderentes da ERP Portugal por tipo de categoria de EEE em 2019.....	54
Figura 22 - Quantidade de EEE declarados à ERP Portugal (EEE_{ERP}) em 2019 por categoria legal	55
Figura 23 - Quantidade de REEE recolhidas pela ERP Portugal ($REEE_{ERP}$) por categoria em 2019	55
Figura 24 - Quantidade de EEE colocados no mercado pelos produtores aderentes da WEEECYCLE ($EEE_{WEEECYCLE}$) por categoria em 2019	56
Figura 25 - Evolução das quantidades (Q) dos EEE colocados no mercado e REEE recolhidos e valorizados pelas entidades gestoras nos anos de 2011 até 2018	57
Figura 26 - Composição especificada geral dos REEE	59
Figura 27 - Fluxograma da receção dos REEE nas instalações da empresa.	65
Figura 28 - Principais componentes resultantes do desmantelamento de REEE na empresa..	66
Figura 29 - REEE da categoria 5 para ser desmantelado: torradeira.	67
Figura 30 - Cabos resultantes do desmantelamento de uma torradeira.	67
Figura 31 - Ficha resultante do desmantelamento de uma torradeira.	67
Figura 32 - Placas resultantes do desmantelamento de uma torradeira.	68
Figura 33 - Plástico resultante do desmantelamento de uma torradeira.....	68
Figura 34 - Sucata ligeira, metal ferroso, resultante do desmantelamento de uma torradeira.	68
Figura 35 - Rejeitado resultante do desmantelamento de uma torradeira.	69
Figura 36 - REEE da categoria 5 para ser desmantelado: aquecedor termoventilador.	69
Figura 37 - Alumínio, metal não ferroso, resultante do desmantelamento de um aquecedor termoventilador.	69
Figura 38 - Cabos resultantes do desmantelamento de um aquecedor termoventilador.	70
Figura 39 - Cobre resultante do desmantelamento de um aquecedor termoventilador.	70
Figura 40 - Componentes resultantes do desmantelamento de um aquecedor termoventilador.	70
Figura 41 - Ficha resultante do desmantelamento de um aquecedor termoventilador.	71
Figura 42 - Plástico resultante do desmantelamento de um aquecedor termoventilador.....	71
Figura 43 - Sucata ligeira, metal ferroso, resultante do desmantelamento de um aquecedor termoventilador.	71
Figura 44 - Rejeitado resultante do desmantelamento de um aquecedor termoventilador.	71

Figura 45 - REEE da categoria 6 para ser desmontado: Router.	72
Figura 46 - Plástico resultante do desmontamento de um router.	73
Figura 47 - Cabos resultantes do desmontamento de um router.	73
Figura 48 - Alumínio, metal não ferroso, resultante do desmontamento de um router.	73
Figura 49 - Sucata ligeira, metal ferroso, resultante do desmontamento de um router.	73
Figura 50 - Placa resultante do desmontamento de um router.	74
Figura 51 - REEE da categoria 6 para ser desmontado: Torre de computador.	74
Figura 52 - Plástico resultante do desmontamento de uma torre de computador.	74
Figura 53 - Componentes resultantes do desmontamento de uma torre de computador.	75
Figura 54 - Fita cobre resultante do desmontamento de uma torre de computador.	75
Figura 55 - Fonte de alimentação resultante do desmontamento de uma torre de computador.	75
Figura 56 - Leitor de CD (esquerda) e disco rígido (direita) resultantes do desmontamento de uma torre de computador.	76
Figura 57 - Alumínio, metal não ferroso, resultante do desmontamento de uma torre de computador.	76
Figura 58 - Placas resultantes do desmontamento de uma torre de computador.	76
Figura 59 - Cabos resultantes do desmontamento de uma torre de computador.	77
Figura 60 - Sucata ligeira, metal ferroso, resultante do desmontamento de uma torre de computador.	77
Figura 61 - Ventoinhas obtidas do desmontamento dos REEE referentes às categorias 4, 5 e 6.	78
Figura 62 - Balastros obtidos do desmontamento dos REEE referentes às categorias 4, 5 e 6.	78
Figura 63 - Componentes obtidos do desmontamento dos REEE referentes às categorias 4, 5 e 6.	78
Figura 64 - Resistências obtidas do desmontamento dos REEE referentes às categorias 4, 5 e 6.	79
Figura 65 - Disjuntores obtidos do desmontamento dos REEE referentes às categorias 4, 5 e 6.	79
Figura 66 - Fitas cobre obtidas do desmontamento dos REEE referentes às categorias 4, 5 e 6.	79

Figura 67 - Barramentos obtidos do desmantelamento dos REEE referentes às categorias 4, 5 e 6.....	80
Figura 68 - Transformadores obtidos do desmantelamento dos REEE referentes às categorias 4, 5 e 6.....	80
Figura 69 - Passos necessários para a reciclagem mecânica dos REEE.....	82
Figura 70 - Tesoura rotativa RSX 1200.....	82
Figura 71 - Lâminas da tesoura rotativa RSX 1200.....	83
Figura 72 - REEE após pré-trituração na RSX 1200 (à esquerda) e após trituração na BDR 1645 com um tamanho de 40 mm (à direita).....	83
Figura 73 - Instalações possíveis para a banda magnética.....	84
Figura 74 - Funcionamento das correntes de <i>Eddy</i>	85
Figura 75 - Sesotec Varisort Compact.....	86
Figura 76 - Elementos constituintes do Sesotec Varisort Compact.....	87
Figura 77 - Procedimento necessário para a obtenção das frações de metais ferrosos, metais não ferrosos, plástico, pilhas e PCI através do Sesotec Varisort Compact.....	88
Figura 78 - Tomra Combisense.....	89
Figura 79 - Funcionamento e elementos constituintes do Tomra Combisense.....	91
Figura 80 - MCM-S.....	92
Figura 81 - Linha do MCM-S dupla com aspiradores e triagem manual pós desmantelamento.....	93
Figura 82 - Sistema de desmantelamento do MCM-S.....	93
Figura 83 - BRT Hartner EWD (Electric Waste Dismantle) 12.....	94
Figura 84 - Tambor rotativo do EWD 12.....	95
Figura 85 - REEE da categoria 5 antes (esquerda) e depois (direita) do desmantelamento mecânico no EWD 12.....	95
Figura 86 - Placas pobres.....	102
Figura 87 - Placas novas.....	103
Figura 88 - Placas velhas.....	103
Figura 89 - Placas ricas.....	104
Figura 90 - Placas sem componentes douradas.....	104
Figura 91 - Placas sem componentes prateadas.....	105
Figura 92 - Placas sem componentes acobreadas.....	105

Figura 93 - Placas com componentes douradas.....	106
Figura 94 - Placas com componentes prateadas.....	106
Figura 95 - Placas com componentes acobreadas.	106
Figura 96 - Socket 870 plástico.....	107
Figura 97 - Placa gráfica.	108
Figura 98 - Placas-mãe de <i>slot</i> (esquerda) e de <i>socket</i> grande (direita).....	108
Figura 99 - Placas-mãe de <i>socket</i> pequeno (esquerda) e de <i>socket</i> metálico (direita).....	109
Figura 100 - PCI não especificada.....	109
Figura 101 - Placa Telecom sem bobines de cobre.....	112
Figura 102 - Placa com encaixes e banda dourada.....	112
Figura 103 - Painel traseiro de servidor.....	113
Figura C. 1 - Circuito Integrado.	128
Figura C. 2 - EPROM.....	128
Figura C. 3 - Chip BGA.....	128
Figura C. 4 - Dissipador de calor de alumínio.....	129
Figura C. 5 - Condensador.	129

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Operações de valorização	26
Tabela 2 - Operações específicas para a operação de valorização R3	27
Tabela 3 - Operações específicas para a operação de valorização R4	27
Tabela 4 - Operações específicas para a operação de valorização R5	28
Tabela 5 - Operações específicas para a operação de valorização R9	28
Tabela 6 - Operações específicas para a operação de valorização R10	28
Tabela 7 - Operações específicas para a operação de valorização R12	29
Tabela 8 - Operações específicas para a operação de valorização R13	29
Tabela 9 - Operações de eliminação	30
Tabela 10 - Operações específicas para a operação de eliminação D1	31
Tabela 11 - Operações específicas para a operação de eliminação D8	31
Tabela 12 - Operações específicas para a operação de eliminação D12	31
Tabela 13 - Capítulos da lista europeia de resíduos.....	35
Tabela 14 - Classificação dos EEE colocados no mercado e respetivos resíduos conforme as 6 categorias legais.....	38
Tabela 15 - Exemplos de equipamentos que resultam em resíduos para cada categoria legal..	38
Tabela 16 - Comparação entre objetivos mínimos (OM) aplicáveis por categoria e as taxas obtidas pelo Electrão ($T_{\text{Electrão}}$)	53
Tabela 17 - Comparação entre objetivos mínimos (OM) aplicáveis por categoria e as taxas obtidas pela ERP Portugal (T_{ERP})	56
Tabela 18 - Comparação entre objetivos mínimos (OM) aplicáveis por categoria e as taxas obtidas pela WEEECYCLE ($T_{\text{WEEECYCLE}}$)	57
Tabela 19 - Metais pesados presentes nos REEE e seus componentes.....	61
Tabela 20 - Resumo com valor total e custo mensal do processo tradicional para a reciclagem dos REEE	85
Tabela 21 - Custo total de aquisição e custo de operação mensal da separação por sensores utilizando o <i>Sesotec Varisort Compact</i>	89
Tabela 22 - Custo total de aquisição e custo de operação mensal da separação por sensores utilizando o Tomra Combisense	91

Tabela 23 - Custo total de aquisição e custo mensal da separação por sensores utilizando o MCM-S	94
Tabela 24 - Valores do EWD 12, dos extras opcionais e dos custos mensais	96
Tabela 25 - Análise dos requisitos para a escolha da linha de desmantelamento para a reciclagem dos REEE	100
Tabela 26 - Comparação das categorias das PCI não especificadas das três empresas	112
Tabela 27 - Componentes e frações obtidas da triagem das PCI	114
Tabela 28 - Comparação entre a separação antiga e a nova separação das PCI na empresa	116
Tabela B. 1 - Folha de registo para a monitorização do desmantelamento dos REEE	127

Lista de Abreviaturas

- ABS - Acrilonitrila-Butadieno-Estireno
- BFR - Retardadores de Chama Bromados
- BGA - *Ball Grid Array*
- CDR - Combustíveis Derivados de Resíduos
- CFC - Clorofluorcarbonetos
- CPU - *Central Process Unit*
- CRT - Tubos de Raios Catódicos
- EEE - Equipamentos Elétricos e Eletrónicos
- EG - Entidade Gestora
- EPROM - *Erasable Programmable Read-Only Memory*
- ERP - *European Recycling Platform*
- ETA - Estações de Tratamento de Águas
- ETAR - Estações de Tratamento de Águas Residuais
- FER - Fim do Estatuto de Resíduo
- FFDU - Fabrico, Formulação, Distribuição e Utilização
- GWP - Potencial de Aquecimento Global
- HBCD - Hexabromociclododecano
- HC - Hidrocarbonetos
- HCFC - Hidroclorofluorcarbonetos
- HFC - Hidrofluorcarbonetos
- HIP - Poliestireno de Alto Impacto
- INE - Instituto Nacional de Estatística
- ITU - *International Telecommunication Union*
- LCD - Ecrãs de Cristais Líquidos
- LED - Díodo Emissor de Luz
- LER - Lista Europeia de Resíduos
- OGR - Operador de Gestão de Resíduos

OLED - Díodo Orgânico Emissor de Luz

PA - Pilhas e Acumuladores

PBDE - Éter Difenílico Polibromado

PC - Policarbonato

PCB - Policlorobifenilos

PCI - Placas de Circuito Impresso

PE - Polietileno

PET - Polietileno Tereftalato

POP - Poluente Orgânico Persistente

PP - Polipropileno

RCD - Resíduos de Construção e Demolição

RE - Resíduos de Embalagem

REEE - Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos

RGGR - Regime Geral da Gestão de Resíduos

RPA - Resíduos de Pilhas e Acumuladores

TAN - Taxa Anual Nominal

TBBPA - Tetrabromobisfenol A

TC - Taxa de Circularidade

1. Introdução

1.1. Enquadramento e Motivação

A presente dissertação foi realizada numa empresa gestora de resíduos que promove a economia circular, através da valorização dos resíduos recebidos, criando novos materiais. O grupo a que a empresa pertence possui 6 infraestruturas de gestão de resíduos, tem mais de 1 500 clientes, gere cerca de 25 000 toneladas de resíduos por ano, das quais 20 000 toneladas são valorizadas. As infraestruturas do grupo são:

- Centro de triagem, armazenamento e tratamento/valorização de resíduos não perigosos;
- Aterro de resíduos não perigosos;
- Centro de compostagem;
- Aterro de inertes;
- Unidade de produção de combustíveis derivados de resíduos (CDR);
- Unidade de gestão de resíduos de construção e demolição (RCD).

Estas infraestruturas permitem que este grupo empresarial seja autossuficiente, contribuem para uma gestão eficaz dos recursos e garantem que se aproveita ao máximo o valor de cada resíduo.

Os serviços que a empresa de acolhimento presta na área da gestão de resíduos incluem a avaliação e acondicionamento, em que identifica os resíduos e os coloca num centro de acondicionamento, recolhas pontuais ou periódicas de resíduos, e tratamento dos resíduos através da valorização e/ou reciclagem e posterior encaminhamento para o destino final. A empresa gere vários resíduos, entre os quais:

- Resíduos industriais não perigosos entre os quais resíduos recicláveis como papel, cartão, plástico, metais ferrosos, metais não ferrosos, madeira e vidro;
- Resíduos de construção e demolição (RCD) como entulhos e outros resíduos de obra dos quais inertes, madeiras, pladur, plásticos e metais, sacos de cimento, entre outros;
- Resíduos perigosos como resíduos absorventes contaminados, embalagens contaminadas, tintas, colas, vedantes, solventes, diluentes, águas oleosas, entre outros;
- Resíduos de equipamentos elétricos e eletrónicos (REEE), isto é, todos os resíduos de equipamentos que necessitam de corrente elétrica ou pilhas/baterias para funcionar, como

por exemplo, computadores, telemóveis, impressoras, torradeiras e outros eletrodomésticos;

- Resíduos biodegradáveis, isto é, resíduos caracterizados pela sua decomposição natural por meio de bactérias e fungos, como resíduos resultantes de atividades agrícolas, domésticas e florestais.

A empresa presta ainda outros serviços, através de empresas subcontratadas, que não estão diretamente relacionados com a gestão de resíduos, como a remoção de fibrocimento, isto é, remoção de placas de fibrocimento e/ou materiais de isolamento que contêm amianto, e limpezas especiais como limpezas industriais, gestão de lamas de Estações de Tratamento de Águas (ETA) e Estações de Tratamento de Águas Residuais (ETAR), limpeza de fossas sépticas, limpeza de caixas separadoras de gorduras alimentares e de hidrocarbonetos, coletores e tanques.

A empresa é certificada pelas NP EN ISO 9001:2015 e NP EN ISO 14001:2015 referentes aos sistemas de gestão da qualidade e do ambiente, respetivamente. Estas certificações aplicam-se à gestão global dos resíduos, incluindo a recolha, transporte, triagem, acondicionamento, valorização de resíduos urbanos e industriais, perigosos e não perigosos e REEE, e a prestação de serviços de gestão de resíduos e limpezas.

A gestão de resíduos e o seu reaproveitamento é uma questão cada vez mais importante no que diz respeito à sustentabilidade. A caracterização e avaliação dos resíduos é cada vez mais relevante, de forma a decidir qual o processo de valorização mais conveniente, tendo em conta a sua perigosidade e requisitos legais aplicáveis. A otimização dos processos operacionais é também uma questão pertinente no tratamento e valorização desses mesmos resíduos. Se, por exemplo, se analisar em pormenor os REEE, verifica-se que estes pertencem a um fluxo específico de resíduos e necessitam de ser desmantelados de forma a se proceder à sua valorização, visto que se está na presença de distintos componentes como plásticos, metais, componentes elétricos, entre outros.

Os contributos para a gestão de resíduos são variados e permitem aperfeiçoar as técnicas já existentes para o aproveitamento dos resíduos.

1.2. Objetivos

Os objetivos referentes à realização desta dissertação incluem a contribuição para a otimização dos processos operacionais do operador de gestão de resíduos (OGR), no que diz

respeito à receção, desmantelamento e armazenamento de REEE, e a otimização do seu fluxo específico de acordo com os requisitos legais e técnicos, através da implementação de uma linha de desmantelamento para a reciclagem dos seus diversos componentes e de um novo método de separação dos componentes resultantes do desmantelamento.

1.3. Metodologia Geral

A realização desta dissertação incluiu várias fases entre as quais:

- 1ª Fase: Pesquisa bibliográfica sobre os REEE e a legislação aplicável à sua gestão;
- 2ª Fase: Estudo e leitura de vários ficheiros internos da empresa, fornecidos pela mesma, com informações sobre as suas licenças e atividade;
- 3ª Fase: Desmantelamento de alguns REEE e aprendizagem prática na fábrica da empresa;
- 4ª Fase: Realização de pedidos de orçamentos de máquinas que permitem o desmantelamento de REEE, e estudo sobre qual a sua aplicabilidade à situação da empresa e resíduos rececionados;
- 5ª Fase: Realização de pedidos de informações a empresas extratoras de metais preciosos de componentes de REEE e elaboração de um catálogo interno para a separação dos mesmos;
- 6ª Fase: Redação da dissertação.

1.4. Estrutura da Dissertação

A presente dissertação encontra-se estruturada ao longo de 7 capítulos. No primeiro capítulo é realizado o enquadramento e motivação, são explicados quais os objetivos propostos, a metodologia geral realizada e qual a estrutura da dissertação.

O segundo capítulo inclui uma pequena introdução histórica da gestão dos resíduos e uma revisão legislativa da gestão de resíduos, das operações de valorização e eliminação, da hierarquia dos resíduos, do Fim do Estatuto de Resíduo (FER) e da Lista Europeia de Resíduos (LER). O capítulo compreende também o conceito de economia circular.

O terceiro capítulo menciona na íntegra os equipamentos elétricos e eletrónicos (EEE) e os REEE e aborda as suas definições, categorias e dados estatísticos no mundo e em Portugal. Refere também as operações de gestão, os códigos LER, o sistema de logística reversa e a economia circular aplicáveis aos REEE. São também mencionadas quais as entidades gestoras de

REEE em Portugal, a sua composição química e como se deve proceder ao seu desmantelamento e descontaminação.

O quarto capítulo aborda a gestão dos REEE na empresa na qual decorreu a dissertação, explicando quais destes pode rececionar e como realiza o seu desmantelamento e descontaminação. O capítulo apresenta também quais os principais componentes resultantes do desmantelamento.

O quinto capítulo apresenta as opções encontradas para a implementação de uma linha de desmantelamento para a reciclagem dos REEE pertencentes à categoria 5 na empresa.

O sexto capítulo apresenta a implementação de um novo sistema de separação dos componentes elétricos removidos dos REEE.

No sétimo e último capítulo encontram-se as conclusões.

2. Gestão de Resíduos e Economia Circular

2.1. Introdução Histórica da Gestão de Resíduos

Os resíduos sólidos foram a primeira problemática a nível ambiental relacionada com a civilização humana. A poluição da água e do ar apenas surgiram mais tarde. A produção de resíduos sólidos pode ser datada na Pré-história e a sua gestão passou a ser necessária de forma a melhorar a relação com o meio ambiente ^[1,2]. Em Atenas, em 500 a.C., foi criada uma legislação que exigia que os resíduos fossem depositados a pelo menos 2 km de distância dos limites da cidade. Já os romanos, de 27 a.C. a 410 d.C., despejavam os seus resíduos no meio da rua à espera de que estes fossem levados pela chuva, e depositavam as carcaças de humanos e animais resultantes dos combates dos gladiadores em poços abertos na periferia da cidade, até que a lei sobre o despejo do material fecal entrou em vigor. Contudo, na altura, os resíduos eram menos tóxicos, em menor quantidade e facilmente biodegradáveis ^[1].

Na década de 1350 a Peste Negra matou quase 25 milhões de pessoas devido à falta de condições higiénicas e à deposição do lixo nas ruas. O lixo acabou por atrair ratos que constituíram o vetor contaminante de disseminação da doença. No Reino Unido existia uma lei que obrigava as pessoas a terem os jardins das casas limpos, mas que não foi levada muito a sério pela população. Consequentemente, introduziu-se pela primeira vez na história o conceito de “homens recolhedores de lixo”, que consistia na recolha dos resíduos das ruas por alguém habilitado ^[1].

Antes da revolução industrial, que teve início por volta do ano de 1750, a quantidade de resíduos produzidos era reduzida, proveniente principalmente das necessidades fisiológicas básicas dos habitantes das cidades, pelo que não era uma área importante a desenvolver ^[2,3]. Contudo, a medicina neo-hipocrática, que se baseava nos métodos de Hipócrates, já considerava a contaminação do ar e do meio ambiente como a principal causa da mortalidade excessiva, o que levou à implementação de novas políticas e técnicas de gestão para limpar as cidades ^[2,4]. Por volta de 1757, foi implementado o primeiro serviço de limpeza de ruas em Filadélfia, nos Estados Unidos da América. Nesta altura, procedeu-se à valorização de alguns resíduos para a agricultura de forma a serem usados como adubos, e por volta das décadas de 1770 a 1860 recuperou-se a higiene das cidades. A partir da década de 1870, após o fim da revolução industrial, com a revolução dos fertilizantes e o rápido desenvolvimento do carvão, que posteriormente introduziu a indústria do petróleo, e com a descoberta de materiais mais facilmente disponíveis, a indústria da reciclagem sofreu um declínio enorme ^[1].

Ainda no século XIX iniciou-se a utilização de máquinas nas indústrias o que reduziu o preço de manufatura incentivando o aumento na produção de roupas. Já a invenção do plástico ocorreu em meados deste século. Em 1885, a América construiu a primeira incineradora para resíduos em Nova Iorque, e em 1904 inauguraram-se, em Cleveland e Chicago, instalações para proceder à reciclagem do alumínio. Em 1912, introduziu-se o aterro sanitário em Inglaterra para a deposição de resíduos de forma controlada ^[1]. Apesar destes avanços significativos na gestão de resíduos, a sua problemática não ficou resolvida.

As décadas de 1960 e 1970 foram marcadas por uma crise ambiental, em que a produção de resíduos e a sua deposição em aterros a céu aberto aumentou de forma drástica, e os acidentes sanitários passaram a ser constantes. Verificou-se um aumento progressivo do uso de talheres, louças e copos de plástico descartáveis, assim como outros produtos de utilização única ^[1].

No século XXI a poluição devido aos resíduos sólidos atingiu mares e oceanos afetando ecossistemas e resultando na extinção de espécies. De maneira a reduzir estas problemáticas, começaram a ser implementadas políticas para a gestão dos resíduos ^[1].

2.2. Políticas para a Gestão de Resíduos e Operações de Tratamento

Atualmente, as políticas para a gestão de resíduos englobam todas as tipologias de resíduos e as suas diversas origens. O Regime Geral da Gestão de Resíduos (RGGR) foi inicialmente publicado pelo Decreto-Lei n.º 178/2006, de 5 de setembro, e alterado pelo Decreto-Lei n.º 73/2011, de 17 de junho ^[5,6]. A 20 de dezembro de 2020 foi publicado o Decreto-Lei n.º 102-D/2020, que apenas entrou em vigor a 1 de julho de 2021, que aprova o novo RGGR e o novo regime jurídico da deposição de resíduos em aterro e altera o Decreto-Lei n.º 152-D/2017 ^[7]. O Decreto-Lei n.º 102-D/2020 estabelece medidas para prevenir ou reduzir a produção dos resíduos e os impactos adversos resultantes da sua produção, e para melhorar a eficiência da sua utilização com vista à transição para uma economia circular ^[7].

De forma a avançar na transição para uma economia circular as entidades responsáveis pela gestão de resíduos devem cumprir as seguintes metas ^[7]:

- A partir de 1 de julho de 2021, um aumento mínimo global para 50 %, em peso, relativamente à preparação para a reutilização e a reciclagem de resíduos urbanos;
- Até 2025, um aumento mínimo para 55 %, em peso, da preparação para a reutilização e da reciclagem de resíduos urbanos, em que, pelo menos, 5 % é resultante da preparação

para reutilização de têxteis, REEE, móveis e outros resíduos adequados para efeitos de preparação para reutilização;

- Até 2030, um aumento mínimo para 60 %, em peso, da preparação para a reutilização e da reciclagem de resíduos urbanos, em que, pelo menos, 10 % é resultante da preparação para reutilização de têxteis, REEE, móveis e outros resíduos adequados para efeitos de preparação para reutilização;
- Até 2035, um aumento mínimo para 65 %, em peso, da preparação para a reutilização e da reciclagem de resíduos urbanos, em que, pelo menos, 15 % é resultante da preparação para reutilização de têxteis, REEE, móveis e outros resíduos adequados para efeitos de preparação para reutilização.

A gestão adequada dos resíduos contribui para a preservação dos recursos naturais, quer através da prevenção, como da reciclagem e valorização. As operações de valorização autorizadas são denominadas por R1, R2, até R13, por virem da expressão inglesa, *Recovery Operations*, e encontram-se na Tabela 1.

O novo RGGR alterou também as operações de valorização já existentes e inicialmente publicadas pelo Decreto-Lei n.º 173/2011. Uma das alterações é referente às denominações das operações, como por exemplo na operação R12, que antes era designada de uma troca de resíduos com vista a submetê-los a uma das operações enumeradas de R1 a R11, e que agora inclui ainda a informação presente na nota 5 da Tabela 1.

A outra modificação com mais relevância diz respeito à introdução de operações específicas às operações de valorização existentes. As alterações centraram-se nas operações R3, R4, R5, R9, R10, R12 e R13 que se encontram nas Tabelas 2, 3, 4, 5, 6, 7 e 8, respetivamente.

Além das operações de valorização existem também as operações de eliminação denominadas por D1, D2, até D15, por virem da expressão inglesa, *Disposal Operations*, e encontram-se na Tabela 9.

Da mesma forma que aconteceu para as operações de valorização, nas operações de eliminação também foram incluídas as operações específicas para as operações de eliminação D1, D8 e D9 que se encontram nas Tabelas 10, 11 e 12, respetivamente.

Tabela 1 - Operações de valorização (Adaptado do Decreto-Lei n.º 102-D/2020, de 10 de dezembro) ^[7]

R1	Utilização principal como combustível ou outro meio de produção de energia ¹ .
R2	Recuperação/regeneração de solventes.
R3	Reciclagem/recuperação de substâncias orgânicas não utilizadas como solventes (incluindo compostagem e outros processos de transformação biológica) ² .
R4	Reciclagem/recuperação de metais e compostos metálicos ³ .
R5	Reciclagem/recuperação de outros materiais inorgânicos ⁴ .
R6	Regeneração de ácidos ou bases.
R7	Valorização de componentes utilizados na redução da poluição.
R8	Valorização de componentes de catalisadores.
R9	Refinação de óleos e outras reutilizações de óleos.
R10	Tratamento do solo para benefício agrícola ou melhoramento ambiental.
R11	Utilização de resíduos obtidos a partir de qualquer das operações de R1 a R10.
R12	Troca de resíduos com vista a submetê-los a uma das operações de R1 a R11 ⁵ .
R13	Armazenagem de resíduos destinados a uma das operações enumeradas de R1 a R12 (com exclusão da armazenagem preliminar).

¹ Inclui instalações de incineração dedicadas ao processamento de resíduos sólidos urbanos.

² Esta operação inclui a preparação para reutilização, a gaseificação e pirólise que utilizem os componentes como produtos químicos e a valorização de materiais orgânicos sob a forma de enchimento.

³ Esta operação inclui a preparação para reutilização.

⁴ Esta operação inclui a preparação para reutilização, a limpeza dos solos para efeitos de valorização, a reciclagem de materiais de construção inorgânicos e a valorização de materiais inorgânicos sob a forma de enchimento.

⁵ Se não houver outro código R adequado, este pode incluir operações preliminares anteriores à valorização, incluindo o pré -processamento, tais como o desmantelamento, a triagem, a trituração, a compactação, a peletização, a secagem, a fragmentação, o acondicionamento, a reembalagem, a separação e a mistura antes de qualquer das operações enumeradas de R1 a R11.

Tabela 2 - Operações específicas para a operação de valorização R3 (Adaptado do Decreto-Lei n.º 102-D/2020, de 10 de dezembro) ^[7]

Operação específica	Designação
R3 A	Preparação para reutilização de substâncias orgânicas.
R3 B	Compostagem.
R3 C	Digestão anaeróbia.
R3 D	Gaseificação e pirólise que utilizem componentes como produtos químicos.
R3 E	Reciclagem/recuperação de plásticos.
R3 F	Reciclagem/recuperação de papel.
R3 G	Reciclagem de óleos alimentares usados.
R3 H	Valorização de materiais inorgânicos em operações de enchimento.
R3 I	Valorização associada a um Fim de Estatuto de Resíduos.
R3 J	Reciclagem/recuperação de madeira.
R3 K	Outras operações R3 não previstas.

Tabela 3 - Operações específicas para a operação de valorização R4 (Adaptado do Decreto-Lei n.º 102-D/2020, de 10 de dezembro) ^[7]

Operação específica	Designação
R4 A	Preparação para reutilização de resíduos de metal e compostos metálicos.
R4 B	Reciclagem/recuperação de sucatas de ferro, aço e alumínio.
R4 C	Reciclagem/recuperação de sucata de cobre.
R4 D	Valorização associada a um Fim de Estatuto de Resíduos.
R4 E	Outras operações R4 não previstas.

Tabela 4 - Operações específicas para a operação de valorização R5 (Adaptado do Decreto-Lei n.º 102-D/2020, de 10 de dezembro) ^[7]

Operação específica	Designação
R5 A	Preparação para reutilização de resíduos inorgânicos.
R5 B	Reciclagem de materiais de construção inorgânicos.
R5 C	Reciclagem/ de resíduos de vidro para a fabricação de vidro.
R5 D	Valorização de materiais inorgânicos em operações de enchimento.
R5 E	Remediação de solos para efeitos da sua valorização.
R5 F	Incorporação de Resíduos de Construção e Demolição (RCD) em obra.
R5 G	Valorização associada a um Fim do Estatuto de Resíduos.
R5 H	Reciclagem de resíduos inorgânicos em substituição de matérias-primas para a fabricação de cimento.
R5 I	Reciclagem de resíduos inorgânicos em substituição de matérias-primas em outros processos de fabrico.
R5 J	Outras operações R5 não previstas.

Tabela 5 - Operações específicas para a operação de valorização R9 (Adaptado do Decreto-Lei n.º 102-D/2020, de 10 de dezembro) ^[7]

Operação específica	Designação
R9 A	Regeneração de óleos minerais usados para obtenção de óleos base lubrificantes.
R9 B	Reciclagem de óleos minerais usados para outros usos.
R9 C	Produção de combustíveis.
R9 D	Outras operações R9 não previstas.

Tabela 6 - Operações específicas para a operação de valorização R10 (Adaptado do Decreto-Lei n.º 102-D/2020, de 10 de dezembro) ^[7]

Operação específica	Designação
R10 A	Valorização de resíduos em solos agrícolas, florestais e na jardinagem.
R10 B	Cobertura e/ou regularização de caminhos nos aterros.
R10 C	Enchimento de vazios de escavação.
R10 D	Valorização de resíduos para a recuperação de solos degradados.
R10 E	Utilização de resíduos como matérias-primas subsidiárias.
R10 F	Outras operações R10 não especificadas.

Tabela 7 - Operações específicas para a operação de valorização R12 (Adaptado do Decreto-Lei n.º 102-D/2020, de 10 de dezembro) ¹⁷¹

Operação específica	Designação
R12 A	Tratamentos mecânicos.
R12 B	Triagem.
R12 C	Mistura de resíduos.
R12 D	Tratamentos químicos.
R12 E	Produção de combustível derivado de resíduos.
R12 F	Despoluição e desmantelamento de veículos em fim de vida, incluindo a remoção das substâncias perigosas.
R12 G	Desmantelamento dos resíduos de equipamento elétrico e eletrónico, incluindo a remoção das substâncias perigosas.
R12 H	Outros desmantelamentos.
R12 I	Reembalamento, com alteração de Lista Europeia de Resíduos (LER).
R12 J	Compactação, com alteração de LER.
R12 K	Secagem e evaporação prévia à valorização dos resíduos.
R12 L	Estabilização biológica aeróbia.
R12 M	Estabilização biológica anaeróbia.
R12 N	Peletização.
R12 O	Valorização de RCD.
R12 P	Valorização de RCD caracterizados de acordo com normas ou especificações técnicas.
R12 Q	Outras operações R12 não especificadas.

Tabela 8 - Operações específicas para a operação de valorização R13 (Adaptado do Decreto-Lei n.º 102-D/2020, de 10 de dezembro) ¹⁷¹

Operação específica	Designação
R13 A	Armazenagem de resíduos no âmbito da recolha.
R13 B	Armazenagem de resíduos no âmbito do tratamento.
R13 C	Armazenagem de resíduos com compactação sem alteração de LER.
R13 D	Reembalamento de resíduos, com vista a agrupar os resíduos em recipientes adequados para preparar resíduos para tratamentos posterior e mais distante, sem alteração de LER.
R13 E	Outra armazenagem de resíduos.

Tabela 9 - Operações de eliminação (Adaptado do Decreto-Lei n.º 102-D/2020, de 10 de dezembro) ^[7]

D1	Depósito no solo, em profundidade ou à superfície (por exemplo, em aterros, etc.).
D2	Tratamento no solo (por exemplo, biodegradação de efluentes líquidos ou de lamas de depuração nos solos, etc.).
D3	Injeção em profundidade (por exemplo, injeção de resíduos por bombagem em poços, cúpulas salinas ou depósitos naturais, etc.).
D4	Lagunagem (por exemplo, descarga de resíduos líquidos ou de lamas de depuração em poços, lagos naturais ou artificiais, etc.).
D5	Depósitos subterrâneos especialmente concebidos (por exemplo, deposição em alinhamentos de células que são seladas e isoladas umas das outras e do ambiente, etc.).
D6	Descarga para massas de água, com exceção dos mares e dos oceanos.
D7	Descargas para os mares e ou oceanos, incluindo inserção nos fundos marinhos.
D8	Tratamento biológico não especificado em qualquer outra parte do presente anexo que produza compostos ou misturas finais rejeitados por meio de qualquer das operações enumeradas de D1 a D12.
D9	Tratamento físico-químico não especificado em qualquer outra parte do presente anexo que produza compostos ou misturas finais rejeitados por meio de qualquer das operações enumeradas de D1 a D12 (por exemplo, evaporação, secagem, calcinação, etc.).
D10	Incineração em terra.
D11	Incineração no mar. Contudo, esta operação é proibida pela legislação da UE e pelas convenções internacionais.
D12	Armazenamento permanente (por exemplo, armazenamento de contentores numa mina, etc.).
D13	Mistura anterior à execução de uma das operações enumeradas de D1 a D12.
D14	Reembalagem anterior a uma das operações enumeradas de D1 a D13.
D15	Armazenamento antes de uma das operações enumeradas de D1 a D14 (com exclusão do armazenamento temporário, antes da recolha, no local onde os resíduos foram produzidos).

Tabela 10 - Operações específicas para a operação de eliminação D1 (Adaptado do Decreto-Lei n.º 102-D/2020, de 10 de dezembro) ^[7]

Operação específica	Designação
D1 A	Deposição no solo.
D1 B	Deposição no interior do solo.

Tabela 11 - Operações específicas para a operação de eliminação D8 (Adaptado do Decreto-Lei n.º 102-D/2020, de 10 de dezembro) ^[7]

Operação específica	Designação
D8 A	Tratamento biológico aeróbio.
D8 B	Tratamento biológico anaeróbio.

Tabela 12 - Operações específicas para a operação de eliminação D12 (Adaptado do Decreto-Lei n.º 102-D/2020, de 10 de dezembro) ^[7]

Operação específica	Designação
D9 A	Tratamento físico-químico de resíduos líquidos, sólidos e pastosos, incluindo filtração, rastreio, coagulação/floculação, oxidação/redução, precipitação, decantação/centrifugação, neutralização, destilação, extração.
D9 B	Imobilização (incluindo estabilização físico-química e solidificação).
D9 C	Descontaminação.
D9 D	Evaporação.
D9 E	Secagem térmica.
D9 F	Dessorção térmica.
D9 G	Outras operações de tratamento D9 não previstos.

2.3. Hierarquia dos Resíduos

A hierarquia das operações de gestão de resíduos, que se encontra na Figura 1, integra o princípio geral da política de prevenção e gestão de resíduos ^[7].

A prevenção e redução são as principais prioridades da gestão de resíduos, pretendendo-se que uma substância ou material apenas se transforme em resíduo quando é impossível reduzir a sua quantidade através da reutilização ou do aumento do ciclo de vida, reduzir os impactos no

ambiente e na saúde humana decorrentes dos resíduos produzidos, e reduzir a quantidade de substâncias prejudiciais presentes nos materiais e nos produtos ^[8].



Figura 1 - Hierarquia das operações de gestão de resíduos (Adaptado do Decreto-Lei n.º 102-D/2020, de 10 de dezembro) ^[7].

A gestão de resíduos deve selecionar e aplicar as melhores técnicas com custos económicos, que possibilitam o aumento do ciclo de vida dos materiais, garantindo a sua reutilização, reciclagem ou outras formas de valorização, desde que integrem as melhores opções do ponto de vista ecológico ^[8]. Como exemplo de reciclagem têm-se a digestão anaeróbia de resíduos orgânicos, em que as lamas e todos os digeridos são reciclados e usados como fertilizantes ^[9]. Usualmente a digestão anaeróbia é denominada como operação de valorização por permitir a conversão dos resíduos orgânicos em metano que é posteriormente utilizado para a produção de calor e eletricidade ^[10]. Neste caso, para além de se aproveitar o biogás também se utiliza o composto, ou digerido, como fertilizante, o que permite reconhecer o processo como reciclagem. Isto acontece porque quando os resíduos biodegradáveis são sujeitos a tratamento anaeróbio podem ser reconhecidos como reciclados quando esse tratamento gera um composto ou digerido que é benéfico para a agricultura ou resulta numa melhoria ambiental ^[11]. Assim, na valorização incluem-se as operações de incineração e co-incineração de resíduos com um nível elevado de valorização energética, e a transformação de resíduos em materiais a utilizar como combustíveis sólidos, líquidos ou gasosos ^[9].

A eliminação dos resíduos compreende as 15 operações de eliminação mencionadas na Tabela 9 em que a operação D1, que consiste na deposição em aterro, é a última e mais

indesejável. Esta apenas é válida quando é técnica ou financeiramente impraticável a prevenção, reutilização, reciclagem ou outras formas de valorização ^[8]. As operações de eliminação compreendem também as operações de incineração e co-incineração de resíduos com valorização energética limitada ^[9].

2.4. Fim do Estatuto de Resíduo (FER)

O Fim do Estatuto de Resíduo (FER) está inserido nos mecanismos de desclassificação de resíduos e é aplicado a resíduos que tenham sido submetidos a uma operação de valorização, incluindo a reciclagem. Os resíduos devem deixar de ser assim considerados quando ^[7]:

- se destinam a ser utilizados para fins específicos,
- existe um mercado ou procura,
- satisfazem os requisitos técnicos para os fins específicos e respeitam a legislação e as normas aplicáveis aos produtos,
- a sua utilização não acarreta impactes ao nível ambiental ou da saúde humana.

Relativamente aos subprodutos, estes são assim definidos sempre que resultam de um processo produtivo cujo principal objetivo não é a sua produção e quando ^[7]:

- existe a certeza de que irá ser aproveitado posteriormente,
- é possível utilizá-lo diretamente sem qualquer outro processamento,
- cumpre os requisitos como produto e não acarreta impactes adversos do ponto de vista ambiental ou da saúde humana, relativamente à sua posterior aplicação.

A desclassificação de resíduos permite que os resíduos possam ser utilizados como produtos sem que lhes sejam inerentes as legislações referentes à gestão de resíduos, facilitando o seu reaproveitamento e a economia circular ^[12].

2.5. Economia Circular

A produção de materiais tendo em conta a economia linear origina falta de recursos naturais e resulta em resíduos que provocam a poluição dos ecossistemas. Com o objetivo de resolver este problema, introduziu-se o conceito de economia circular. A economia circular é definida como um sistema industrial restaurador e regenerativo que pretende otimizar a produção de recursos e promover a eficácia do sistema através da conservação dos produtos, componentes e materiais, mantendo-os em circulação. Desta forma, é possível encontrar uma maneira de

reduzir a necessidade de extração de matérias-primas puras e continuar a ter uma boa qualidade de vida ^[13].

A economia circular pretende introduzir o conceito de circularidade de forma a substituir o conceito de economia linear que assume um fim de vida dos produtos, incentivando o uso de energias renováveis, eliminação do uso de produtos químicos tóxicos, e transformação dos resíduos através de um design superior de materiais, produtos, sistemas e modelos de negócios ^[14]. Na Figura 2 é possível visualizar a evolução da economia linear para a economia circular.

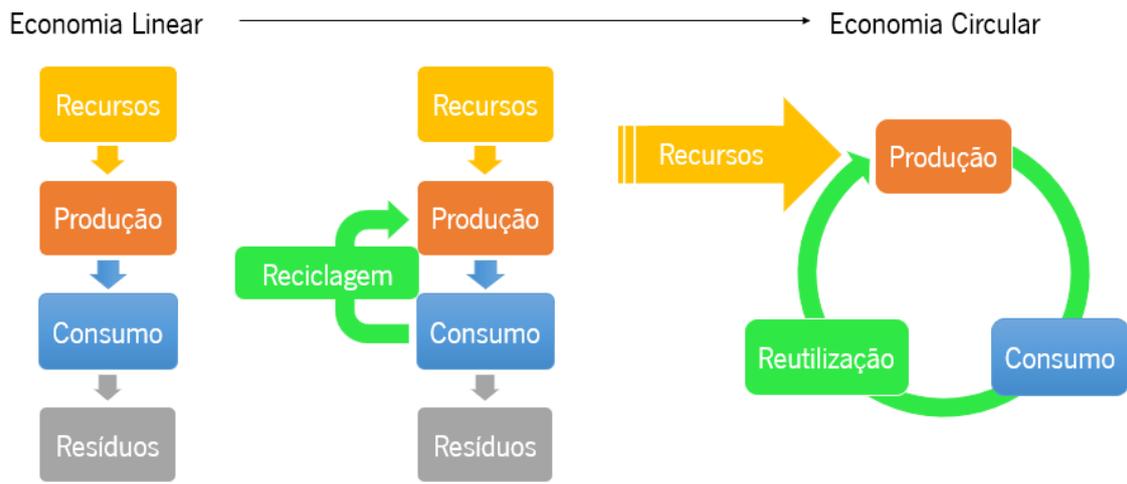


Figura 2 - Transição da economia linear para a economia circular (Adaptado de Mendes, G) ^[15].

Contudo, de forma a ser possível implementar uma economia circular, é necessário existir um sistema de logística reversa. Num sistema de logística normal, o mais importante são os fluxos de materiais que vão dos fornecedores para os produtores, passando pelos distribuidores, e por fim, para os clientes. No caso do sistema de logística reversa, o importante é o fluxo de retorno dos produtos que se encontram em fim de vida, assim como os seus componentes ou materiais obtidos a partir deles. Neste processo, as matérias-primas e os componentes reciclados podem ser utilizados pelos fornecedores e fabricantes como matérias secundárias nos processos de produção. Desta forma, a eliminação dos resíduos em aterros sanitários ou a sua incineração são os últimos recursos caso não seja possível dar um segundo uso aos materiais ^[16].

2.6. Lista Europeia de Resíduos (LER)

A Lista Europeia de Resíduos (LER) integra os variados tipos de resíduos que existem atualmente e os seus capítulos encontram-se na Tabela 13. Os resíduos são definidos por códigos de seis dígitos chamado de código LER. Os dois primeiros dígitos dizem respeito ao capítulo e os quatro seguintes identificam o subcapítulo. Se o material for perigoso, o seu código incluirá um (*).

A Lista Europeia de Resíduos atualizada pode ser consultada na Decisão 2014/955/UE, da Comissão, de 18 de dezembro.

Tabela 13 - Capítulos da lista europeia de resíduos ^[17]

01	Resíduos da prospeção e exploração de minas e pedreiras, bem como de tratamentos físicos e químicos das matérias extraídas.
02	Resíduos da agricultura, horticultura, aquacultura, silvicultura, caça e pesca, bem como da preparação e do processamento de produtos alimentares.
03	Resíduos do processamento de madeira e do fabrico de painéis, mobiliário, pasta para papel, papel e cartão.
04	Resíduos da indústria do couro e produtos de couro e da indústria têxtil.
05	Resíduos da refinação de petróleo, da purificação de gás natural e do tratamento pirolítico de carvão.
06	Resíduos de processos químicos inorgânicos.
07	Resíduos de processos químicos orgânicos.
08	Resíduos do fabrico, formulação, distribuição e utilização (FFDU) de revestimentos (tintas, vernizes e esmaltes vítreos), colas, vedantes e tintas de impressão.
09	Resíduos da indústria fotográfica.
10	Resíduos de processos térmicos.
11	Resíduos de tratamentos químicos de superfície e de revestimentos de metais e de outros materiais; resíduos da hidrometalurgia de metais não ferrosos.
12	Resíduos da moldagem e do tratamento físico e mecânico de superfície de metais e plásticos.
13	Óleos usados e resíduos de combustíveis líquidos (exceto óleos alimentares, 05 e 12).
14	Resíduos de solventes, fluidos de refrigeração e gases propulsores orgânicos (exceto 07 e 08).
15	Resíduos de embalagens; absorventes, panos de limpeza, materiais filtrantes e vestuário de proteção sem outras especificações.
16	Resíduos não especificados noutros capítulos da lista.
17	Resíduos de construção e de demolição (incluindo solos escavados de locais contaminados).
18	Resíduos da prestação de cuidados de saúde a seres humanos ou animais e/ou de investigação relacionada (exceto resíduos de cozinha e restauração não provenientes diretamente da prestação de cuidados de saúde).
19	Resíduos de instalações de gestão de resíduos, de estações ex situ de tratamento de águas residuais e da preparação de água para consumo humano e de água para consumo industrial.
20	Resíduos urbanos e equiparados (resíduos domésticos, do comércio, da indústria e dos serviços), incluindo as frações recolhidas seletivamente.

Para identificar um resíduo na LER é necessário seguir as etapas que se encontram na Decisão da Comissão de 18 de dezembro de 2014 ^[17]:

1. Começa-se por procurar nos capítulos 01 a 12 ou 17 a 20 a fonte produtora do resíduo e escolhe-se o código de seis dígitos apropriado ao resíduo (excluindo-se os códigos desses capítulos acabados em 99);
2. Se não houver nenhum código apropriado nos capítulos anteriores, procura-se nos capítulos 13, 14 ou 15;
3. Se não se aplicar ao resíduo nenhum dos códigos, procura-se no capítulo 16;
4. Se o resíduo também não se encontrar no capítulo 16, atribui-se-lhe o código 99 (resíduos sem outras especificações) da parte da lista correspondente à atividade identificada na etapa 1.

A classificação dos resíduos com o código LER é imprescindível, de forma a evitar a contaminação de outros resíduos ou do meio ambiente, e a garantir a sua correta valorização ou descarte.

3. Equipamentos Elétricos e Eletrônicos e Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos

3.1. Definições de EEE e REEE

O Decreto-Lei n.º 152-D/2017, de 11 de dezembro, que unifica o regime da gestão de fluxos específicos de resíduos, entre eles o fluxo de equipamentos elétricos e eletrônicos e resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos, foi alterado pelo Decreto-Lei n.º 102-D/2020, de 10 de dezembro ^[7].

Desta forma, os Equipamentos Elétricos e Eletrônicos (EEE) estão definidos, de acordo com o Decreto-Lei n.º 102-D/2020 como sendo “equipamentos dependentes de corrente elétrica ou de campos eletromagnéticos para funcionarem corretamente, bem como os equipamentos para geração, transferência e medição dessas correntes e campos, e concebidos para utilização com uma tensão nominal não superior a 1 000 V para corrente alternada e 1 500 V para corrente contínua”. Já os Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos (REEE) são definidos como “quaisquer EEE que constituam resíduos, incluindo os componentes, subconjuntos e materiais consumíveis que fazem parte integrante do produto no momento em que este é descartado”. Os EEE são usualmente identificados através de um símbolo que indica a recolha seletiva destes equipamentos. O símbolo encontra-se na Figura 3 e é constituído por um contentor de lixo barrado com uma cruz, e este deve ser impresso de forma visível, legível e indelével ^[7].

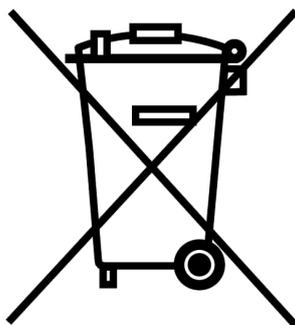


Figura 3 - Símbolo utilizado para a identificação dos EEE ^[7].

3.2. Categorias dos EEE e REEE

A recolha seletiva destes equipamentos é imprescindível para se proceder à sua valorização e/ou reciclagem, e de forma a facilitar a sua triagem encontram-se divididos em 6 categorias. A separação por categorias permite facilitar o processo de desmantelamento nas instalações de tratamento e evitar a contaminação cruzada dos vários componentes presentes em

cada REEE. A classificação dos EEE colocados no mercado, e conseqüentemente dos REEE a que eles dão origem, conforme as 6 categorias existentes encontra-se na Tabela 14 ^[7].

Tabela 14 - Classificação dos EEE colocados no mercado e respectivos resíduos conforme as 6 categorias legais (Adaptado do Decreto-Lei n.º 102-D/2020, de 10 de dezembro) ^[7]

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, com exceção dos equipamentos das categorias 1, 2 e 3.
5	Equipamentos de pequenas dimensões sem dimensões externas superiores a 50 cm, com exceção dos equipamentos abrangidos pelas categorias 1, 2, 3 e 6.
6	Equipamentos informáticos e de telecomunicações de pequenas dimensões, com nenhuma dimensão externa superior a 50 cm.

As categorias estão divididas e definidas por tipo de EEE ou suas dimensões, e em cada categoria encontram-se inúmeros equipamentos. Por vezes é difícil identificá-los na categoria correta, e por essa razão o Decreto-Lei n.º 102-D/2020 disponibiliza uma lista de exemplos que são pertencentes a cada categoria. Na Tabela 15 é possível encontrar os exemplos de EEE para cada categoria legal mencionada anteriormente e a lista completa pode ser consultada no Anexo A da presente dissertação ^[7].

Tabela 15 - Exemplos de equipamentos que resultam em resíduos para cada categoria legal (Adaptado do Decreto-Lei n.º 102-D/2020, de 11 de dezembro) ^[7]

Categoria	Exemplos de equipamentos
1	Frigoríficos, equipamentos de ar condicionado, equipamentos desumidificadores, equipamentos de regulação de temperatura que utilizem fluidos.
2	Ecrãs, Molduras fotográficas, LCD, Monitores, Computadores portáteis.
3	Lâmpadas fluorescentes, lâmpadas de halógenos metálicos e LED.
4	Máquinas de lavar roupa e louça, Secadores de roupa, Fogões, Fornos elétricos, painéis fotovoltaicos e impressoras e copadoras de grandes dimensões.
5	Aspiradores, Micro-ondas, Máquinas de barbear elétricas, Câmaras de vídeo, Instrumentos musicais, Brinquedos elétricos e eletrônicos, detetores de fumo, Ferramentas elétricas e eletrônicas de pequenas dimensões.
6	Telemóveis, GPS, Calculadoras, Routers, Computadores e Impressoras.

3.3. Dados estatísticos dos REEE

Os REEE foram identificados como um dos fluxos de resíduos prioritários pela Comissão Europeia, juntamente com as baterias e acumuladoras, pneus usados, veículos em fim de vida e embalagens. Por esta razão, é importante ter-se conhecimento dos dados estatísticos ao nível deste fluxo no que diz respeito à produção, descarte e reciclagem.

3.3.1. REEE no Mundo

No ano de 2019 foram produzidas 53,6 Mt de REEE em todo o mundo, o que equivale em média a 7,3 kg per capita ^[19]. A produção anual e a produção mundial per capita são calculadas todos os anos e na Figura 4 encontram-se os valores nos anos de 2010 a 2019 ^[20,21].

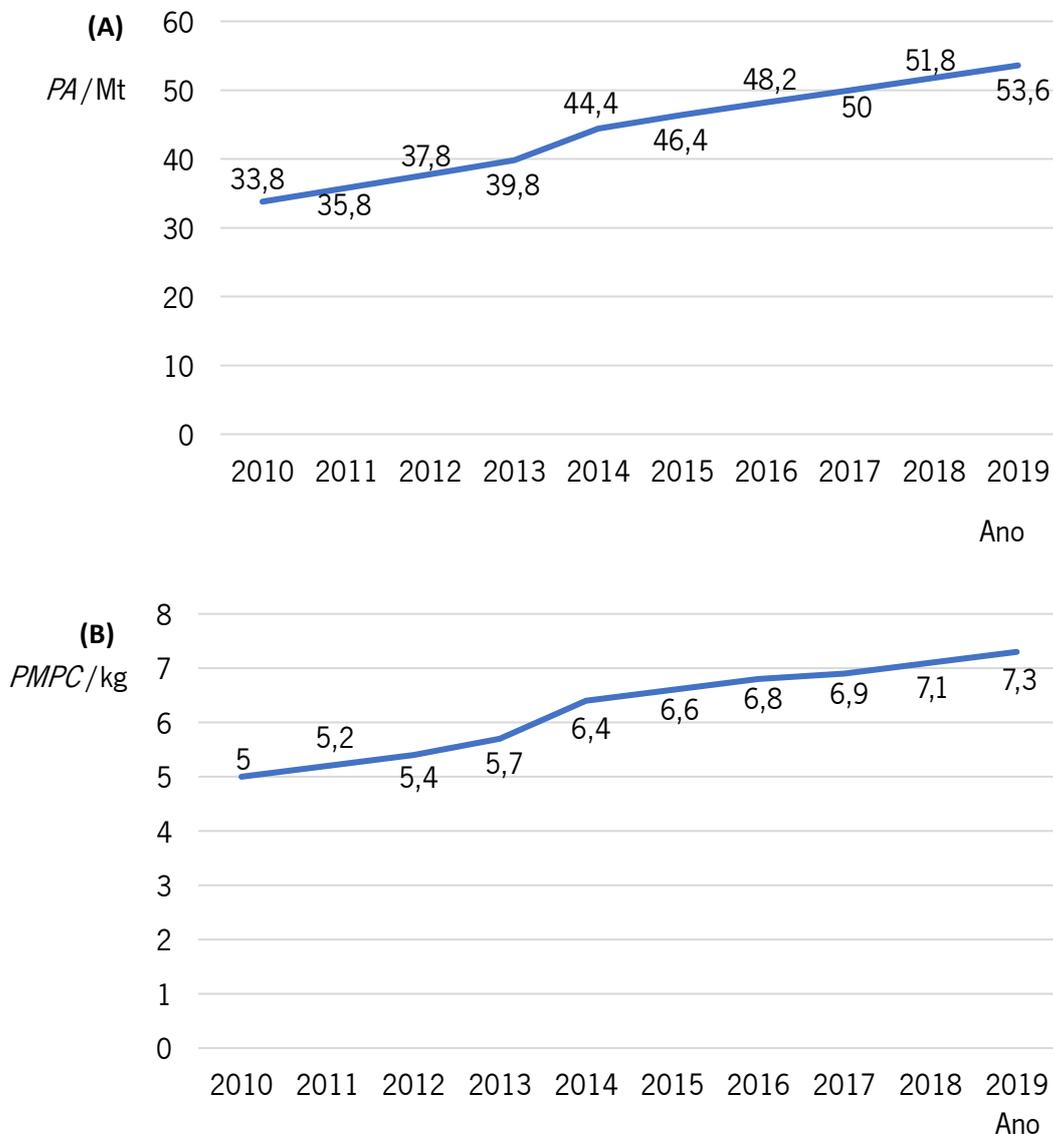


Figura 4 - (A) Produção anual (PA) de REEE no mundo de 2010 a 2019; **(B)** Produção mundial per capita (PMPC) de REEE de 2010 a 2019 (Adaptado de *Statista* ^[20,22]).

O aumento da produção de REEE ano após ano está relacionado com o aumento da utilização de EEE, a redução da vida útil dos equipamentos e a reduzida oferta de serviços de reparação ^[19].

Apesar de se calcular a média mundial é necessário ter em conta que existem diferentes modos de vida no mesmo país, e entre os países desenvolvidos e os países em vias de desenvolvimento. As estatísticas variam de região para região devido aos distintos comportamentos de consumo e de descarte dependentes de vários fatores internos de cada país e/ou região como o modo de vida, a política em vigor e a estrutura do sistema de gestão de resíduos ^[19]. Na Figura 5 encontra-se a produção per capita de cada continente em 2019 ^[19].

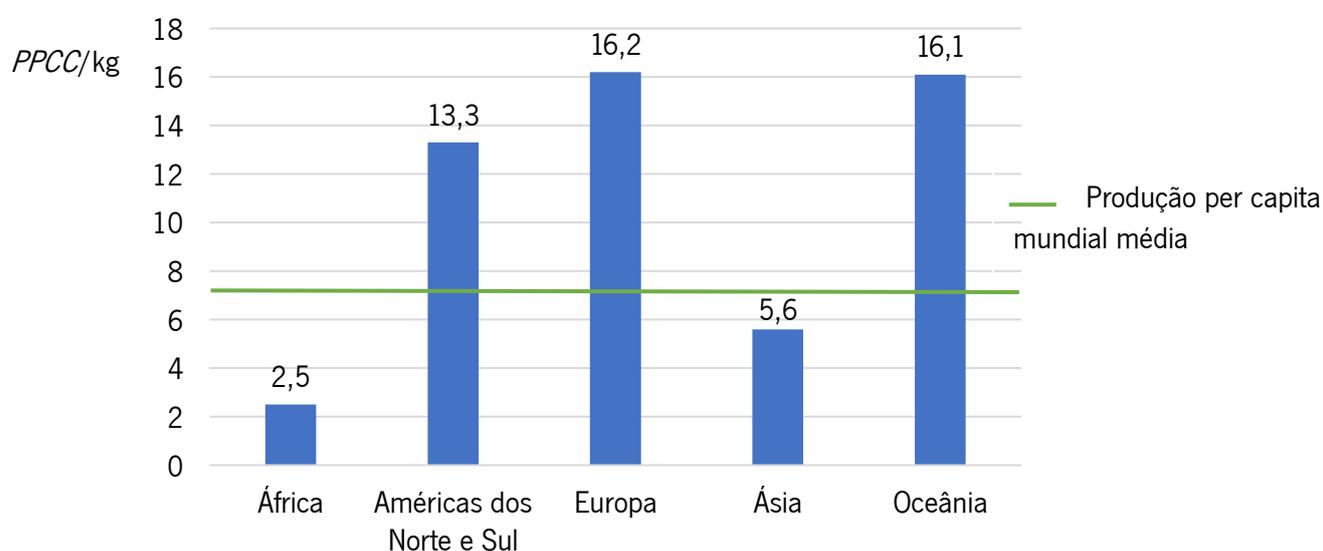


Figura 5 - Produção per capita de cada continente (PPCC) em 2019 (Adaptado de Forti, V.) ^[19].

Como mencionado anteriormente, os valores referentes a cada continente serão diferentes entre si e em relação à média mundial devido aos diferentes modos de vida. Consta-se que os continentes africano e asiático apresentam produções per capita mais baixas que a média mundial, o que coincide com o facto de serem continentes constituídos maioritariamente por países em vias de desenvolvimento ^[22]. Da mesma forma, os restantes continentes apresentam valores muito superiores à média mundial, sendo a Europa e a Oceânia os maiores produtores. Relativamente aos continentes Américas do Norte e Sul, estes deveriam ser apresentados e calculados em separado, uma vez que são continentes que apresentam modos de vida discrepantes.

Com a apresentação da produção per capita é possível ter uma ideia da produção média por cada habitante no mundo, mas isso não nos diz qual a produção referente, por exemplo a cada

continente. Na Figura 6 encontra-se a produção mundial de REEE em 2019 distribuída por cada continente ^[19].

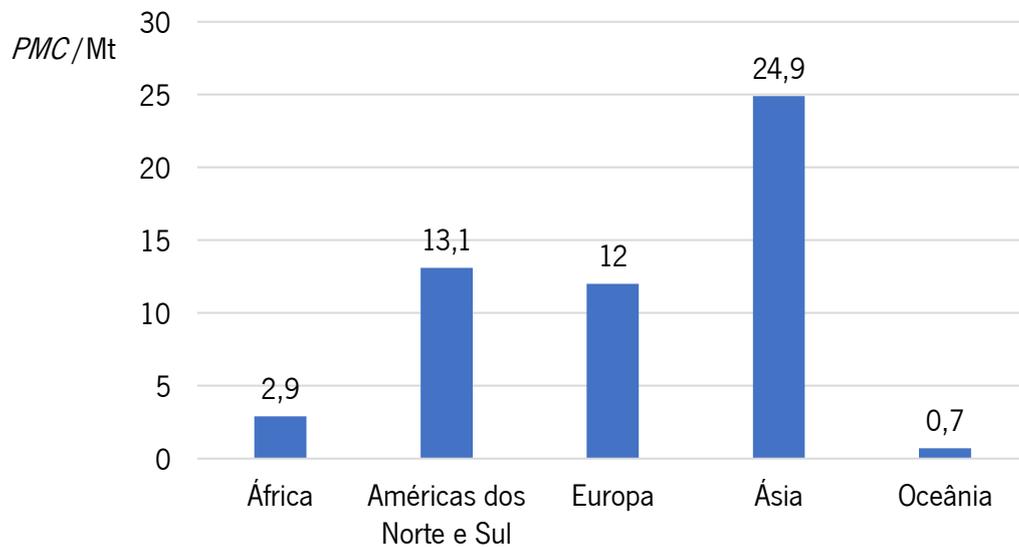


Figura 6 - Produção mundial de cada continente (PMC) de REEE em 2019 (Adaptado de Forti, V) ^[19].

Como é possível verificar, o continente asiático foi o maior produtor no ano de 2019, com cerca de 25 Mt, apesar da sua produção per capita ser inferior à produção per capita média mundial ^[19]. Da mesma forma a Oceânia, que é um dos continentes com maior produção per capita, torna-se o continente com a menor produção em 2019 devido ao seu reduzido número de habitantes.

Das 53,6 Mt produzidas em todo o mundo apenas 9,3 Mt, cerca de 17,4 %, foram oficialmente documentadas como recolhidas e recicladas ^[19]. Como já visto anteriormente, os valores médios mundiais não coincidem na totalidade com os valores reais de cada continente. Os dados referentes à taxa de recolha e reciclagem de cada continente em 2019 podem ser encontrados na Figura 7 ^[19].

É possível verificar que o continente africano, além de ser o segundo menor produtor de REEE, é o que apresenta a menor taxa de recolha e reciclagem, de apenas 0,9 %. Já o continente europeu, que apesar de ser o terceiro maior produtor de REEE e o que apresenta a maior produção per capita, detém a maior taxa de recolha e reciclagem, de 42,5 %.

Para haver uma correta gestão dos REEE a nível mundial e aumentar a taxa de recolha e reciclagem é necessário existirem políticas, legislações ou regulamentações nacionais referentes a cada país ^[19]. O número de países que possuem alguma destas medidas tem vindo a aumentar,

anos após ano, como se pode verificar na Figura 8. No entanto, em alguns países a criação destes documentos é lenta, a fiscalização é baixa e a gestão da recolha dos REEE não é eficaz ^[19].

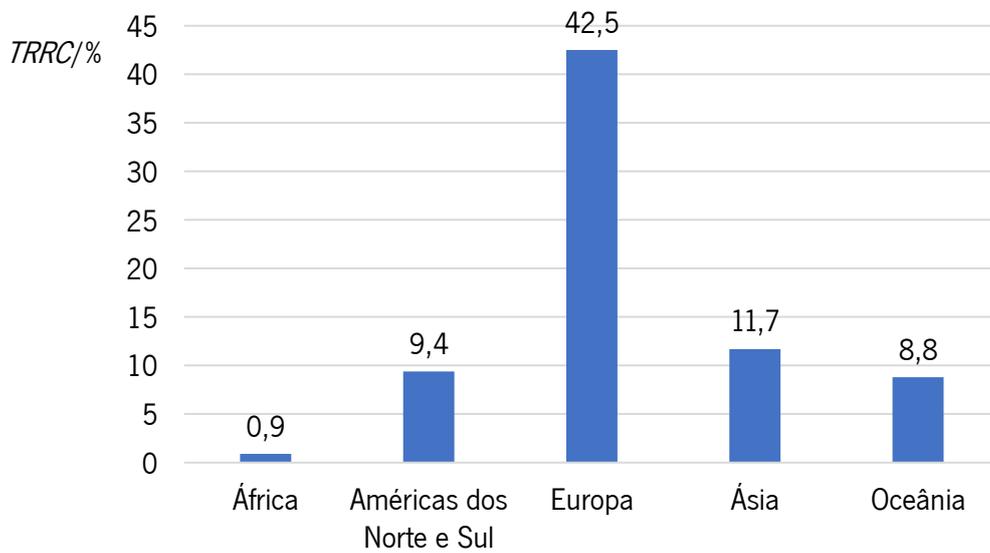


Figura 7 - Taxas de recolha e reciclagem de cada continente (TRRC) em 2019 (Adaptado de Forti, V) ^[19].

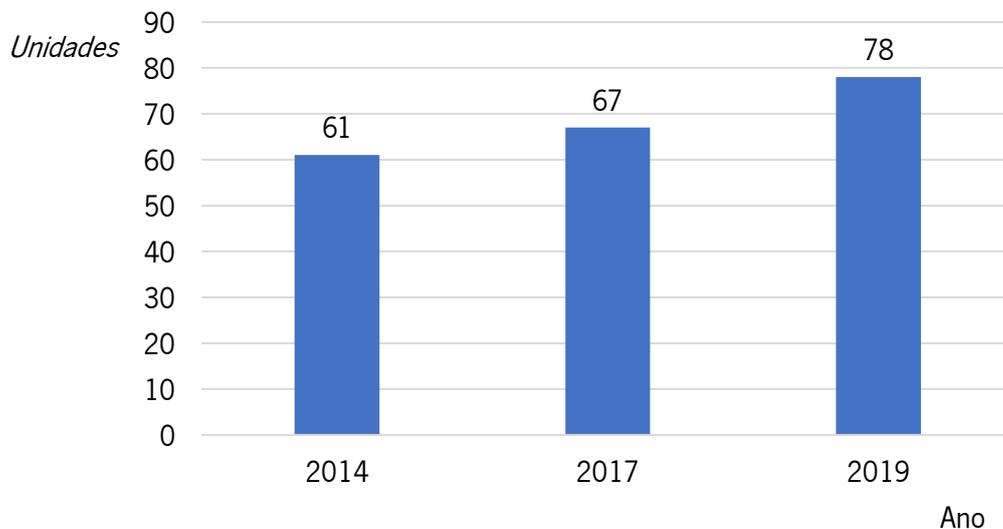


Figura 8 - Número de países no mundo com políticas, legislações ou regulamentações relativas aos REEE (Adaptado de Forti, V) ^[19].

Os Estados Membros da União Internacional de Telecomunicações, ITU (*International Telecommunication Union*), estabeleceram um objetivo de cerca de 50 % dos países do mundo, isto é, 97 países possuírem as políticas, legislações ou regulamentações relativas aos REEE até 2023 ^[19].

Por análise dos dados recolhidos e registados nos últimos anos estimou-se um aumento anual de produção de REEE de 3 a 5 %, o que permitiu calcular os valores esperados de produção de REEE até 2030 ^[23]. A previsão foi realizada para os anos de 2020 até 2030, uma vez que ainda só se conhecem os dados reais até 2019 ^[23]. Os valores estimados para esses anos podem ser vistos na Figura 9 ^[23].

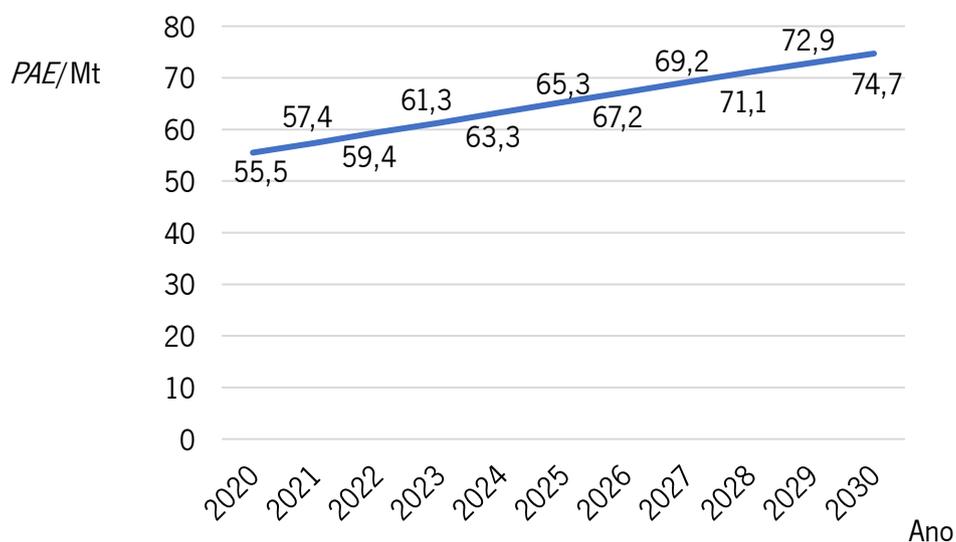


Figura 9 - Produção anual estimada (PAE) de REEE no mundo de 2020 a 2030 (Adaptado de Shittu, O. S., et al) ^[23].

Para o ano de 2019 são ainda conhecidos os dados relativos à produção mundial por tipo de equipamento tendo em conta as categorias definidas pelo Decreto-Lei n.º 102-D/2020. Os dados podem ser consultados na Figura 10 ^[24].

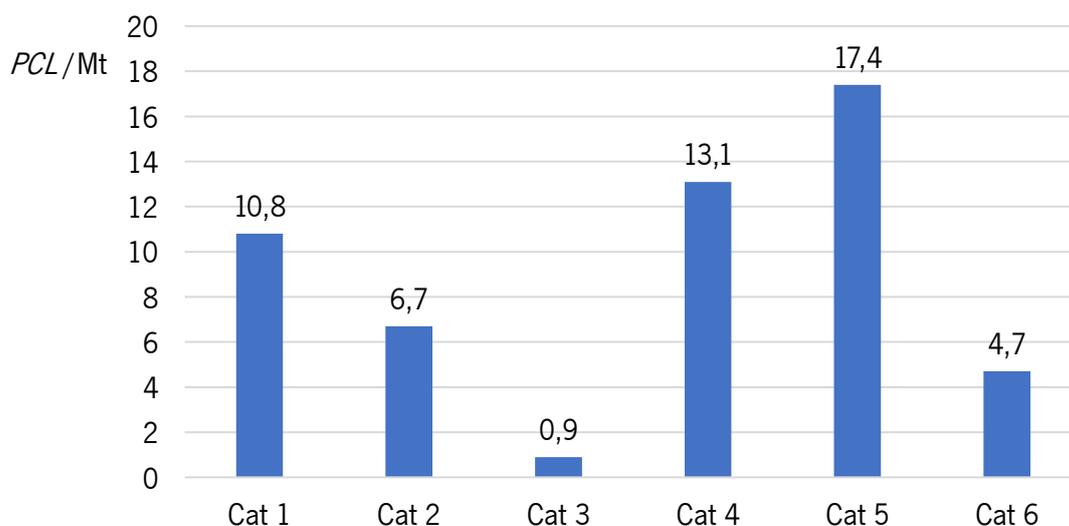


Figura 10 - Produção por categoria legal (PCL) mundial de REEE no ano de 2019 (Adaptado de Statista) ^[24].

É possível verificar que os equipamentos de pequenas dimensões, que dizem respeito à categoria 5, são os mais produzidos uma vez que incluem os pequenos eletrodomésticos que são utilizados no dia-a-dia nas nossas habitações. Da mesma forma, os equipamentos de grandes dimensões pertencentes à categoria 4, que incluem os grandes eletrodomésticos, são os segundos mais produzidos. Os telemóveis, que pertencem à categoria 6, apesar de serem produzidos em grandes quantidades a nível de unidades, por serem leves, não possuem uma quantidade em massa muito representativa.

3.3.2. REEE em Portugal

3.3.2.1. Comparação com a Europa

Em Portugal, em 2019, geraram-se 170 kt de REEE, o que equivale a 16,6 kg per capita ^[19]. Comparando-se com os resultados mostrados na Figura 5, Portugal apresenta uma produção per capita superior à produção per capita na Europa (16,2 kg) ^[19].

Uma vez que o valor de REEE recolhidos e reciclados em 2019 ainda não foi comunicado ao *Eurostat*, irão ser apresentados os valores referentes ao ano de 2017. Nesse ano produziram-se 161 kt de REEE de onde se recolheram 70 kt, cerca de 43,5 %. Como já mencionado no capítulo 2.2. desta dissertação, Portugal apresenta legislações, políticas ou regulamentações nacionais para promover uma correta e eficaz gestão dos REEE ^[19,25].

A Europa também apresenta valores da taxa de recolha e de reciclagem, mas dividida por regiões ^[26]. A Figura 11 mostra as taxas para o Norte, Oeste, Sul e Este da Europa para o ano de 2019 ^[26].

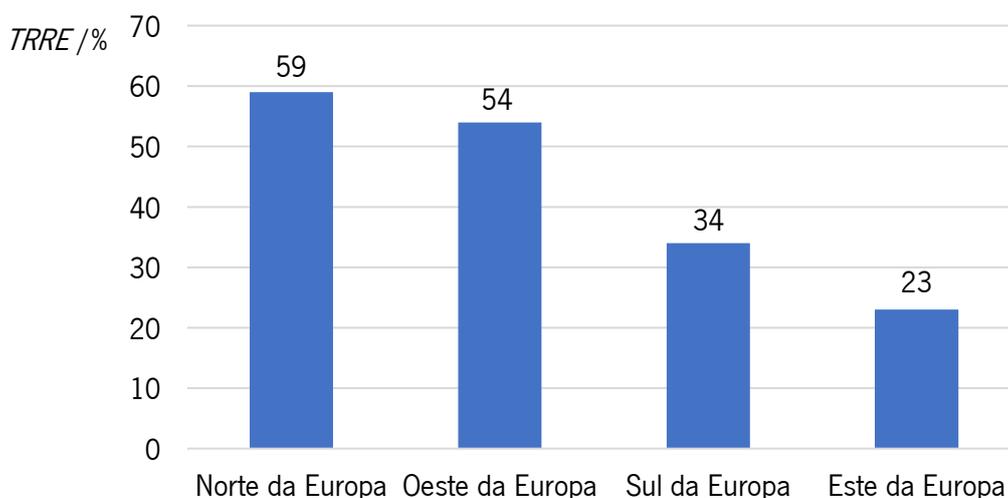


Figura 11 - Taxa de recolha e de reciclagem nas diferentes regiões da Europa (TRRE) em 2019 (Adaptado de *Statista*) ^[26].

Como é possível verificar, os países da zona Norte da Europa são os que apresentam uma taxa de recolha e de reciclagem superior, sendo também os países em que a população apresenta uma melhor qualidade de vida ^[27,28]. Portugal, que para o ano de 2017 apresentou uma taxa de 43,5 %, insere-se na zona Sul da Europa que apresenta uma taxa de recolha e reciclagem de apenas 34 %.

3.3.2.2. Comparação com a União Europeia

A taxa de recolha e de reciclagem em Portugal ao longo dos anos também pode ser comparada com a taxa média da União Europeia. Na Figura 12 encontra-se a comparação da taxa de reciclagem dos REEE em Portugal e na União Europeia de 2010 até 2017 ^[29].

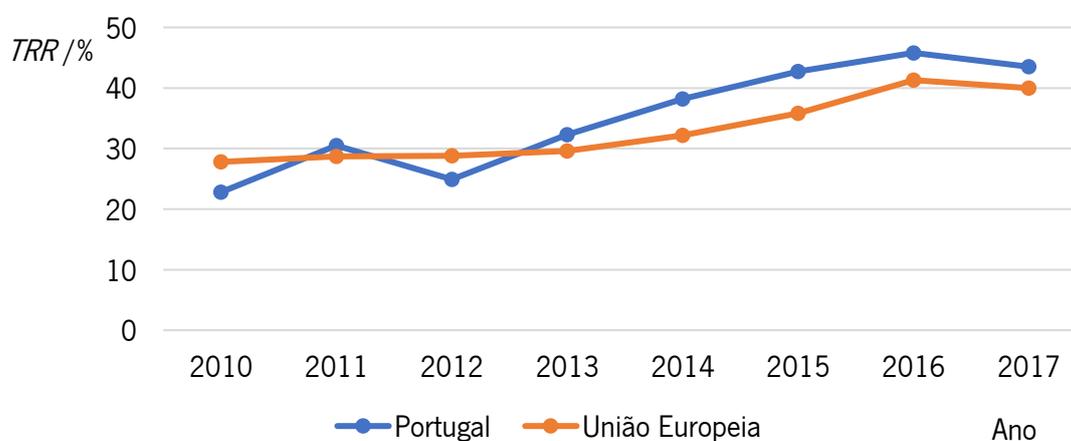


Figura 12 - Comparação da taxa de recolha e reciclagem (TRR) dos REEE em Portugal e na União Europeia de 2010 até 2017 (Adaptado de *Eurostat*) ^[29].

Através do gráfico é possível verificar que Portugal apresenta uma taxa superior à da União Europeia na maioria dos anos apresentados, à exceção dos anos de 2010 e 2012, mesmo tendo uma produção per capita superior à média mundial e à média europeia.

Um parâmetro que também pode ser comparado com a União Europeia é a taxa de circularidade (TC) que é definida como a razão entre o uso circular e o uso geral das matérias-primas. Um valor alto da taxa de circularidade significa que mais matérias-primas secundárias, por exemplo matérias-primas provenientes de materiais reciclados, substituem as matérias-primas primárias, isto é, as matérias-primas virgens, reduzindo assim os impactes ambientais relacionados com a extração da matéria-prima primária. O uso circular das matérias-primas é aproximado pela quantidade de resíduos reciclados em instalações domésticas menos os resíduos importados destinados a valorização mais os resíduos exportados destinados a valorização no

exterior ^[30]. Na Figura 13 encontra-se a comparação da TC entre Portugal e a União Europeia de 2010 a 2019 ^[30].

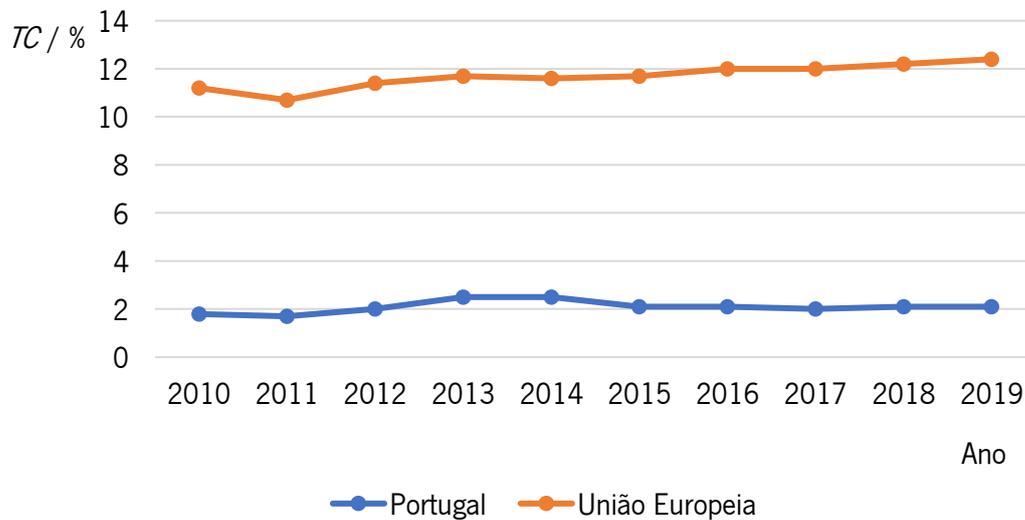


Figura 13 - Comparação da taxa de circularidade (TC) em Portugal e na União Europeia de 2010 a 2019 (Adaptado de *Eurostat*) ^[30].

Por observação do gráfico é possível concluir que a taxa de circularidade média da União Europeia é bastante superior à de Portugal ao longo dos anos, o que significa que Portugal necessita de tomar medidas que permitam implementar um uso circular das matérias-primas e não recorrer quase exclusivamente às matérias-primas virgens.

3.3.2.3. Impacto da Pandemia Covid-19

Segundo o Instituto Nacional de Estatística (INE) a pandemia covid-19 provocou uma diminuição nas quantidades de REEE recolhidos no primeiro semestre de 2020, comparativamente com o mesmo período em 2019. A principal razão que levou a esta redução centra-se no adiamento na aquisição de novos eletrodomésticos de grandes dimensões, como frigoríficos e máquinas de lavar roupa, que apresentam um investimento elevado para algumas famílias. Uma vez não adquiridos novos eletrodomésticos não existe a necessidade de recolher os antigos, observando-se assim uma descida de 22 % que diz respeito a menos 3712 toneladas de REEE recolhidas. Da mesma forma verificou-se uma descida na quantidade de REEE valorizados, praticamente proporcional à descida observada na quantidade de REEE recolhidos, 25 % correspondente a 4231 toneladas ^[31].

3.4. Operações de Gestão dos REEE

A hierarquia das operações de gestão de resíduos apresentada na Figura 1 desta dissertação é também válida quando se pretende a gestão de REEE. Relativamente às operações com maior relevância, prevenção e redução, estas referem-se como o próprio nome indica à redução na aquisição de novos equipamentos, isto é, adquirir apenas quando é estritamente necessário.

A preparação para a reutilização é a melhor opção quando se trata de EEE com algum tipo de avaria pois permite aumentar a sua vida útil. A reutilização é, do ponto de vista ambiental, bastante vantajosa por conservar a energia e as matérias-primas necessárias para a fabricação de novos EEE, e desta forma, reduzir a poluição associada ao uso da energia e à fabricação. E ainda, do ponto de vista económico, a reutilização possibilita às famílias mais carenciadas a hipótese de adquirirem equipamentos a custos mais baixos por serem reconicionados ^[32].

Por outro lado, se o EEE estiver demasiado estragado para ser arranjado, ou for demasiado antigo para poder ser reutilizado, a reciclagem é a opção que se segue na hierarquia das operações de gestão de resíduos. Para isso, no caso dos utilizadores particulares, deve-se depositar os REEE em contentores indicados para o efeito ou entregar em pontos de recolha. No caso das empresas, estas devem dirigir-se a um OGR. Daí, os REEE são encaminhados para entidades gestoras que os desmantelam e recuperam as peças para serem posteriormente recicladas ^[32]. Esta operação permite recuperar ferro, cobre, alumínio, ouro, prata, zinco, níquel, titânio, e outros metais, e tratar de forma adequada substâncias como cádmio, mercúrio e chumbo que são tóxicas e prejudiciais para o meio ambiente ^[33,34].

Os tipos de valorização conhecidos incluem as operações de incineração e co-incineração de resíduos com um nível elevado de valorização energética ^[9]. No entanto, os REEE não podem nem devem ser utilizados neste tipo de operação pois contêm materiais perigosos e tóxicos que representam um risco ambiental elevado se forem incinerados, como por exemplo, os tubos de raios catódicos (CRT) que apresentam quantidades consideráveis de chumbo. No caso dos retardadores de chama bromados, se incinerados a temperaturas entre 600 °C e 800 °C podem originar dioxinas e furanos polibromados que são extremamente tóxicos e cancerígenos. Além da formação de gases tóxicos que são libertados para a atmosfera, a incineração de REEE também resulta numa elevada concentração de metais, incluindo metais pesados, nas escórias e cinzas volantes resultantes ^[32].

Por fim, a operação de eliminação recorre a um aterro sanitário onde os resíduos são depositados. No caso dos REEE este fim também não é opção porque as substâncias químicas que fazem parte da sua constituição poluem os solos envolventes e as águas subterrâneas através da lixiviação ^[35]. Apesar dos aterros sanitários atuais serem impermeabilizados por várias camadas existe sempre esse risco resultando na libertação de mercúrio, cádmio e chumbo para o meio ambiente ^[32].

3.5. Especificidade dos REEE na LER

A classificação dos REEE na lista LER é feita segundo os capítulos 16 e 20. No capítulo 16, os REEE inserem-se no subcapítulo 2 e podem ser classificados segundo os códigos ^[36]:

- 16 02 09 (*) - Transformadores e condensadores contendo PCB;
- 16 02 10 (*) - Equipamento fora de uso contendo ou contaminado por PCB não abrangido em 16 02 09;
- 16 02 11 (*) - Equipamento fora de uso contendo clorofluorcarbonetos, HCFC, HFC;
- 16 02 12 (*) - Equipamento fora de uso contendo amianto livre;
- 16 02 13 (*) - Equipamento fora de uso contendo componentes perigosos não abrangidos em 16 02 09 a 16 02 12;
- 16 02 14 - Equipamento fora de uso não abrangido em 16 02 09 a 16 02 13;
- 16 02 15 (*) - Componentes perigosos retirados de equipamento fora de uso;
- 16 02 16 - Componentes retirados de equipamento fora de uso não abrangidos em 16 02 15.

No caso do capítulo 20, os REEE inserem-se quando resultam dos resíduos urbanos ou equiparados, podendo apresentar os códigos ^[36]:

- 20 01 21 (*) - Lâmpadas fluorescentes e outros resíduos contendo mercúrio;
- 20 01 23 (*) - Equipamento fora de uso contendo clorofluorcarbonetos;
- 20 01 35 (*) - Equipamento elétrico e eletrônico fora de uso não abrangido em 20 01 21 ou 20 01 23 contendo componentes perigosos;
- 20 01 36 - Equipamento elétrico e eletrônico fora de uso não abrangido em 20 01 21, 20 01 23 ou 20 01 35.

Os componentes perigosos dos EEE podem incluir acumuladores e pilhas abrangidos em 16 06 e assinalados como perigosos, interruptores de mercúrio, vidro de tubos de raios catódicos e outro vidro ativado, entre outros.

3.6. Sistema de Logística Reversa e Economia Circular Aplicados aos REEE

Como mencionado no capítulo 2.5. Economia Circular, é necessário existir um sistema de logística reversa de forma a ser possível implementar uma economia circular. O sistema de logística reversa aplicado aos REEE encontra-se na Figura 14 e apresenta oito fases.



Figura 14 - Etapas do processo de logística reversa aplicado aos REEE (Adaptado de Alvarez-de-los-Mozos, E, et al) ^[16].

As etapas do processo de logística reversa aplicado aos REEE compreendem ^[16]:

- Recolha e classificação: abrangem as atividades de recolha dos resíduos de diferentes locais de origem para pontos de recolha seletiva e a sua divisão em diferentes grupos que passarão por diferentes fases de tratamento;
- Armazenamento: acumulação de material nas instalações de transporte ou processamento;
- Transporte: transporte entre os pontos de recolha e o local de reciclagem;
- Recuperação e reutilização: transformação dos resíduos em produtos prontos a utilizar;
- Desmantelamento: desmantelamento dos produtos nos seus componentes;

- Separação dos materiais: recuperação dos materiais contaminantes e valiosos;
- Reciclagem e valorização: reciclagem e valorização dos materiais recuperados;
- Eliminação dos resíduos: transporte dos resíduos não recicláveis para aterros ou instalações de incineração.

Algumas empresas e fabricantes de EEE pretendem adotar políticas de reutilização de materiais para combater os efeitos secundários da produção em série, como a acumulação de stock, e reduzir os custos de produção. Para isso, estão a apostar na fabricação de EEE com materiais reciclados. Por exemplo, a empresa Apple™ anunciou que os compartimentos dos modelos *Mac Mini Air* e *MacBook* são feitos de alumínio 100 % reciclado, e que o estanho usado para soldar a placa do *iPhone* é também 100 % reciclado, sem que a qualidade dos produtos finais seja afetada. E ainda, o cobalto presente na bateria do *iPhone* é utilizado na fabricação de baterias novas, depois do equipamento ser entregue no fim da sua vida útil ^[37].

3.7. Entidades Gestoras de REEE em Portugal

O Decreto-Lei n.º 102-D/2020 regula o fluxo de REEE e aplica o princípio da responsabilidade alargada do produtor, isto é, atribui ao produtor do EEE a responsabilidade pela gestão do resíduo quando este atinge o final de vida, podendo esta ser assumida a título individual ou transferida para um sistema integrado de gestão ^[7]. Em Portugal existem 3 entidades licenciadas para a gestão de REEE: o Electrão, a ERP Portugal, e mais recentemente a WEEECYCLE. Estas entidades não tratam nem reciclam os REEE, apenas os recolhem, seja por distribuição de contentores destinados para o efeito, por campanhas de recolha em escolas, centros comerciais, entre outros, ou por contratos com os produtores de EEE. Após a sua recolha, são responsáveis pelo seu encaminhamento para operadores de gestão de resíduos, como por exemplo, a empresa onde decorreu esta dissertação.

3.7.1. Electrão - Associação de Gestão de Resíduos

O Electrão é uma associação de direito privado, de âmbito nacional e sem fins lucrativos licenciada para a gestão de REEE, resíduos de pilhas e acumuladores (RPA) e resíduos de embalagem (RE). A gestão dos EEE e RPA do Electrão funciona através de locais de recolha que posteriormente reencaminham para centros de receção, e por fim para unidades de tratamento e valorização, como se pode ver na Figura 15 ^[38].

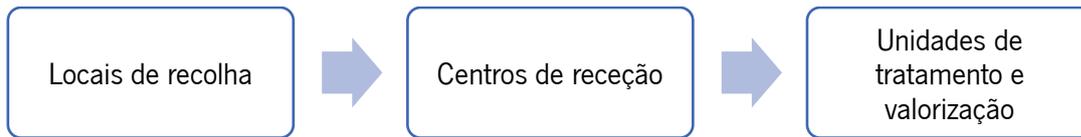


Figura 15 - Sistema integrado de gestão de REEE e RPA do Electrão (Adaptado do Relatório Anual de Atividade do Electrão de REEE em 2019) ^[38].

A gestão dos EEE funciona devido às parcerias realizadas entre o Electrão e os produtores de EEE em Portugal. Na Figura 16 é possível verificar a evolução do número de produtores de EEE aderentes ao longo dos anos, entre 2015 e 2019. Em 2019 o número de produtores aderentes do Electrão reduziu devido ao facto de corresponder ao ano de renovação dos contratos ^[38].

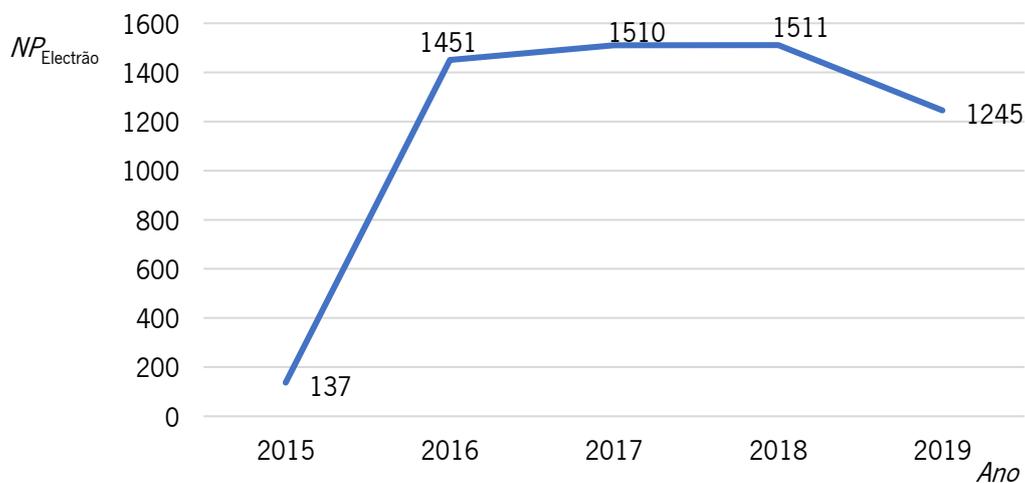


Figura 16 - Evolução do número de produtores de EEE aderentes do Electrão ($NP_{\text{Electrão}}$) de 2015 a 2019 (Adaptado do Relatório Anual de Atividade do Electrão de REEE 2019) ^[38].

Cada produtor aderente coloca no mercado vários EEE referentes às diferentes categorias definidas no Decreto-Lei n.º 102-D/2020. Na Figura 17 encontra-se a distribuição em percentagem dos produtores pelas 6 categorias existentes, em 2019 ^[38].

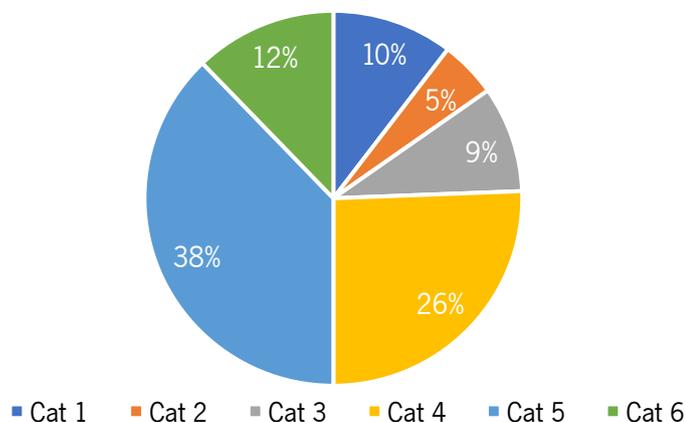


Figura 17 - Percentagem de produtores aderentes do Electrão por tipo de categoria de EEE em 2019 (Adaptado do Relatório Anual de Atividade do Electrão de REEE 2019) ^[38].

O Electrão tem acesso às informações referentes às quantidades de EEE colocadas no mercado pelos seus produtores aderentes. Na Figura 18 encontram-se as quantidades de EEE declarados ao Electrão no ano de 2019, por categoria legal ^[38].

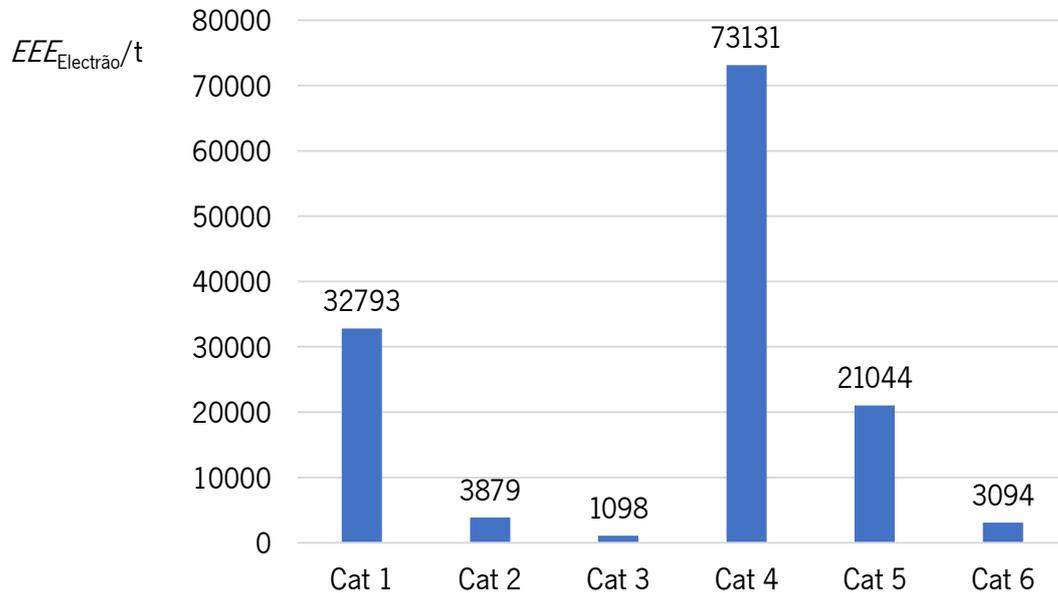


Figura 18 - Quantidade de EEE declarados ao Electrão ($EEE_{\text{Electrão}}$) em 2019 por categoria legal (Adaptado do Relatório Anual de Atividade do Electrão de REEE 2019) ^[38].

Como associação de gestão de resíduos, o Electrão assegurou a recolha de REEE das 6 categorias legais, perfazendo um total a nível nacional de 20414 toneladas no ano de 2019. A Figura 19 apresenta a distribuição das quantidades de REEE recolhidos por categoria legal ^[38].

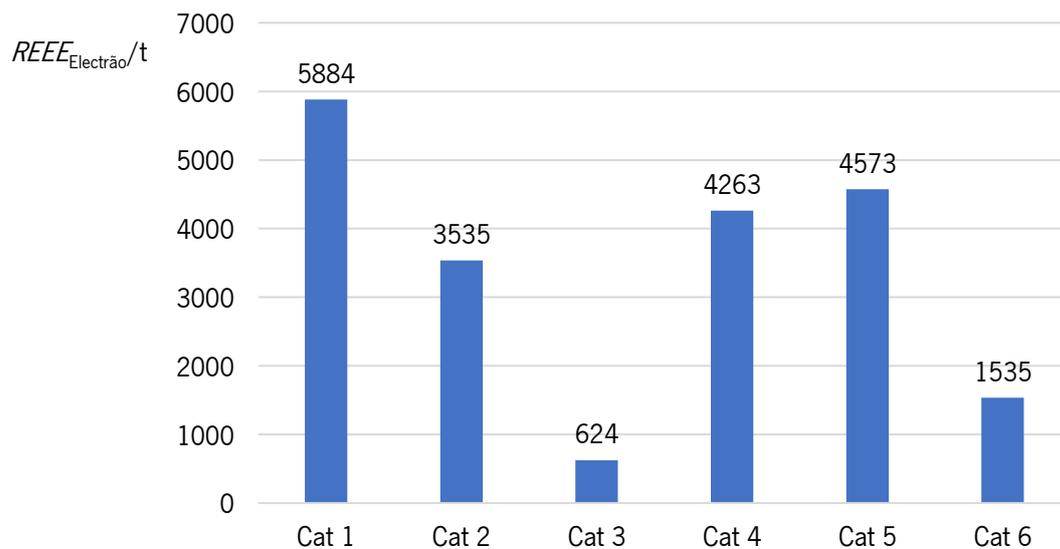


Figura 19 - Quantidade de REEE recolhidos pelo Electrão ($REEE_{\text{Electrão}}$) por categoria legal em 2019 (Adaptado do Relatório Anual de Atividade do Electrão de REEE 2019) ^[38].

Como já mencionado anteriormente, o Decreto-Lei n.º 102-D/2020 define os objetivos mínimos para a valorização e preparação para reutilização e reciclagem dos REEE. Na Tabela 16 encontra-se a comparação das taxas obtidas pelo Electrão no ano de 2019, com os objetivos mínimos definidos por lei ^[7,38].

Tabela 16 - Comparação entre objetivos mínimos (OM) aplicáveis por categoria e as taxas obtidas pelo Electrão ($T_{\text{Electrão}}$) (Adaptado do Relatório Anual de Atividade do Electrão de REEE 2019 e do Decreto-Lei n.º 102-D/2020, de 10 de dezembro) ^[7,38]

Categoria	Valorização		Preparação para reutilização e reciclagem	
	Objetivos	Taxa	Objetivos	Taxa
	mínimos	Electrão	mínimos	Electrão
	OM/%	$T_{\text{Electrão}}/\%$	OM/%	$T_{\text{Electrão}}/\%$
1	85	90	80	82
2	80	44	70	41
3	-	90	80	85
4	85	90	80	86
5	75	93	55	85
6	75	81	55	78

É possível verificar que o Electrão consegue obter taxas superiores aos objetivos mínimos, excetuando a taxa obtida para a categoria 2 que corresponde aos ecrãs, monitores e equipamentos com ecrãs de superfície superior a 100 cm².

3.7.2. ERP Portugal - Associação Gestora de Resíduos

A ERP Portugal é uma pessoa coletiva de direito privado português, sem fins lucrativos, criada em 2005, e que tem como objetivo a gestão de REEE enquanto entidade gestora (EG) de um sistema integrado. A sua licença permite operar em dois fluxos específicos de resíduos: REEE e RPA ^[39].

Ao longo dos anos, a ERP Portugal tem angariado produtores aderentes de forma a poder proceder a uma maior gestão de REEE e de pilhas e acumuladores (PA). Na Figura 20 encontra-se a evolução do número de produtores aderentes entre os anos de 2015 e 2019. Atualmente, a ERP Portugal possui mais de 700 empresas produtoras, tanto de EEE como de PA. Espera-se que ano após ano este número aumente, pois permitirá uma melhoria da gestão destes resíduos ^[39].

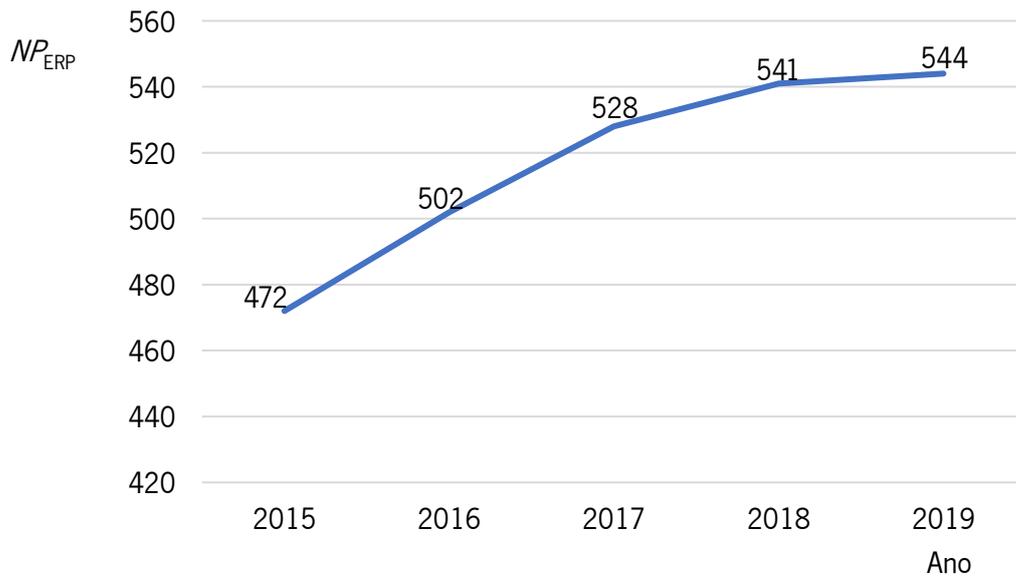


Figura 20 - Evolução dos produtores aderentes da ERP Portugal (NP_{ERP}) de EEE de 2015 a 2019 (Adaptado do Relatório Anual de Atividade da ERP Portugal de REEE 2019) ^[39].

Da mesma forma que o Electrão, a ERP Portugal tem acesso às quantidades de EEE que os seus produtores aderentes colocam no mercado, podendo ainda saber a que categorias pertencem os EEE produzidos. Na Figura 21 encontra-se a representação da distribuição em percentagem dos produtores pelas 6 categorias existentes em 2019 ^[39].

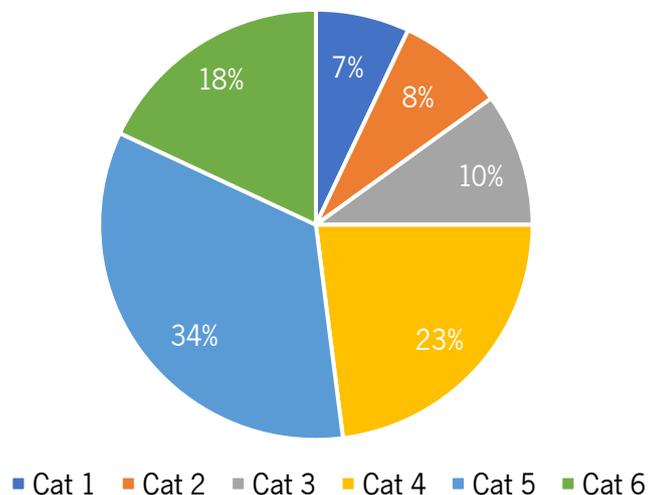


Figura 21 - Percentagem de produtores aderentes da ERP Portugal por tipo de categoria de EEE em 2019 (Adaptado do Relatório Anual de Atividade da ERP Portugal de REEE 2019) ^[39].

Após se visualizar qual a percentagem de produtores aderentes que colocam cada categoria legal no mercado, segue-se na Figura 22 as quantidades desses EEE declaradas à ERP por categoria legal nesse mesmo ano ^[39].

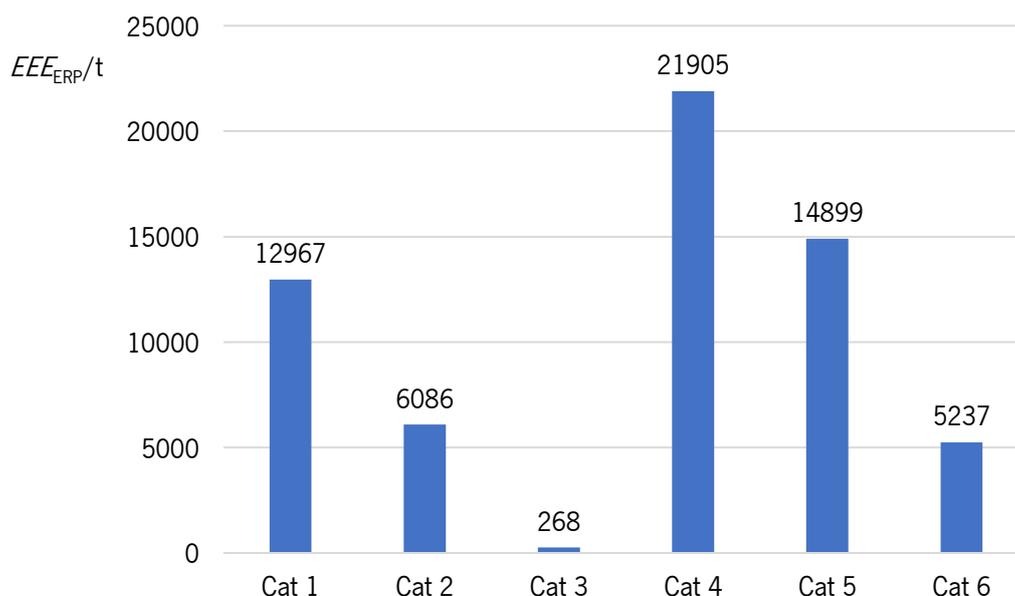


Figura 22 - Quantidade de EEE declarados à ERP Portugal (EEE_{ERP}) em 2019 por categoria legal (Adaptado do Relatório Anual de Atividade da ERP Portugal de REEE 2019) ^[39].

Além dos EEE colocados no mercado em 2019, foram também recolhidos outros, sendo denominados REEE. Na Figura 23 encontram-se as quantidades de REEE recolhidas por categoria legal ^[39].

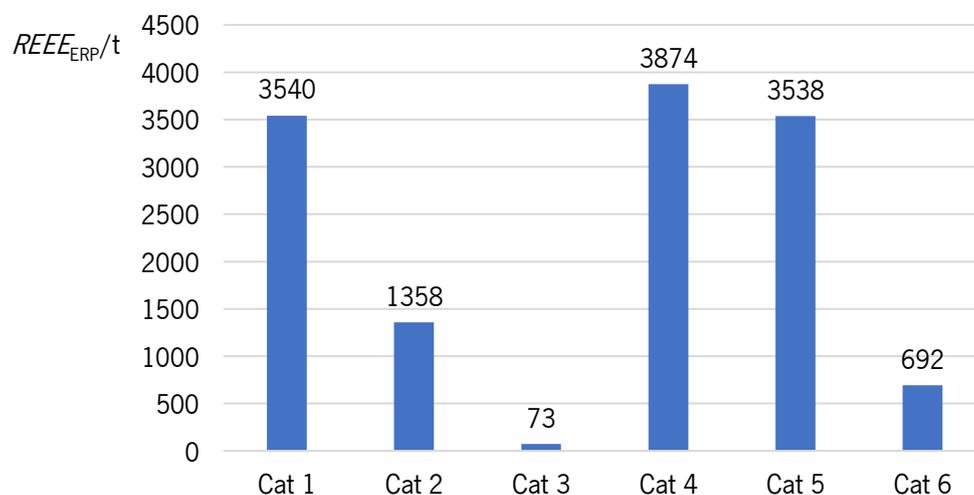


Figura 23 - Quantidade de REEE recolhidas pela ERP Portugal (REEE_{ERP}) por categoria em 2019 (Adaptado do Relatório Anual de Atividade da ERP Portugal de REEE 2019) ^[39].

De forma a comparar as taxas obtidas pela ERP Portugal para a valorização e preparação para reutilização e reciclagem dos REEE, com os objetivos mínimos legais, construiu-se a Tabela 17 ^[7,39]. É possível verificar que mais uma vez não é possível cumprir com as metas definidas para os REEE de categoria 2.

Tabela 17 - Comparação entre objetivos mínimos (OM) aplicáveis por categoria e as taxas obtidas pela ERP Portugal (T_{ERP}) (Adaptado do Relatório Anual de Atividade da ERP Portugal de REEE 2019 e do Decreto-Lei n.º 102-D/2020, de 10 de dezembro) ^[7,39]

Categoria	Valorização		Preparação para reutilização e reciclagem	
	Objetivos	Taxa ERP	Objetivos	Taxa ERP
	mínimos	Portugal	mínimos	Portugal
	OM/%	$T_{ERP}/\%$	OM/%	$T_{ERP}/\%$
1	85	87,22	80	80,49
2	80	41,21	70	38,53
3	-	-	80	95,05
4	85	89,46	80	85,23
5	75	92,69	55	87,56
6	75	87,53	55	81,83

3.7.3. WEEECYCLE - Associação de Produtores de EEE

A WEEECYCLE é a entidade gestora mais recente em Portugal, tendo sido licenciada em julho de 2018, e por essa razão apenas possui dados para o ano de 2019. A WEEECYCLE conta com 88 produtores de EEE aderentes que correspondem a 7520 toneladas de EEE colocados no mercado em 2019. Na Figura 24 é possível verificar a distribuição dessas toneladas por categorias ^[40].

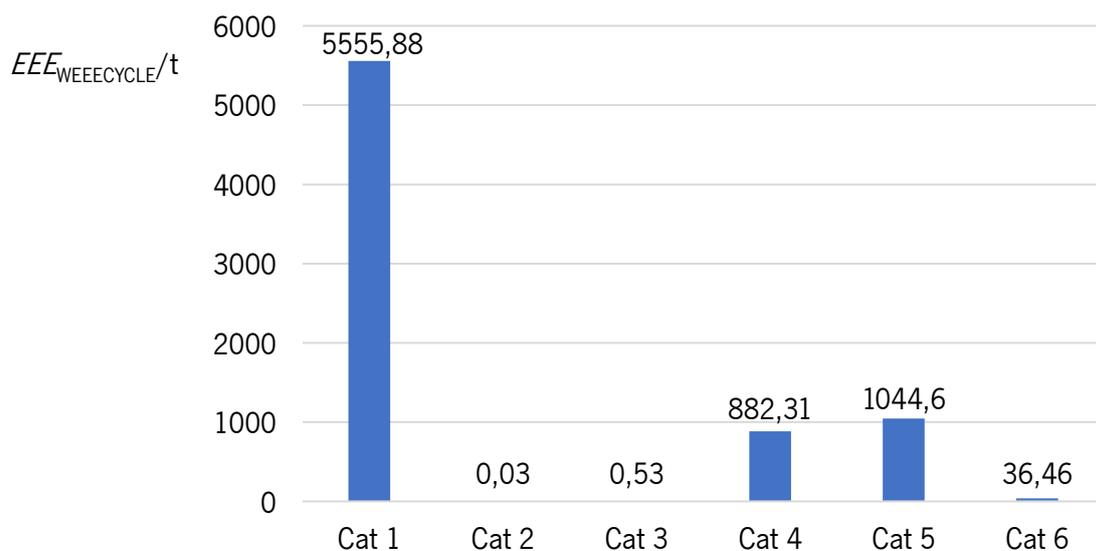


Figura 24 - Quantidade de EEE colocados no mercado pelos produtores aderentes da WEEECYCLE ($EEE_{WEEECYCLE}$) por categoria em 2019 (Adaptado do Relatório Anual de Atividade da WEEECYCLE de REEE 2019) ^[40].

No primeiro ano de atividade, a WEEECYCLE conseguiu cumprir com os vários objetivos mínimos definidos pelo Decreto-Lei n.º 102-D/2020, para valorização e preparação para reutilização e reciclagem, como se pode ver na Tabela 18, excetuando mais uma vez os REEE pertencentes à categoria 2, como as restantes entidades gestoras ^[7,40].

Tabela 18 - Comparação entre objetivos mínimos (OM) aplicáveis por categoria e as taxas obtidas pela WEEECYCLE ($T_{WEEECYCLE}$) (Adaptado do Relatório Anual de Atividade da WEEECYCLE de REEE 2019 e do Decreto-Lei n.º 102-D/2020, de 10 de dezembro) ^[7,40]

Categoria	Valorização		Preparação para reutilização e reciclagem	
	Objetivos	Taxa	Objetivos	Taxa
	mínimos	WEEECYCLE	mínimos	WEEECYCLE
	OM/%	$T_{WEEECYCLE}/\%$	OM/%	$T_{WEEECYCLE}/\%$
1	85	87	80	80
2	80	58	70	56
3	-	91	80	91
4	85	96	80	91
5	75	84	55	80
6	75	97	55	94

3.7.4. Evolução da Gestão dos EEE e dos REEE pelas Entidades Gestoras

Apesar da WEEECYCLE só funcionar desde 2018 é possível analisar a evolução da gestão dos EEE e dos REEE por parte das entidades gestoras em Portugal. Os dados disponíveis permitem analisar as quantidades dos EEE colocados no mercado e REEE recolhidos e valorizados pelas entidades gestoras nos anos de 2011 até 2018, os quais se encontram na Figura 25.

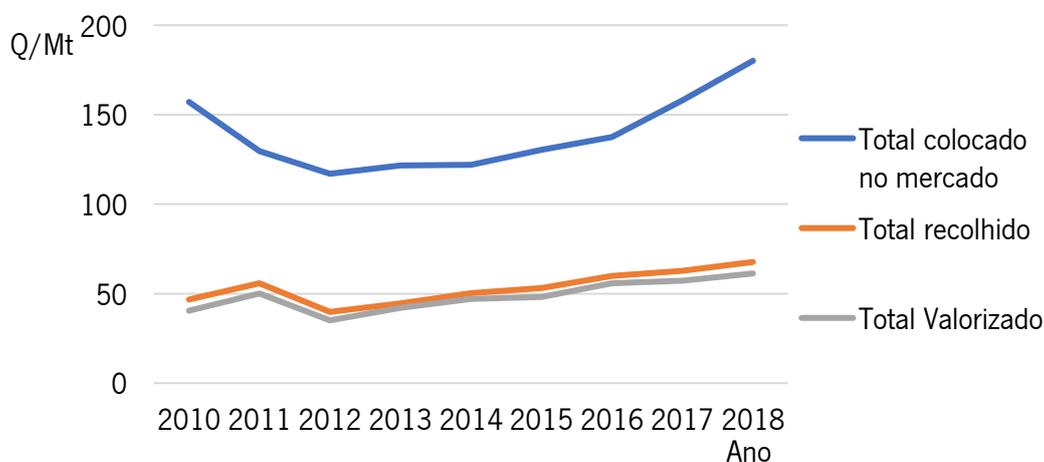


Figura 25 - Evolução das quantidades (Q) dos EEE colocados no mercado e REEE recolhidos e valorizados pelas entidades gestoras nos anos de 2011 até 2018 (Adaptado de APA) ^[41].

Como já mencionado anteriormente, a produção dos EEE tem vindo a aumentar em todo o mundo de forma exponencial. Segundo a Figura 25, entre 2010 e 2012, o total colocado no mercado em Portugal diminuiu, mas posteriormente verifica-se também o crescimento exponencial. Embora ainda não estejam disponíveis os dados de 2019 e 2020, prevê-se que a produção de EEE continuará a aumentar devido ao desenvolvimento tecnológico. Relativamente aos REEE recolhidos, o valor é inferior aos EEE colocados no mercado devido ao facto de as pessoas nem sempre entregarem os seus equipamentos velhos num ponto de recolha o que impossibilita assim a sua valorização.

3.7.5. Incumprimento das Metas Referentes à Categoria 2

As 3 entidades licenciadas em Portugal cumprem os objetivos mínimos estabelecidos no Decreto-Lei n.º 102-D/2020, exceto para os referentes à categoria 2 (ecrãs, monitores e equipamentos com ecrãs de superfície superior a 100 cm²) tanto para a valorização como para a preparação para reutilização e reciclagem. O incumprimento da taxa relativamente a esta categoria ocorre a nível europeu devido à dificuldade no escoamento do vidro de tubos de raios catódicos (CRT) para soluções de reciclagem ^[38].

As televisões e monitores que contêm CRT deixaram de ser fabricados por volta do ano de 2001, mas ainda são recolhidos atualmente. O *WEEE Forum* estimou que no ano de 2020 ainda existiriam 2,4 Mt destes equipamentos por recolher em toda a Europa. Uma vez que ainda não foi publicado o valor real nesse ano assume-se que a estimativa se aproxima do valor real, e por observação desse valor acredita-se que o tratamento dos CRT seja indispensável nos próximos 10 a 15 anos ^[42].

Nos dias de hoje as televisões e monitores são constituídos por ecrãs de cristais líquidos (LCD), diodo emissor de luz (LED), diodo orgânico emissor de luz (OLED), entre outros, que são em formato plano e pesam menos que os de CRT, que apresentam uma parte traseira funda. Devido à diferença de pesos, apesar de serem recolhidos cada vez menos CRT, eles representam a maioria do peso para a categoria 2, cerca de 70 %. Num monitor/televisão de CRT cerca de 60 % do seu peso total é vidro, sendo este composto pelo painel ou vidro frontal e pelo funil ou vidro traseiro, em aproximadamente 65 % e 35 %, respetivamente ^[42].

Um dos maiores problemas dos CRT é o chumbo que contêm, pois cerca de 35 % do seu peso é vidro com chumbo e pode conter entre 1 kg a 1,5 kg de chumbo. Por este motivo é

impossível cumprir com as metas definidas pois não existem tecnologias e instalações suficientes que garantam a reciclagem adequada do vidro com chumbo. Além disso, a preparação para a reutilização de monitores e televisões CRT não é opção por causa do elevado impacto ambiental do uso de CRT em comparação com as tecnologias recentes como LCD e LED. O vidro do painel é considerado resíduo não perigoso, enquanto o vidro de funil é classificado como resíduo perigoso devido ao seu teor de chumbo ^[42].

Assim, de forma a atingir as metas de reciclagem e recuperação é necessário que haja um alinhamento dos regulamentos com as tecnologias existentes, e se realizem ações a curto prazo que promovam a acessibilidade e disponibilidade das tecnologias de reciclagem do vidro inserido nos CRT ^[42].

3.8. Composição química dos REEE

Os REEE são constituídos por uma variedade de materiais como metais ferrosos, metais não ferrosos e não metais (plásticos, vidro, entre outros). A sua composição química varia conforme o tipo, idade, origem e fabricante, mas de uma forma generalizada pode-se assumir que contém cerca de 40 % de material inorgânico como os metais ferrosos e não ferrosos, 30 % de material orgânico como plásticos, retardadores de chama ou fibra de vidro, e 30 % de óxidos refratários como sílica, mica ou alumina, também conhecidos como cerâmica ^[43,44,45]. A composição especificada geral dos REEE encontra-se na Figura 26.

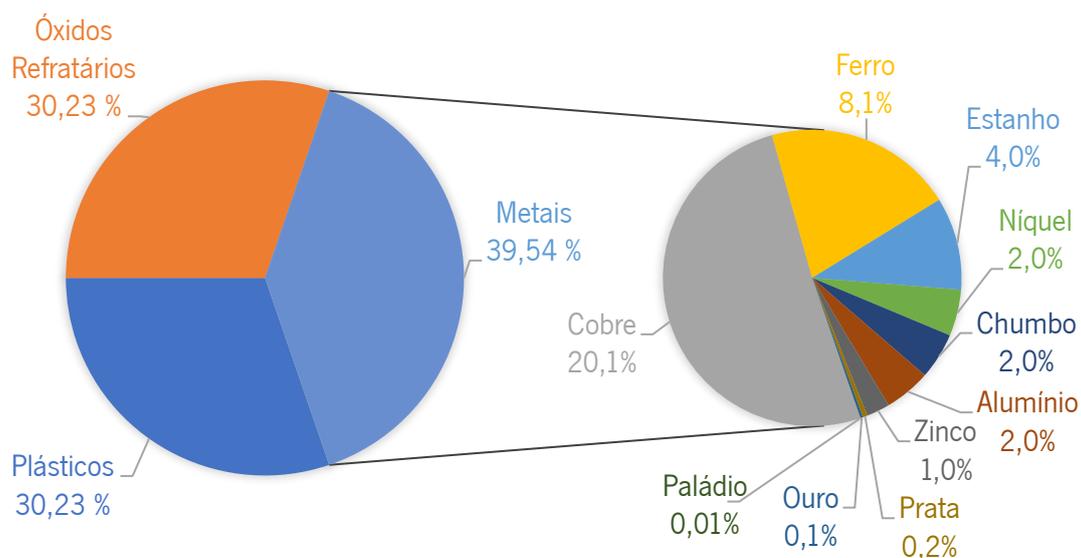


Figura 26 - Composição especificada geral dos REEE (Adaptado de Souza et al. ^[45]).

Os metais, que são a maior fração constituinte dos REEE, podem ser divididos em diferentes grupos, entre eles ^[43,46]:

- Metais básicos: alumínio, ferro, cobre e estanho;
- Metais nobres: prata, ouro e paládio;
- Metais pesados: cádmio, níquel, cromo, zinco, mercúrio, berílio e chumbo;
- Metais de terras raras: gálio, tântalo, platina, lantânio, cério, praseodímio, neodímio, gadolínio e disprósio.

Estima-se que o tratamento e reciclagem de um milhão de telemóveis resulta em 9 000 kg de cobre, 250 kg de prata, 24 kg de ouro e 9 kg de paládio, e que em 2014 os REEE recolhidos mundialmente continham cerca de 300 kg de ouro, o que resultou num ganho de 10,4 biliões de euros ^[44,47]. Após se considerar todos os materiais envolvidos no tratamento dos REEE nesse ano, o valor chegou a atingir os 48 biliões de euros ^[47].

O teor de ouro típico nos REEE encontra-se entre os 80 g/t e 250 g/t, o que é superior ao teor médio do ouro nos próprios minérios de ouro encontrados na natureza. Por esta razão, a presença dos metais preciosos é importante para a economia dos processos de reciclagem de REEE, em que até 90 % do valor ganho no processo provém do teor em ouro e paládio ^[44].

A título de curiosidade e de abrangência global deste tema e fluxo específico, um evento que aderiu à reciclagem dos REEE e à extração dos seus metais preciosos foram os jogos olímpicos e paraolímpicos. O comité organizador dos jogos olímpicos e paraolímpicos de Tóquio orientou o *“Tokyo 2020 Medal Project”* para recolher pequenos REEE para produzir as medalhas olímpicas e paraolímpicas. As medalhas produzidas foram cerca de 5 000 e foram necessárias 78 985 toneladas que equivalem a aproximadamente 6,21 milhões de telemóveis usados. Com este processo foi possível obter-se cerca de 32 kg de ouro, 3 500 kg de prata e 2 200 kg de bronze que permitiram produzir medalhas recicladas ^[48]. Os valores dos metais obtidos são um pouco discrepantes em relação aos mencionados anteriormente devido ao facto de serem estimativas e de os metais que constituem os telemóveis dependerem do ano de fabrico dos mesmos. Provavelmente os telemóveis usados para valorização no *“Tokyo 2020 Medal Project”* eram bastante recentes (realça-se o facto do Japão ser um país com recurso a tecnologia muito acima da média mundial) onde já se utilizam tecnologias de produção que usam menos recursos de valor.

A presença dos metais pesados já não é desejável pois aumentam a complexidade do tratamento dos REEE e a sua reciclagem, e também apresentam riscos ambientais e de saúde por contaminarem o solo e as águas subterrâneas ^[43,49]. Na Tabela 19 encontram-se os metais pesados mais comumente encontrados nos REEE e seus componentes.

Tabela 19 - Metais pesados presentes nos REEE e seus componentes (Adaptado de Ilankoon, I.M.S.K. et al. ^[44])

Metais pesados	REEE/Componentes
Cádmio	Baterias recarregáveis de computador, contactos, interruptores, CRT mais antigos, placas de circuito impresso, detetores infravermelhos, chips semicondutores, máquinas fotocopadoras e telemóveis.
Níquel	Baterias e pistolas de eletrões nos CRT.
Cromo	Caixas de metais com revestimentos anticorrosivos e fitas de dados como as que se usam em cassetes e disquetes.
Zinco	CRT, revestimentos de metais e baterias.
Mercúrio	Dispositivos de iluminação para monitores planos, CRT, placas de circuito impresso, termostatos, sensores, monitores e lâmpadas fluorescentes de cátodo frio.
Berílio	Fontes de alimentação, computadores, máquinas de raio-x e componentes cerâmicos.
Chumbo	CRT, baterias, placas de circuito impresso e lâmpadas.

Nos CRT os valores de cobre variam de 468 mg/kg a 732 mg/kg e os de chumbo de 429 mg/kg a 9 900 mg/kg. Desta forma, o conteúdo médio de chumbo num monitor ou televisão de CRT varia de 1,2 kg a 3,2 kg ^[43]. Já nas placas de circuito impresso, estas contêm plástico, cobre, pequenas quantidades de cromo, solda de chumbo, níquel e zinco ^[32]. O valor de cobre varia de 83 100 mg/kg a 705 300 mg/kg, enquanto o chumbo varia de 18 060 mg/kg a

400 560 mg/kg ^[43]. Estima-se que 500 milhões de computadores em todo o mundo contenham 2,87 Tg de plástico, 716,7 Gg de chumbo e 286 700 kg de mercúrio ^[32].

Já o plástico, que também está presente em grande quantidade, é constituído por vários tipos, entre eles a acrilonitrila-butadieno-estireno (ABS), poliestireno de alto impacto (HIP), polietileno (PE), polipropileno (PP), polietileno tereftalato (PET) e policarbonato (PC) que são separados e reciclados ^[44,45]. Os plásticos anteriormente mencionados podem ser encontrados no seu estado normal, isto é, não contaminado, ou podem ser constituídos por tetrabromobisfenol A (TBBPA), hexabromociclododecano (HBCD) e éter difenílico polibromado (PBDE) que são retardadores de chama bromados (BFR) usados na produção de plásticos resistentes às chamas. O PBDE foi classificado como um poluente orgânico persistente (POP) devido à sua perigosidade e aos problemas que causa na reciclagem dos REEE ^[45].

A composição dos REEE baseada em metais, plásticos e vidro permite a sua reciclagem continua, embora existam alguns que possuem metais pesados, plásticos considerados poluentes orgânicos persistentes (POP) e vidro com chumbo no caso dos tubos de raios catódicos CRT ^[44].

3.9. Desmantelamento e descontaminação dos REEE

O desmantelamento dos REEE permite a separação dos seus componentes em fluxos específicos de materiais como plásticos, metais e óxidos refratários ^[45]. A reintrodução destes materiais nos processos produtivos de pequenos eletrodomésticos ou outros produtos que utilizem estas matérias-primas permite assumir o conceito de economia circular e reduzir o uso de matérias virgens, a poluição da água e do ar ^[37].

De forma a se proceder à reciclagem e valorização dos REEE, é necessário realizar o seu desmantelamento e separar os diferentes materiais em metais ferrosos, metais não ferrosos, vidro, plásticos e outros componentes como placas de circuito impresso ^[23]. Além destes componentes existem também os contaminantes como pilhas, baterias e *toners*. O Decreto-Lei n.º 102-D/2020 lista estas substâncias, misturas e componentes prejudiciais ao ambiente que devem ser retirados de todos os REEE, sendo estes ^[7]:

- Condensadores com policlorobifenilos (PCB);
- Componentes contendo mercúrio, como interruptores ou lâmpadas de retroiluminação;
- Pilhas e baterias;

- Placas de circuitos impressos (PCI) de telemóveis em geral e de outros aparelhos, se a sua superfície for superior a 10 centímetros quadrados;
- Cartuchos de toner, líquido e pastoso, bem como de toner de cor;
- Plásticos contendo retardadores de chama bromados (BFR);
- Resíduos de amianto e componentes contendo amianto;
- Tubos de raios catódicos (CRT);
- Clorofluorocarbonetos (CFC), hidroclorofluorocarbonetos (HCFC) hidrofluorocarbonetos (HFC) e hidrocarbonetos (HC);
- Lâmpadas de descarga de gás;
- Ecrãs de cristais líquidos (LCD) e todos os ecrãs retroiluminados por lâmpadas de descarga de gás;
- Cabos elétricos;
- Componentes contendo fibras cerâmicas refratárias;
- Componentes contendo substâncias radioativas;
- Condensadores eletrolíticos que contenham substâncias que causam preocupação.

Além da sua remoção seletiva, é necessário também retirar o revestimento fluorescente dos tubos de raios catódicos. Em relação aos equipamentos que contenham gases que empobrecem a camada de ozono ou que tenham um potencial de aquecimento global (GWP) superior a 15, estes têm de ser devidamente extraídos e tratados. Por fim, o mercúrio deve ser retirado das lâmpadas de descarga de gás ^[7].

4. Gestão dos REEE na Empresa de Acolhimento

4.1. Receção e Descontaminação dos REEE

Dos vários códigos LER existentes para a classificação de REEE, a empresa apenas está licenciada para receber os REEE relativos aos códigos:

- 16 02 14 - Equipamento fora de uso não abrangido em 16 02 09 a 16 02 13;
- 16 02 16 - Componentes retirados de equipamento fora de uso não abrangidos em 16 02 15;
- 20 01 21 (*) - Lâmpadas fluorescentes e outros resíduos contendo mercúrio;
- 20 01 35 (*) - Equipamento elétrico e eletrónico fora de uso não abrangido em 20 01 21 ou 20 01 23 contendo componentes perigosos;
- 20 01 36 - Equipamento elétrico e eletrónico fora de uso não abrangido em 20 01 21, 20 01 23 ou 20 01 35.

Os componentes perigosos dos EEE podem incluir acumuladores e pilhas abrangidos em 16 06 e assinalados como perigosos, interruptores de mercúrio, vidro de tubos de raios catódicos e outro vidro ativado, entre outros.

Na receção dos REEE, caso se verifique que o código LER não está correto, procede-se à realização de uma não conformidade e a carga é rejeitada até à correção da guia de transporte do resíduo para o LER correto ou mais adequado ao resíduo, sendo este posteriormente tratado consoante o novo código.

Apesar da empresa ter licença para receber resíduos classificados com códigos LER 20 01 21 (*) e 20 01 35 (*) referentes a resíduos perigosos, apenas os pode armazenar. As lâmpadas ou outros resíduos com mercúrio, e por exemplo, as televisões que contêm CRT serão apenas armazenados de forma temporária e posteriormente encaminhados para outros operadores de resíduos licenciados para o efeito. A operação de valorização que lhes é aplicada é a R13.

No caso dos REEE serem classificados com os códigos LER para resíduos não perigosos, procede-se à sua triagem seguida de desmantelamento de forma a separar os seus componentes. Nesta situação, a operação de valorização aplicada é a R12G. No entanto, os REEE podem conter componentes perigosos, como por exemplo, um telemóvel com bateria ou um rádio com pilhas, e é necessário realizar a sua descontaminação através da remoção dos contaminantes.

Posteriormente, os componentes perigosos são classificados como resíduos perigosos e encaminhados para outros operadores de resíduos licenciados, enquanto os equipamentos descontaminados seguem para desmantelamento nas instalações da empresa.

Na Figura 27 encontra-se o fluxograma do processo da recepção dos REEE nas instalações da empresa.

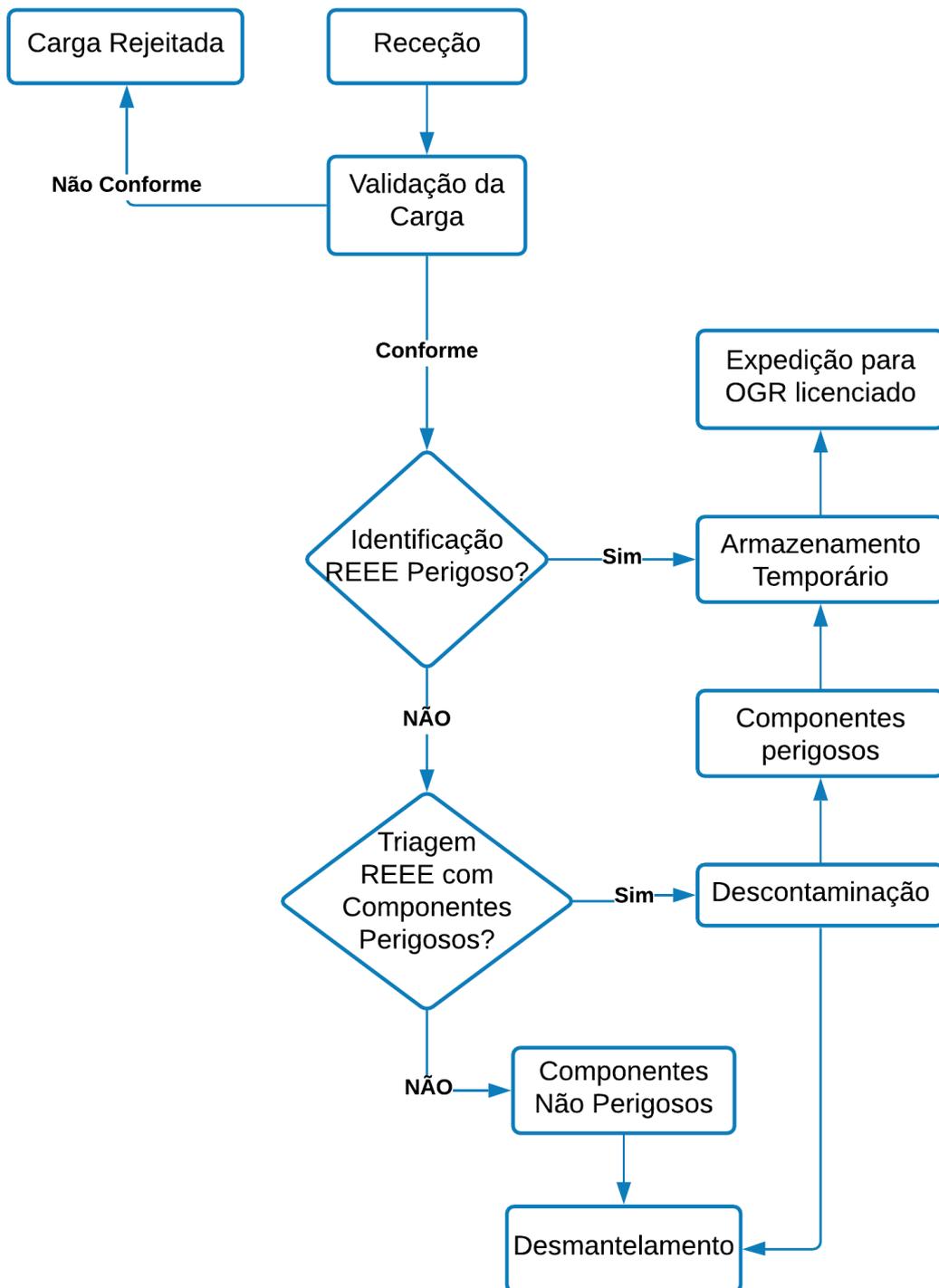


Figura 27 - Fluxograma da recepção dos REEE nas instalações da empresa.

Os componentes não perigosos removidos dos REEE são variados e podem ser separados de uma forma geral em metais ferrosos, metais não ferrosos, plástico, vidro e cablagens, como se pode ver na Figura 28. Podem ainda encontrar-se componentes como placas, motores, disjuntores, ventoinhas, entre outros.

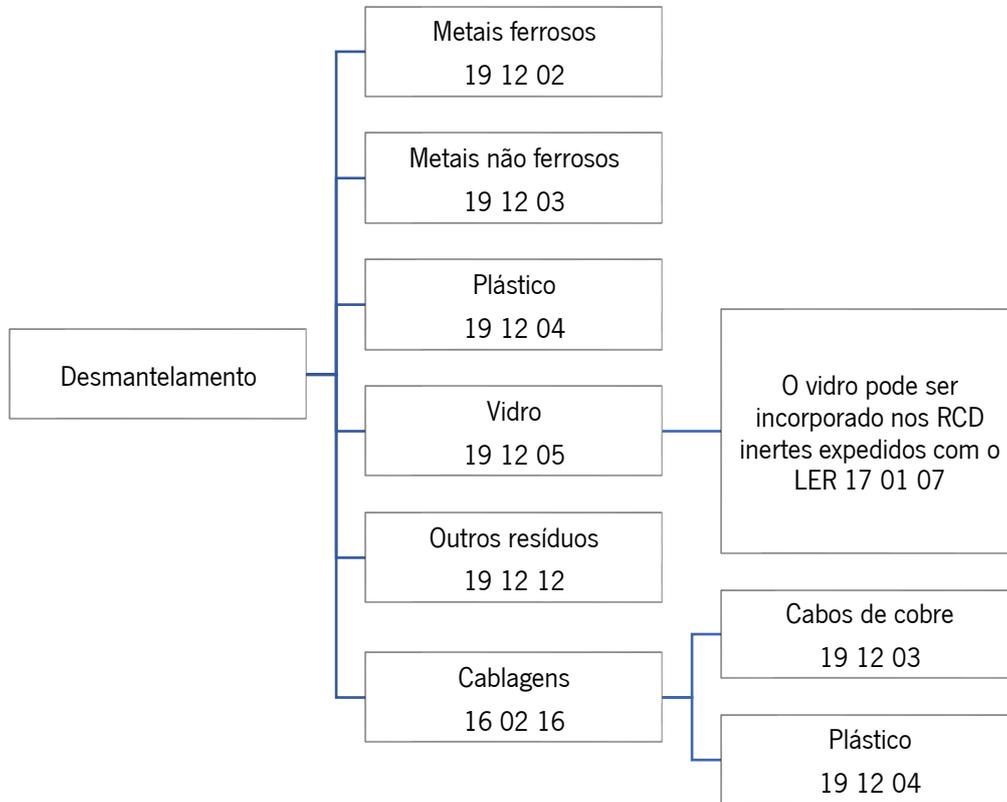


Figura 28 - Principais componentes resultantes do desmantelamento de REEE na empresa.

A empresa desmantela os REEE que estão inseridos nas categorias 4, 5 e 6 de forma manual com recurso a pequenas ferramentas. Em cada operação de desmantelamento os componentes resultantes são pesados e registados na folha de registo de monitorização do desmantelamento dos REEE que se encontra no anexo B, na Tabela B.1. No início do ano de 2021, devido a um novo contrato, passou a receber mais REEE da categoria 5.

4.2. Desmantelamento Teste dos REEE Pertencentes à Categoria 5

Na categoria 5 inserem-se, de um modo geral, os pequenos eletrodomésticos como aspiradores, máquinas de café, secadores de cabelo, micro-ondas, máquinas de barbear elétricas, entre outros. A empresa já recebia REEE desta categoria, como autorrádios, mas nunca pequenos eletrodomésticos nem em quantidades tão elevadas. Uma vez que os pequenos eletrodomésticos são REEE que nunca tinham sido desmantelados na empresa, foi decidido realizar um

desmantelamento teste à primeira carga de forma a verificar qual o tempo e operadores necessários, e quais os componentes resultantes.

Durante a operação de desmantelamento teste da carga foram recolhidos registos fotográficos dos REEE desmantelados e componentes resultantes. Na Figura 29 encontra-se uma torradeira antes de sofrer a operação R12G, e nas Figuras 30, 31, 32, 33, 34 e 35 os componentes resultantes do seu desmantelamento.



Figura 29 - REEE da categoria 5 para ser desmantelado: torradeira.

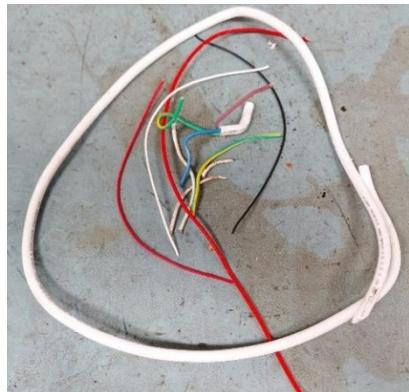


Figura 30 - Cabos resultantes do desmantelamento de uma torradeira.



Figura 31 - Ficha resultante do desmantelamento de uma torradeira.

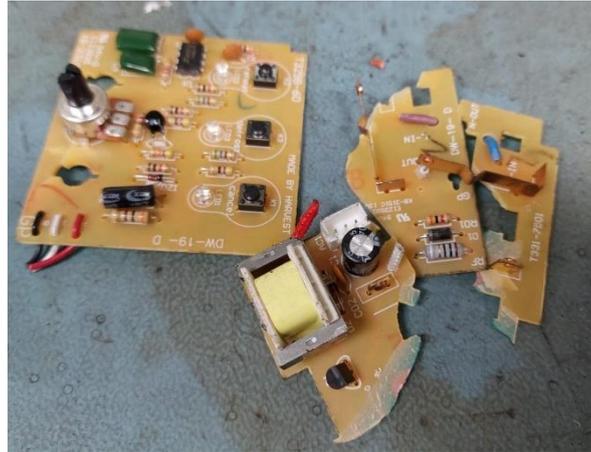


Figura 32 - Placas resultantes do desmantelamento de uma torradeira.



Figura 33 - Plástico resultante do desmantelamento de uma torradeira.



Figura 34 - Sucata ligeira, metal ferroso, resultante do desmantelamento de uma torradeira.

No caso da Figura 34, em caso de dúvida de se tratar de metais ferrosos ou não ferrosos, utiliza-se um íman como auxiliar de decisão. Caso o metal se agarre ao íman, trata-se de um metal ferroso. Se o metal não se agarrar ao íman, então trata-se de um metal não ferroso. A sucata é

distinguida entre sucata ligeira e sucata grossa. A sucata ligeira tem uma espessura inferior a cerca de 6 mm, e a sucata grossa possui espessura superior.



Figura 35 - Rejeitado resultante do desmantelamento de uma torradeira.

Relativamente ao rejeitado, que se encontra na Figura 35, é constituído por componentes que não são passíveis de serem reciclados ou que não se inserem em nenhum fluxo dos componentes resultantes, sendo assim encaminhados para eliminação em destino final adequado e licenciado.

Existe uma enorme variedade de pequenos eletrodomésticos, e o próximo exemplo é um aquecedor termoventilador que se encontra na Figura 36.



Figura 36 - REEE da categoria 5 para ser desmantelado: aquecedor termoventilador.

Os componentes resultantes do seu desmantelamento encontram-se nas Figuras 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43 e 44.



Figura 37 - Alumínio, metal não ferroso, resultante do desmantelamento de um aquecedor termoventilador.

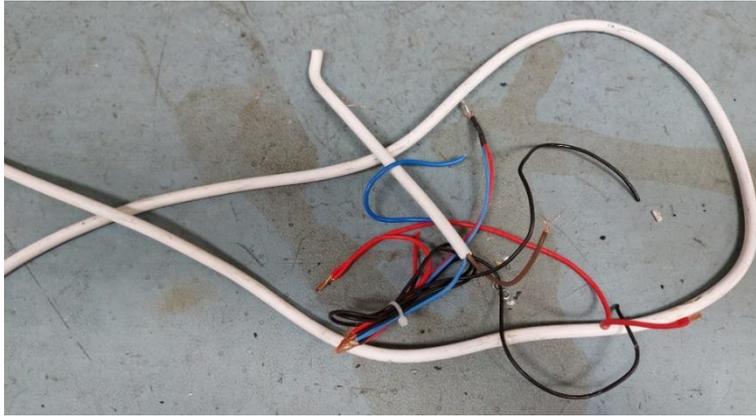


Figura 38 - Cabos resultantes do desmantelamento de um aquecedor termoventilador.



Figura 39 - Cobre resultante do desmantelamento de um aquecedor termoventilador.

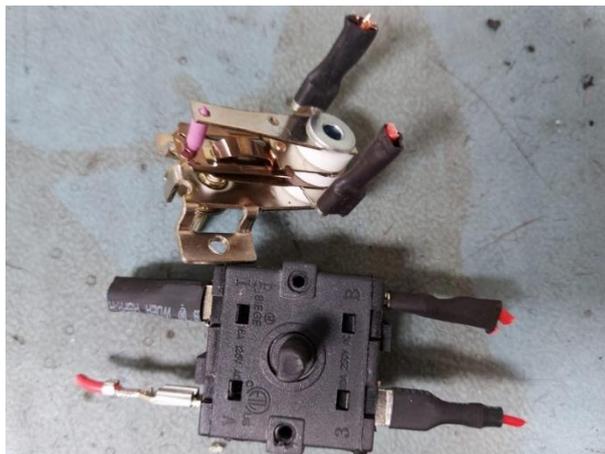


Figura 40 - Componentes resultantes do desmantelamento de um aquecedor termoventilador.

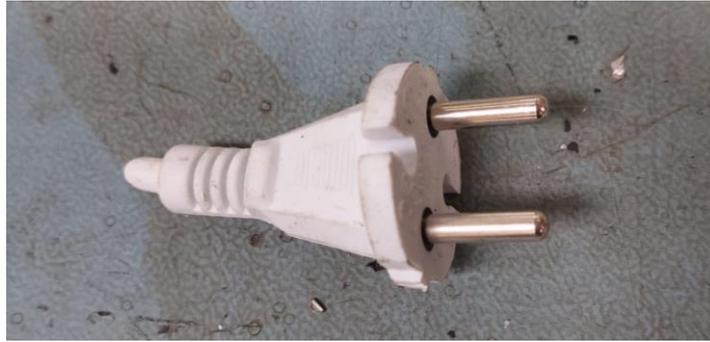


Figura 41 - Ficha resultante do desmantelamento de um aquecedor termoventilador.



Figura 42 - Plástico resultante do desmantelamento de um aquecedor termoventilador.

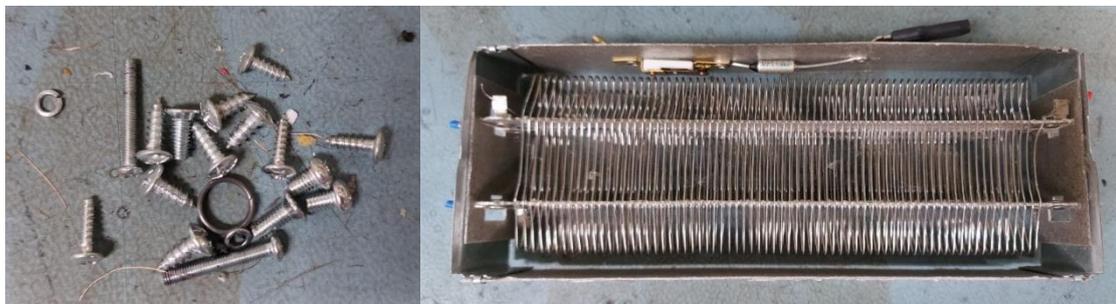


Figura 43 - Sucata ligeira, metal ferroso, resultante do desmantelamento de um aquecedor termoventilador.



Figura 44 - Rejeitado resultante do desmantelamento de um aquecedor termoventilador.

Na Figura 44 o rejeitado é uma peça de plástico com resíduos de cobre, pois o plástico apenas pode ser reciclado se nele não estiverem contidos elementos metálicos como molas, parafusos, ou, neste caso, cobre. Como não foi possível remover todo o cobre presente na peça, esta irá ser rejeitada e encaminhada para eliminação em destino final adequado e licenciado.

A torradeira e o termoventilador são apenas dois exemplos dos vários REEE que constituíram esta carga e os componentes resultantes não compensam o tempo utilizado no seu desmantelamento. O desmantelamento teste dos REEE pertencentes à categoria 5 permitiu verificar que os pequenos eletrodomésticos são constituídos por peças demasiado pequenas que necessitam de ser desmontadas, desaparafusadas ou até mesmo arrancadas, o que requer muito tempo e mão de obra. Assim, o seu desmantelamento manual não é realizável em tempo útil devido à elevada quantidade e dificuldade de desmontagem, e é necessário encontrar uma alternativa.

4.3. Desmantelamento Comparativo dos REEE Pertencentes à Categoria 6

Os REEE pertencentes à categoria 6 já eram desmantelados na empresa, e neles estão incluídos os routers e torres de computador. São REEE que embora também sejam de pequenas dimensões são fáceis de desmantelar, comparativamente aos que pertencem à categoria 5, e os componentes resultantes são mais valorizáveis e existe menos fração de rejeitado.

Na Figura 45 encontra-se um router antes de ser desmantelado, e na Figura 46, 47, 48, 49 e 50 os componentes resultantes.



Figura 45 - REEE da categoria 6 para ser desmantelado: Router.



Figura 46 - Plástico resultante do desmantelamento de um router.



Figura 47 - Cabos resultantes do desmantelamento de um router.



Figura 48 - Alumínio, metal não ferroso, resultante do desmantelamento de um router.



Figura 49 - Sucata ligeira, metal ferroso, resultante do desmantelamento de um router.



Figura 50 - Placa resultante do desmantelamento de um router.

O router foi de rápido desmantelamento e os componentes resultantes compensam o desmantelamento manual. O mesmo se aplica a uma torre de computador, como a que se encontra na Figura 51.



Figura 51 - REEE da categoria 6 para ser desmantelado: Torre de computador.

Os seus componentes encontram-se na Figura 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59 e 60.



Figura 52 - Plástico resultante do desmantelamento de uma torre de computador.



Figura 53 - Componentes resultantes do desmantelamento de uma torre de computador.



Figura 54 - Fita cobre resultante do desmantelamento de uma torre de computador.



Figura 55 - Fonte de alimentação resultante do desmantelamento de uma torre de computador.



Figura 56 - Leitor de CD (esquerda) e disco rígido (direita) resultantes do desmantelamento de uma torre de computador.



Figura 57 - Alumínio, metal não ferroso, resultante do desmantelamento de uma torre de computador.



Figura 58 - Placas resultantes do desmantelamento de uma torre de computador.

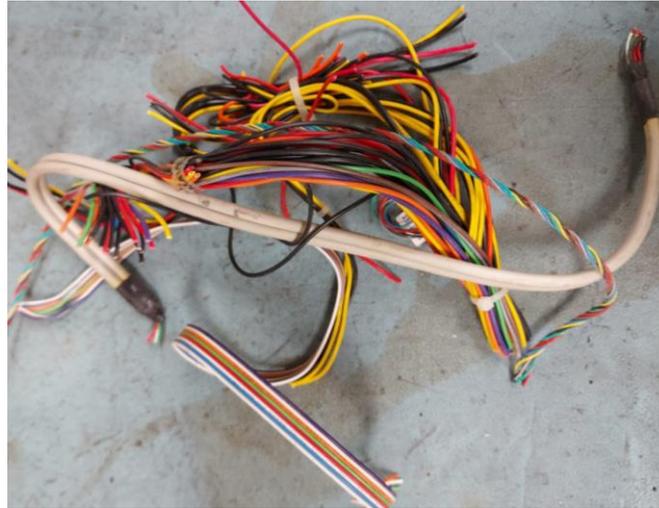


Figura 59 - Cabos resultantes do desmantelamento de uma torre de computador.



Figura 60 - Sucata ligeira, metal ferroso, resultante do desmantelamento de uma torre de computador.

4.4. Componentes Gerais Resultantes do Desmantelamento dos REEE

Cada REEE apresenta diferentes componentes conforme a categoria em que está inserido, e até mesmo entre REEE dentro da mesma categoria, mas de um modo geral é possível classificar em categorias comuns a todos como, por exemplo, ventoinhas, balastros, componentes, resistências, disjuntores, fitas cobre, barramentos e transformadores que se encontram nas Figuras 61, 62, 63, 64, 65, 66, 67 e 68, respetivamente.

Os componentes mencionados na Figura 63 incluem todos os componentes desde fichas de isqueiro, USB, *Jack* 3,5 mm, entre outras. Apesar de terem este nome são uma categoria de componentes resultantes do desmantelamento, como se pode verificar pela Tabela A.1.



Figura 61 - Ventoinhas obtidas do desmantelamento dos REEE referentes às categorias 4, 5 e 6.



Figura 62 - Balastros obtidos do desmantelamento dos REEE referentes às categorias 4, 5 e 6.



Figura 63 - Componentes obtidos do desmantelamento dos REEE referentes às categorias 4, 5 e 6.



Figura 64 - Resistências obtidas do desmantelamento dos REEE referentes às categorias 4, 5 e 6.



Figura 65 - Disjuntores obtidos do desmantelamento dos REEE referentes às categorias 4, 5 e 6.



Figura 66 - Fitas cobre obtidas do desmantelamento dos REEE referentes às categorias 4, 5 e 6.



Figura 67 - Barramentos obtidos do desmantelamento dos REEE referentes às categorias 4, 5 e 6.



Figura 68 - Transformadores obtidos do desmantelamento dos REEE referentes às categorias 4, 5 e 6.

5. Implementação de uma Linha de Desmantelamento para a Reciclagem de REEE

5.1. Requisitos da empresa

O desmantelamento manual dos REEE pertencentes à categoria 5 não apresenta uma opção muito eficiente e necessita de uma solução ótima com melhor relação custo-tempo-benefício. A melhor forma de substituir e otimizar o desmantelamento manual é automatizar o processo, através de uma linha de desmantelamento. Para isso é necessário estudar alguns parâmetros e ter em conta os requisitos da empresa para o projeto. A empresa pretende que a sua implementação permita:

- desmantelar REEE pertencentes à categoria 5;
- um benefício da produtividade (kg/h);
- a incorporação das frações resultantes na economia circular;
- um retorno financeiro a longo prazo.

A produtividade da empresa relativamente ao desmantelamento dos REEE da categoria 5, antes de receber as cargas com os pequenos eletrodomésticos, é cerca de 12 vezes inferior à produtividade necessária após a receção dos mesmos.

5.2. Processo tradicional para a reciclagem dos REEE

A reciclagem tradicional dos REEE é realizada através da trituração dos mesmos. O primeiro passo a realizar consiste na descontaminação, isto é, desmantelamento manual de forma a se remover pilhas, tinteiros, cabos, madeiras, ou componentes não trituráveis. As pilhas e os tinteiros são resíduos perigosos e por essa razão não podem ser triturados. Os cabos podem-se enrolar nas lâminas ao longo do processo de trituração e por isso é mais seguro serem previamente removidos. As madeiras, ou outros materiais semelhantes que não façam parte da normal composição dos REEE devem ser removidos para não contaminar o resultado triturado, pois não existe forma de serem removidos posteriormente. Por fim, os materiais não trituráveis devem ser removidos para não estragar as lâminas e ser possível prolongar a sua vida útil. Os passos necessários para a reciclagem mecânica dos REEE são apresentados na Figura 69.

Após a etapa da descontaminação é possível encaminhar os REEE para uma pré-trituradora que os tritura parcialmente e onde é necessária uma separação manual para remover componentes que já estejam soltos como placas de circuito impresso (PCI), condensadores, fios,

entre outros. Depois desta etapa é que ocorre a trituração dos REEE em fragmentos com cerca de 40 mm. Nesta fase, os fragmentos são separados por uma banda magnética de forma a remover os metais ferrosos, e de seguida passam por correntes de *Eddy* para separar os metais não ferrosos dos plásticos e de outros componentes não metálicos.

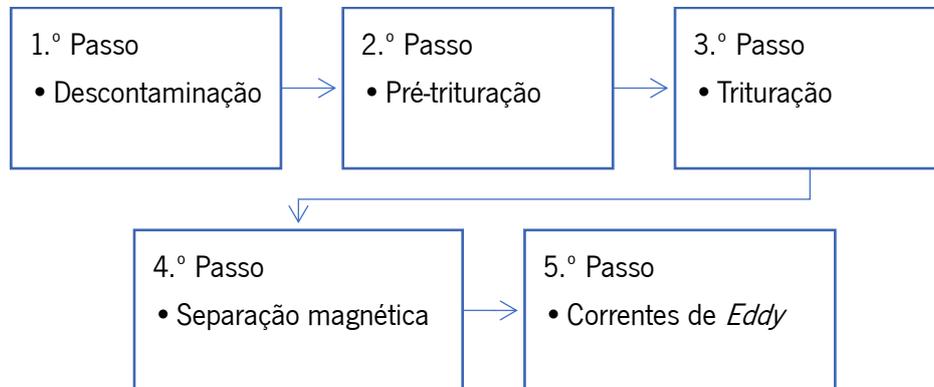


Figura 69 - Passos necessários para a reciclagem mecânica dos REEE.

Complementarmente, pode-se ainda recorrer ao moinho de bolas, quando se pretende recuperar metais preciosos onde os resíduos sofrem redução de tamanho devido ao impacto com as bolas do moinho, ou à separação por gravidade para se clarificar as frações resultantes de metais ferrosos e não ferrosos através do movimento relativo das partículas com base na gravidade, embora não seja tão usual ^[43,50].

5.2.1. MTB™

A MTB™ é uma empresa que vende máquinas para a reciclagem dos REEE e outros resíduos. Para o 2º passo da reciclagem dos REEE pertencentes à categoria 5 sugerem a tesoura rotativa RSX 1200, que se encontra na Figura 70, que tritura parcialmente os REEE e a produtividade recomendada é de 500 kg/h.



Figura 70 - Tesoura rotativa RSX 1200.

Devido à distância entre as lâminas, como se pode verificar na Figura 71, os equipamentos mais pequenos como os autorrádios, que são um dos principais resíduos rececionados na empresa, têm pouca probabilidade de serem destruídos.



Figura 71 - Lâminas da tesoura rotativa RSX 1200.

Para o 3º passo, que consiste na trituração, sugerem a trituradora BDR 1645 que permite reduzir os REEE em fragmentos com cerca de 40 mm. De forma a se perceber o produto final de cada trituração a MTB™ forneceu fotos reais dos resultados obtidos. Na Figura 72 encontram-se os REEE após a etapa de pré-trituração (à esquerda) e a etapa de trituração (à direita).



Figura 72 - REEE após pré-trituração na RSX 1200 (à esquerda) e após trituração na BDR 1645 com um tamanho de 40 mm (à direita).

O orçamento para a tesoura rotativa RSX 1200 é de 300 000 € (sem IVA) e a trituradora BDR 1645 tem um custo de 400 000 € (sem IVA).

Para o funcionamento da RSX 1200 e da BDR 1645 é necessário um funcionário que é responsável por inserir os resíduos na RSX 1200 com recurso a uma pá carregadora ou empilhador, e são necessários mais três para o passo anterior de descontaminação. Após passar

na RSX 1200, e devido à automatização do processo, os resíduos passam para a BDR 1645 através de um tapete rolante, e saem desta por outro. O preço unitário do tapete rolante é de 7 500 €. Contabilizando o custo energético, tendo em conta o valor de 0,0786 € por kWh, os encargos associados à mão de obra e as prestações da tesoura rotativa RSX 1200, da trituradora BDR 1645 e dos dois tapetes rolantes, e de acordo com uma Taxa Anual Nominal (TAN) de 3,105 %, o custo mensal é de 20 316 € considerando a amortização do investimento em 5 anos ^[51,52]. Este valor não engloba o transporte, montagem e instalação dos equipamentos.

De todos os preços mencionados daqui para a frente para a aquisição das máquinas, nenhum deles inclui os custos de instalação, montagem e transporte, à exceção do *Tomra Combisense*, e todos terão os custos mensais calculados de acordo com o custo energético, mão de obra, TAN de 3,105 % e amortização do investimento em 5 anos.

5.2.2. Regulator Cetrisa™

O Regulator Cetrisa™ é uma empresa fabricante de equipamentos para a separação de metais ferrosos e metais não ferrosos. O 4º e 5º passos da reciclagem dos REEE necessitam de uma banda magnética e de correntes de *Eddy*, respetivamente.

A banda magnética pode ser aplicada de forma transversal ou longitudinal ao tapete rolante onde se encontram os fragmentos, como se pode ver na Figura 73. O orçamento dado é de 11 420 € (sem IVA) e tem um custo mensal de 231 € incluindo o gasto energético. O valor do tapete rolante já está incorporado no valor da RSX 1200 e BDR 1645.

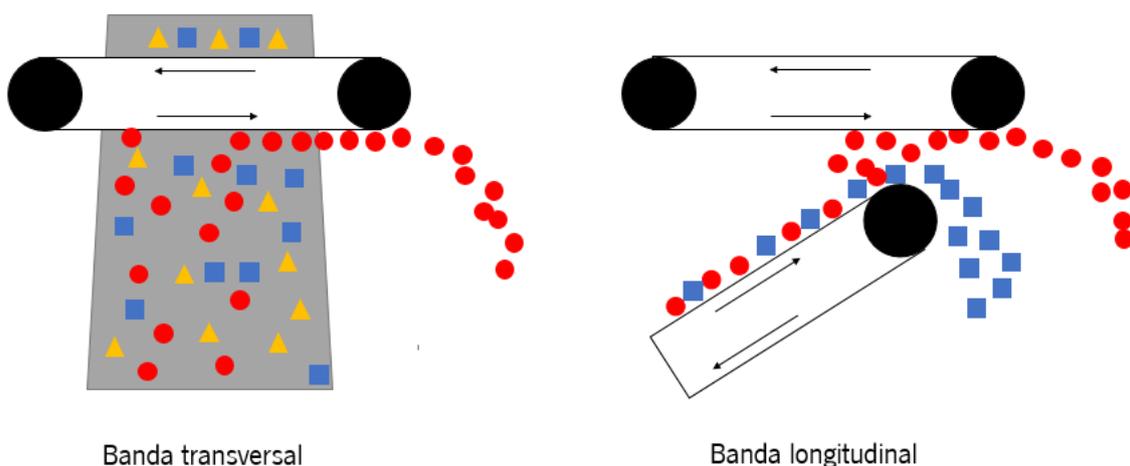


Figura 73 - Instalações possíveis para a banda magnética.

Quando um metal não ferroso está sujeito a um campo magnético alternativo são produzidas correntes internas chamadas de correntes de *Eddy*. Estas correntes geram um campo

magnético que se opõe ao campo magnético gerado por um íman. Esta forte oposição de campos magnéticos provoca a repulsão entre eles e, portanto, o metal não ferroso será literalmente expulso do tapete, sendo separado do resto dos materiais, como se pode ver na Figura 74.

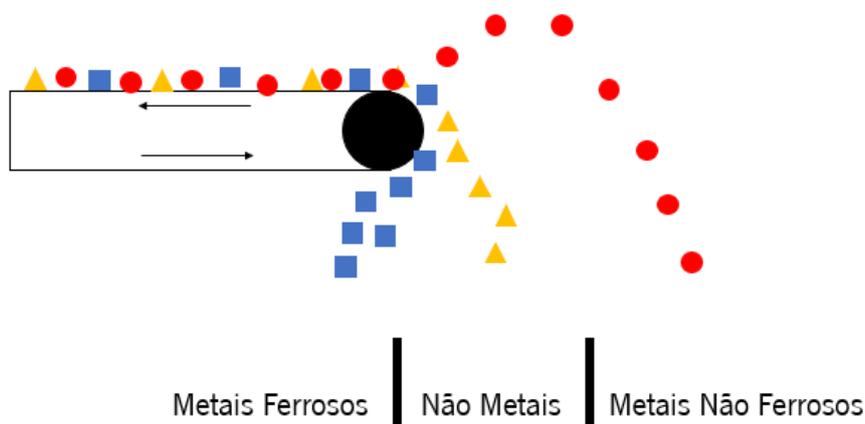


Figura 74 - Funcionamento das correntes de *Eddy*.

Os metais não ferrosos são repulsos do tapete e recolhidos a uma distância maior do equipamento. Os metais ferrosos que ainda restam na mistura são agarrados ao tapete e recolhidos por debaixo deste. Os não metais por não serem influenciados por estas correntes, percorrem o seu caminho normal. As correntes de *Eddy* têm um orçamento de 38 295 € (sem IVA) e um custo mensal inerente de 706 € incluindo o gasto energético.

5.2.3. Custo total do processo tradicional para a reciclagem dos REEE

O processo tradicional para a reciclagem dos REEE necessita de quatro equipamentos cujos custos já foram mencionados anteriormente. Na Tabela 20 encontra-se o resumo com o valor de aquisição total e custo de operação mensal a pagar por este processo.

Tabela 20 - Resumo com valor total e custo mensal do processo tradicional para a reciclagem dos REEE

Passo	Equipamento	Preço de aquisição / (€)	Custo mensal de operação / (€)
2	RSX 1200	300 000	12 016
3	BDR 1645	400 000	8 035
-	Tapetes rolantes	15 000	264
4	Banda magnética	11 420	231
5	Correntes de <i>Eddy</i>	38 295	706
Total		764 715	21 254

5.3. Novos métodos para a reciclagem dos REEE

Com o passar do tempo e com a evolução das tecnologias surgem novos métodos e equipamentos para a reciclagem dos REEE, assim como novas necessidades.

5.3.1. Separação por Sensores

A separação por sensores é um dos métodos de reciclagem mais recentes no mercado, mas necessita na mesma do primeiro método tradicional para a reciclagem de REEE, a trituração. Os equipamentos constituídos por estes sensores são utilizados para separar as frações resultantes do desmantelamento por trituração de uma forma mais seletiva, permitindo não só separar metais ferrosos, metais não ferrosos e plásticos, mas também separar de acordo com a cor ou forma. Assim, ao invés de se obter apenas três frações de materiais (metais ferrosos, metais não ferrosos e plásticos) obtém-se além destas, frações de pilhas, PCI e cabos. É também possível separar o alumínio, latão e cobre na fração dos metais não ferrosos, e separar os plásticos por cores.

5.3.1.1. Sesotec™

A Sesotec™ é uma empresa que fabrica sistemas de separação ótica e utiliza até três sensores. Na Figura 75 encontra-se o *Sesotec Varisort Compact* que é o equipamento sugerido pela empresa para o objetivo desta dissertação.



Figura 75 - *Sesotec Varisort Compact*.

O *Sesotec Varisort Compact* separa fragmentos com dimensões entre os 2 e 50 mm, tem uma produtividade recomendada de 200 kg/h e possui três sensores:

- o sensor C possui uma câmara que deteta diferentes materiais coloridos, transparentes e não transparentes o que permite a deteção e separação por cores;
- o sensor M possui uma bobina de deteção de metais que permite a separação e deteção de metais ferrosos e não ferrosos;
- o sensor NIR possui uma câmara hiperespectral que permite a deteção e separação de diferentes polímeros.

Além dos sensores possui um sistema de ejeção de ar que é responsável pela separação. Quando o sensor identifica um fragmento que não cumpre os parâmetros definidos, este irá ser ejetado pelo sistema de ar. Pelo contrário, os que respeitam os parâmetros não ativam o sistema, sendo aceites. Na Figura 76 encontram-se estes e outros constituintes do *Sesotec Varisort Compact*. Contudo, o sistema *Sesotec Varisort Compact* implica a aquisição de uma banda magnética por ser a forma mais simples de separar metais ferrosos de metais não ferrosos.

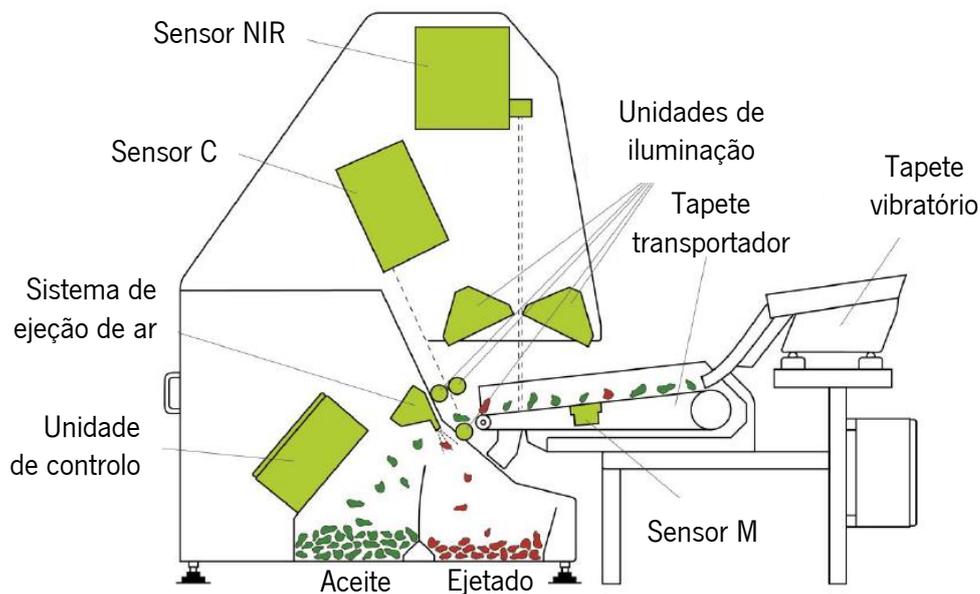


Figura 76 - Elementos constituintes do *Sesotec Varisort Compact*.

De forma que a separação resulte em várias frações, e tendo em conta que por cada passagem pelo *Sesotec Varisort Compact* apenas se obtém uma fração, é necessário repetir o processo de passagem dos fragmentos pelos sensores algumas vezes. Na Figura 77 encontra-se um diagrama explicativo com um exemplo do procedimento a realizar.

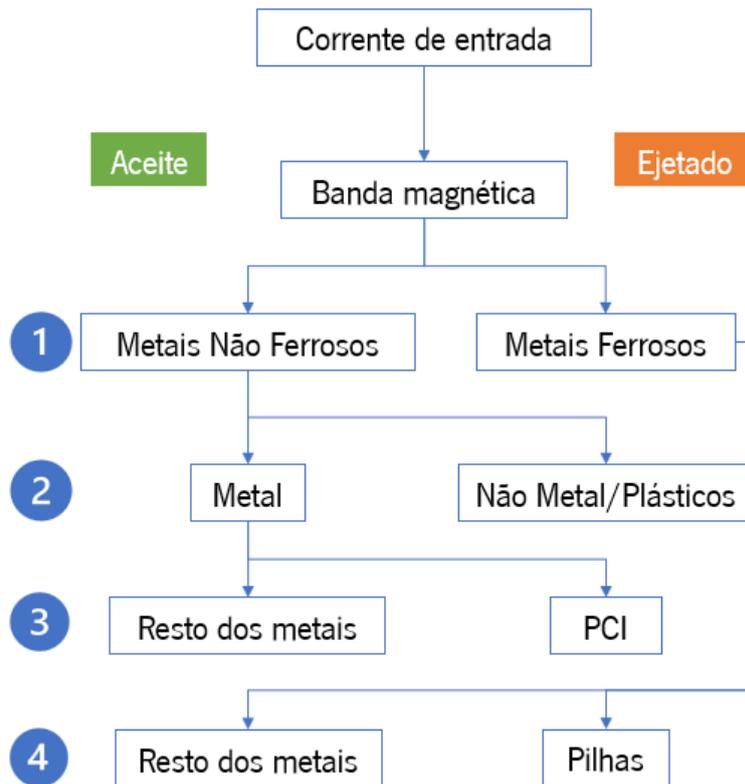


Figura 77 - Procedimento necessário para a obtenção das frações de metais ferrosos, metais não ferrosos, plástico, pilhas e PCI através do *Sesotec Varisort Compact*.

Seja qual for o objetivo final de separação, a primeira passagem deve ser sempre pela banda magnética de forma a separar os metais ferrosos dos não ferrosos. Só depois é que se deve recorrer aos sensores aplicados no equipamento. Na segunda passagem da Figura 77 os não metais são separados dos metais recorrendo ao sensor M que os ejeta. Na terceira passagem as PCI são separadas pelo sensor C, pois normalmente possuem uma cor verde que é de fácil distinção. Por fim, a quarta passagem é relativa à fração dos metais ferrosos que é inserida novamente no *Sesotec Varisort Compact* para a separação das pilhas recorrendo ao sensor C que também permite a separação de acordo com a forma do fragmento. Contudo, no caso dos REEE da categoria 5, e devido à etapa de descontaminação que ocorre antes do processo de pré-trituração, não existirão pilhas nos fragmentos. Caso se pretenda, por exemplo, separar o alumínio do cobre, ou do latão, deve-se encaminhar a corrente composta pelos metais não ferrosos para o *Sesotec Varisort Compact* e recorrer ao sensor C.

O *Sesotec Varisort Compact* tem um custo de 180 000 € (sem IVA) e necessita de pelo menos dois operadores, um para inserir os fragmentos no tapete rolante e outro para controlar as frações resultantes. Como a trituração é na mesma necessária neste tipo de separação, os custos referentes aos equipamentos utilizados na pré-trituração e trituração, tapetes rolantes e

funcionários necessários terão que ser contabilizados. Posto isto, será necessário um total de seis funcionários para este processo uma vez que não pode ser automatizado devido à produtividade recomendada do *Sesotec Varisort Compact* ser inferior ao da RSX 1200 e BDR 1645. A banda magnética terá de ser adquirida à parte, sendo fornecida pela empresa Regulator Cetrisa™, como mencionado anteriormente. O custo total de aquisição e custo mensal de operação desta separação por sensores encontra-se na Tabela 21.

Tabela 21 - Custo total de aquisição e custo de operação mensal da separação por sensores utilizando o *Sesotec Varisort Compact*

Equipamento	Preço de aquisição / (€)	Custo mensal de operação/ (€)
RSX 1200	300 000	12 016
BDR 1645	400 000	8 035
Tapetes rolantes	15 000	264
Banda magnética	11 420	231
<i>Sesotec Varisort Compact</i>	180 000	6 109
Total	906 420	26 657

5.3.1.2. Tomra™

A Tomra™ é uma empresa que cria soluções baseadas em sensores para a indústria alimentar, mineira e de reciclagem. O *Tomra Combisense* foi o equipamento sugerido pela empresa para a reciclagem dos REEE, e encontra-se na Figura 78.



Figura 78 - *Tomra Combisense*.

O tamanho mínimo recomendado para os fragmentos a separar é de 8 mm. Contudo, no caso dos metais, o diâmetro mínimo pode estar compreendido entre 1 e 2 mm. O tamanho dos

fragmentos capazes de serem ejetados depende da distância entre as válvulas responsáveis pela injeção de ar. Se necessário, o sistema pode ser ajustado para separar tamanhos menores de acordo com a aplicação pretendida. A produtividade recomendada é de 500 kg/h.

O *Tomra Combisense* foi projetado para separar sucata de veículos em fim de vida, REEE e metais não ferrosos, e por isso possui apenas 2 sensores:

- sensor eletromagnético EM3 que identifica os metais e os separa dos não metais, como plástico, de acordo com a sua condutividade eletromagnética;
- câmara de alta resolução CRGB que permite separar de acordo com a cor, brilho e forma do fragmento.

Uma vez que não é necessário separar plásticos por tipo de polímero, não possui o sensor NIR de infravermelhos. No entanto, a classificação e os parâmetros do sistema podem ser modificados para outras aplicações futuras.

Os sensores podem trabalhar de forma independente ou combinados dependendo da aplicação pretendida. De resto, é bastante semelhante ao *Sesotec Varisort Compact*, pois o princípio de funcionamento entre eles é idêntico, mas com tecnologias desenvolvidas por cada empresa.

O *Tomra Combisense* possui ainda uma unidade de iluminação com tecnologia LED FLUIDCOOL® de última geração que permite resultados de classificação estáveis e:

- alta intensidade de luz que resulta numa alta resolução;
- vida útil longa;
- lâmpadas refrigeradas por água para uma estabilidade de luz correta;
- segmento de brilho ajustável para a distribuição uniforme da luz.

Na Figura 79 é possível observar o funcionamento e os elementos constituintes do *Tomra Combisense*. Os fragmentos dão entrada no *Tomra Combisense* pelo tapete rolante e são detetados pelo sensor EM3 e/ou pela câmara CRGB. Depois de analisados no fim do tapete, quando os sensores detetam o material a ser separado, acionam as válvulas de ar que os ejetam com jatos de ar comprimido. Desta forma, os fragmentos são separados em duas frações distintas. Para se obter outras frações é necessário passar novamente os fragmentos no *Tomra Combisense*.

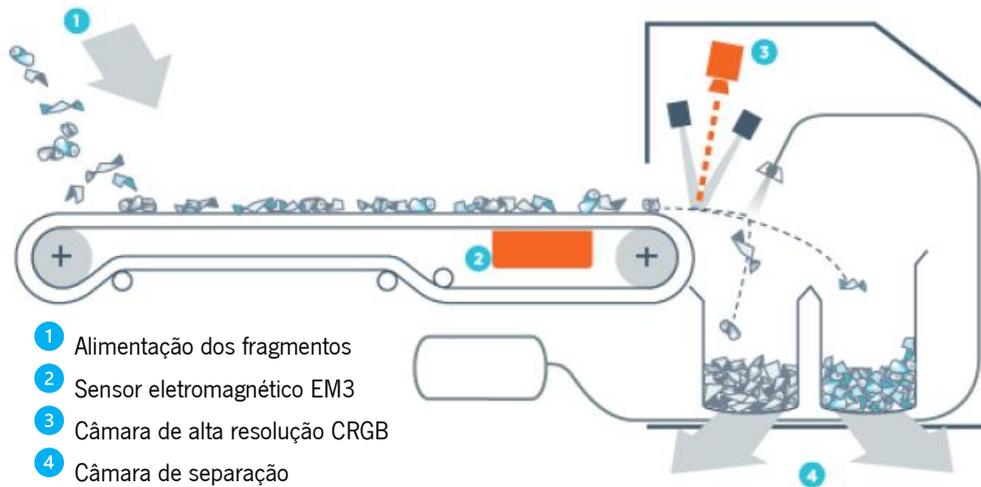


Figura 79 - Funcionamento e elementos constituintes do *Tomra Combisense*.

O *Tomra Combisense* necessita de um investimento de 242 428 € (sem IVA), a instalação e montagem ficam por 14 868 €, e o transporte por 1 000 €, o que resulta num total de 258 296 € (sem IVA). Uma vez que o *Tomra Combisense* tem a mesma produtividade recomendada que a RSX 1200 e BDR 1645 seria possível automatizar o processo através da circulação direta dos fragmentos entre os equipamentos. Contudo, a automatização do processo só permitirá recuperar uma fração de resíduos, pois é necessário passar os fragmentos várias vezes no equipamento para separar as diversas frações que existem, o que obriga a uma interrupção da linha. Nessa situação serão necessários dois funcionários, um para inserir os fragmentos no *Tomra Combisense* e outro para controlar as frações resultantes. Mais uma vez é necessário contabilizar o custo referente à pré-trituração, trituração e banda magnética, e os funcionários necessários, perfazendo um total de seis. O custo total de aquisição e custo de operação mensal desta separação por sensores encontra-se na Tabela 22.

Tabela 22 - Custo total de aquisição e custo de operação mensal da separação por sensores utilizando o *Tomra Combisense*

Equipamento	Preço de aquisição / (€)	Custo mensal de operação / (€)
RSX 1200	300 000	12 016
BDR 1645	400 000	8 035
Tapetes rolantes	15 000	264
Banda magnética	11 420	231
<i>Tomra Combisense</i>	258 296	7 506
Total	984 716	28 054

5.3.2. Desmantelamento mecânico

Apesar da trituração ser o processo mais comum para a reciclagem em massa dos REEE começam a existir alternativas entre elas o desmantelamento mecânico.

5.3.2.1. Compton™

A Compton™ é uma empresa que projeta e constrói máquinas para a reciclagem de resíduos, entre eles os REEE. O MCM-S é o equipamento sugerido para o desmantelamento mecânico dos REEE pertencentes às categorias 5 sem recorrer à sua trituração e encontra-se na Figura 80. Contudo, após visualização de um vídeo enviado pela empresa, constatou-se que os REEE são bastante destruídos durante o processo e o resultado final assemelha-se aos fragmentos obtidos por trituração. Apenas no caso dos REEE mais resistentes e com estruturas metálicas é que se observa uma fragmentação onde é possível obter os seus componentes como motores elétricos, discos rígidos, placas eletrônicas, cabos elétricos, metais, ferro, plásticos, e entre outros.



Figura 80 - MCM-S.

Apesar de ser um equipamento para desmantelamento mecânico, o MCM-S necessita do passo de descontaminação para a remoção de contaminantes como pilhas e tinteiros. A produtividade recomendada é de 200 kg/h, podendo chegar aos 400 ou 600 kg/h dependendo do tipo de REEE a ser tratado.

A linha completa consiste no MCM-S, dois tapetes rolantes, um de entrada e outro de saída, uma cabina insonorizada e um aspirador de partículas, como se pode ver na Figura 81. A triagem manual dos fragmentos obtidos ocorre no tapete de saída.



Figura 81 - Linha do MCM-S dupla com aspiradores e triagem manual pós desmantelamento.

No interior do MCM-S encontra-se o sistema de desmantelamento composto por correntes de aço temperado de alta densidade que através da força centrífuga desintegram os REEE. Na Figura 82 encontra-se uma foto enviada pelo fabricante. Neste caso não foi possível obter evidências fotográficas do resultado real ou esperado por indisponibilidade da Compton™.

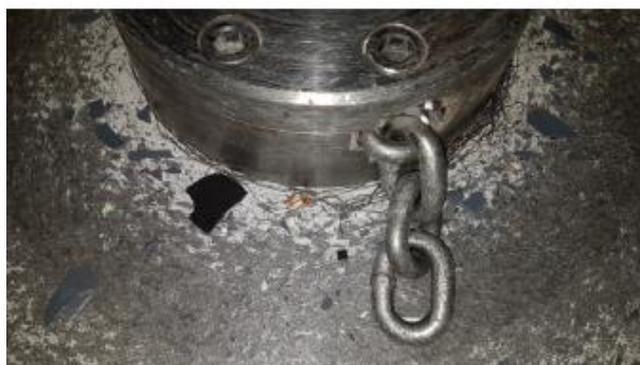


Figura 82 - Sistema de desmantelamento do MCM-S.

O MCM-S e os acessórios mencionados, como os tapetes e câmara de insonorização, têm um custo de 98 600 € (sem IVA) e o aspirador de partículas 9 000 € (sem IVA). Com isto, o preço total da linha do MCM-S é de 107 600 €. Uma vez que necessita do passo de descontaminação são necessários três funcionários, mais um para colocar os resíduos no tapete rolante de entrada e mais dois para a triagem à saída, perfazendo um total de seis funcionários. Contudo, devido à elevada destruição dos componentes à saída, presume-se que será necessário adicionar uma banda magnética e as correntes de *Eddy* para conseguir obter as frações resultantes do desmantelamento de alguns REEE. Na Tabela 23 encontra-se o custo total de aquisição e o custo de operação mensal do desmantelamento com o MCM-S.

Tabela 23 - Custo total de aquisição e custo mensal da separação por sensores utilizando o MCM-S

Equipamento	Preço de aquisição / (€)	Custo mensal de operação / (€)
MCM-S	98 600	10 709
Aspirador	9 000	280
Banda magnética	11 420	231
Correntes de <i>Eddy</i>	38 295	706
Total	157 315	11 927

5.3.2.2. BRT Hartner™

A BRT Hartner™ é uma empresa que desenvolve, projeta, produz e vende máquinas para a indústria da gestão de resíduos e para a reciclagem e recuperação de materiais. A máquina sugerida para o desmantelamento dos REEE é o EWD (*Electric Waste Dismantle*) 12 que se encontra na Figura 83. É indicado para o desmantelamento dos REEE pertencentes à categoria 5 como aspiradores, máquinas de café e torradeiras. No entanto, existem exceções com ferramentas muito compactas e densas, como máquinas de furar, chaves de fenda elétricas, e com dispositivos muito pequenos, como escovas de dentes elétricas e máquinas de barbear. A produtividade recomendada é de 500 kg/h.

**Figura 83** - BRT Hartner EWD (*Electric Waste Dismantle*) 12.

O EWD 12 não necessita do passo de descontaminação pois está projetado para que as pilhas e condensadores não sejam danificados, embora seja impossível garantir que nenhuma será danificada, e possui alta resistência ao emaranhamento dos cabos. Tem um funcionamento ligeiramente diferente dos outros equipamentos já mencionados por conter apenas um tambor

rotativo, como se pode ver na Figura 84, com uma espécie de pentes responsáveis por pressionar os REEE contra o tambor para os partir e permitir que se libertem os seus componentes.



Figura 84 - Tambor rotativo do EWD 12.

Para se perceber como o EWD 12 funciona a BRT Hartner™ enviou fotos e vídeos explicativos do processo. Na Figura 85 encontram-se as fotos enviadas pela mesma que permitem comparar os REEE antes e depois de passarem pelo EWD 12.



Figura 85 - REEE da categoria 5 antes (esquerda) e depois (direita) do desmantelamento mecânico no EWD 12.

O EWD 12 tem um custo de 106 900 € e a sua subestrutura 2 700 €, sendo opcional, mas preferencial. Podem-se ainda adquirir dois sensores de distância óticos, um para o ajuste da pressão nos pentes do tambor rotativo e outro para o tapete rolante que deteta o nível de enchimento dentro EWD 12, uma unidade de controlo de temperatura para arrefecer o painel de controlo, e ainda uma tampa de acrílico para o painel de controlo. Caso se pretenda adquirir todos estes extras, o EWD 12 passa a ter um custo de 119 500 € (sem IVA). Contudo, é necessário

também adquirir um tapete de saída que tem um custo de 7 500 €, como mencionado anteriormente. Necessita de três funcionários, um para inserir os REEE dentro do equipamento através de uma pá carregadora ou empilhador, e dois para realizar a triagem á saída. Os preços do EWD 12, dos seus extras e dos custos mensais encontram-se na Tabela 24.

Tabela 24 - Valores do EWD 12, dos extras opcionais e dos custos mensais

Equipamento	Preço de aquisição / (€)	Custo mensal operação / (€)
EWD 12	106 900	
Subestrutura	2 700	
Sensor para ajuste de pressão	5 600	
Sensor para o tapete rolante	1 800	6 611
Unidade de controlo climático	2 200	
Tampa acrílica para o painel de controlo	300	
Tapete rolante	7 500	132
Total	127 000	6 743

5.3.3. Pré-Trituração

Uma solução para o processo tradicional de reciclagem dos REEE dependente da trituração é a realização apenas da pré-trituração já mencionada anteriormente. Como se pode ver na Figura 72 os REEE pré-triturados têm uma aparência semelhante aos que resultam do desmantelamento mecânico pelo EWD 12 que se encontram na Figura 85. Com isto, existem não dois, mas três soluções reconhecidas como desmantelamento mecânico.

5.4. Avaliação das opções para a linha de desmantelamento para a reciclagem dos REEE

O processo tradicional para a reciclagem dos REEE é bastante utilizado na reciclagem de REEE em grande escala por permitir tratar uma enorme quantidade num curto espaço de tempo. Os orçamentos fornecidos tiveram em conta a capacidade de tratamento da empresa. A trituração dos REEE não é indicada para o caso em estudo pois necessita primeiro do passo de descontaminação que praticamente consiste num desmantelamento manual, operação essa que

já é realizada nas instalações da empresa. Além disso, os materiais obtidos deste processo não são facilmente reciclados uma vez que os fragmentos triturados contêm misturas. No caso dos metais não ferrosos, a fração contém aço inoxidável, alumínio, cobre e outros metais, que no desmantelamento manual são separados pelos operadores. E ainda, na fração dos plásticos, há sempre parafusos ou pequenas molas que passam nos fragmentos e impedem a sua reciclagem devido ao facto da fração dos plásticos ter que ser isenta de metais, como já mencionado nesta dissertação. Por estes motivos, o processo tradicional de reciclagem não é a opção pretendida. O custo deste processo é de 764 715 € (sem IVA).

O método de separação por sensores é semelhante ao processo tradicional uma vez que a trituração é um passo obrigatório em ambos, assim como a descontaminação. A vantagem da separação por sensores é a obtenção de frações mais puras devido à separação realizada pelos sensores que possuem. No caso dos metais ferrosos é possível separar o cobre do alumínio, mas já não é possível separar o alumínio do aço inoxidável, uma vez que têm a mesma cor e não possuem uma característica óbvia que os distinga. A separação destes dois últimos é realizada na empresa pelos operadores, uma vez que quando estão em peças inteiras é possível fazer a sua distinção ao nível do aspeto através da cor e/ou brilho, e do peso, pois o aço inoxidável é ligeiramente mais pesado que o alumínio. Contudo, devido à necessidade de trituração dos REEE, esta opção para a linha de reciclagem foi excluída. No entanto, como o *Sesotec Varisort Compact* possui uma produtividade recomendada de apenas 200 kg/h, e a dos equipamentos utilizados na trituração é de 500 kg/h, este teria que ser excluído de qualquer forma devido à baixa produtividade que apresenta. O custo do processo é de 906 420 € (sem IVA). Em relação ao *Tomra Combisense*, a sua produtividade recomendada é igual à da RSX 1200 e BDR 1645 pelo que já era possível automatizar o processo para a obtenção de uma fração. Para a obtenção das restantes, seria necessário interromper o processo na mesma como acontece com o *Sesotec Varisort Compact*. O custo deste processo é de 984 716 € (sem IVA).

No desmantelamento mecânico existem três opções distintas. O MCM-S da Compton™ utiliza correntes de aço que através da força centrífuga desintegram os REEE. Inicialmente pensou-se que esta opção cumpriria o requisito de desmantelamento, ao invés da sua trituração, mas após análise de um vídeo enviado pela empresa verificou-se que os REEE saem bastante danificados e semelhantes ao resultado da trituração. Com isto, a triagem à saída será dificultada pela presença dos fragmentos muito pequenos, e será necessário em alguns casos recorrer a uma banda magnética e correntes de *Eddy*. Apenas nos REEE com materiais mais resistentes será

possível efetuar a triagem manual e obter os componentes internos como PCI, motores e ventoinhas. O resultado semelhante aos fragmentos resultantes da trituração e a sua consequente dificuldade de triagem à saída do MCM-S são os dois principais motivos que levaram à exclusão desta opção. O custo do processo é de 157 315 € (sem IVA).

O EWD 12 da BRT Hartner™ tem um funcionamento distinto dos restantes equipamentos e o resultado final permite que seja realizada a triagem manual pós desmantelamento/desintegração. Contudo, não é eficaz com REEE demasiado compactos ou pequenos. Nestes casos os REEE teriam que ser desmantelados à mão, o que já se verificou não ser a forma mais vantajosa de tratar os pequenos eletrodomésticos pertencentes à categoria 5. Mesmo assim, o EWD 12 encaixa em todos os requisitos da empresa e é a opção mais favorável. O seu custo é de 127 000 € (sem IVA).

A pré-trituração levada a cabo pelo RSX 1200, ou outra máquina projetada por outra empresa para o mesmo objetivo, apresenta um resultado semelhante ao processo com o EWD 12, e por isso também é uma solução viável. O seu custo é de 300 000 € (sem IVA), o que é bastante superior ao custo do EWD 12, e por isso, a melhor opção a nível económico é o EWD 12.

5.4.1. Avaliação Económica dos Processos e Retorno Financeiro

O desmantelamento teste manual resultou numa produtividade 1,4 vezes inferior à produtividade da empresa antes de receber os pequenos eletrodomésticos. Tendo em conta a produtividade e o preço de venda dos componentes resultantes do desmantelamento foi possível concluir que o desmantelamento manual não é vantajoso a nível económico.

Caso se optasse pelos processos mecânicos, a produtividade seria 12 vezes superior à produtividade da empresa antes da receção dos pequenos eletrodomésticos. Nesta situação os valores são estimados pois não foram realizados nenhuma trituração ou desmantelamento mecânico teste. De acordo com o resultado do desmantelamento teste da carga dos REEE da categoria 5 assume-se que se obtém 36 % de metais ferrosos, 16 % de metais não ferrosos, 28 % de plásticos e 20 % de rejeitado. Com isto, e tendo em conta os valores atuais de mercado, o ganho mensal do processo tradicional de reciclagem de REEE não permite adquirir os equipamentos necessários devido ao custo de operação mensal ser de 21 254 €.

Relativamente à separação por sensores, a obtenção das diferentes frações depende do número de passagens pelos sensores, pois por cada passagem obtém-se apenas uma. Os metais

ferrosos seriam recuperados assim que passassem na banda magnética que se encontra antes do equipamento de separação por sensores, e nessa mesma passagem os metais não ferrosos são separados dos não metais/plásticos por ação dos sensores. Na segunda passagem é possível remover as PCI dos metais não ferrosos, e na terceira passagem remove-se o cobre dos restantes metais não ferrosos. Neste caso, a produtividade seria novamente 12 vezes superior à produtividade da empresa antes da receção dos pequenos eletrodomésticos, mas com a separação por sensores apenas seria possível atingir cerca de um terço da mesma devido à necessidade de realizar pelo menos três passagens pelo equipamento. Com isto, o ganho mensal não cobre os custos operacionais do *Sesotec Varisort Compact* e *Tomra Combisense*, respetivamente, de 26 657 € e 28 054 €.

O desmantelamento mecânico realizado pelo MCM-S opera segundo a produtividade necessária após a receção dos pequenos eletrodomésticos. Assumindo que se obtém as mesmas frações de resíduos e nas mesmas proporções que no processo tradicional de reciclagem, o ganho mensal com este processo cobre os custos operacionais de 11 927 €. Contudo, o lucro obtido não é um muito elevado e pode não cobrir despesas extraordinárias que possam surgir nos primeiros 5 anos.

O EWD 12, que é o equipamento mais favorável a adquirir, permite obter um ganho mensal bastante superior ao seu custo de 6 743 €. Tanto a nível operacional como financeiro é a opção mais indicada para a empresa.

Por fim, o RSX 1200 permite obter o mesmo ganho que o EWD 12 por operar à mesma produtividade e por se obter as mesmas frações, e por essa razão cobre os custos de 12 016 €. Contudo, fica na mesma situação que o MCM-S por não permitir obter um lucro elevado nos primeiros 5 anos.

5.4.2. Análise dos Requisitos da Empresa

Os requisitos da empresa para a escolha mais adequada da linha de desmantelamento para a reciclagem dos REEE foram analisados ao longo desta dissertação. Na tabela 25 encontra-se o resumo da análise de acordo com o cumprimento ou não desses requisitos. É de salientar que todas as opções apresentam uma confirmação do cumprimento do requisito referente à incorporação das frações resultantes na economia circular. No entanto, uma vez que a separação manual realizada pela empresa é de acordo com a separação de todos os componentes envolvidos nos REEE (cabos, ventoinhas, fitas cobre, fichas, transformadores, entre outros), e quando, no

caso da trituração, se obtêm as três frações de resíduos (metais ferrosos, metais não ferrosos e plásticos), a incorporação dessas frações resultantes na economia circular é possível, mas não é tão simples por serem uma mistura de vários materiais. Relativamente ao requisito do retorno financeiro a longo prazo, devido à diversidade de resíduos que compõem as cargas e à não estabilidade dos preços de venda das frações resultantes é difícil calcular com precisão o ganho a receber.

Tabela 25 - Análise dos requisitos para a escolha da linha de desmantelamento para a reciclagem dos REEE

Requisitos	Linhas de reciclagem				
	Processo tradicional	Separação por sensores	Desmantelamento mecânico		
			MCM-S	EWD 12	RSX 1200
Desmantelar REEE pertencentes à categoria 5	-	-	-	X	X
Benefício da produtividade (kg/h)	X	X	X	X	X
Incorporação das frações resultantes na economia circular	X	X	X	X	X
Retorno financeiro a longo prazo	-	-	X	X	X

De acordo com tudo o que já foi explicado e após o desmantelamento teste dos REEE pertencentes à categoria 5 e análise dos custos inerentes à aquisição de uma linha automatizada e respectivas frações resultantes, é possível perceber que a implementação de uma linha de desmantelamento para a reciclagem dos REEE automatizada apenas é possível caso se adquira o EWD 12. Contudo, a empresa decidiu não adquirir nenhum equipamento para o desmantelamento dos REEE. As principais razões centram-se na extremamente elevada mão de obra necessária e no facto dos REEE não serem o único fluxo a ser tratado na empresa. O EWD 12 necessita de três funcionários exclusivamente para o processo o que, devido à elevada mão de obra necessária, não é possível concretizar de forma produtiva. E ainda, além dos REEE, a empresa recebe e trata RCD, papel, cartão, plásticos, metais, entre outros, e pretende manter a qualidade no tratamento dos fluxos existentes ao invés de se dedicar quase em exclusivo a apenas um.

Em vez da aquisição da linha a solução encontrada consiste em separar de uma forma não pormenorizada os REEE que dão entrada na empresa e separar os que possam pertencer à categoria 6, como as torres de computador e routers, ou autorrádios, que são categoria 5. Apesar dos resíduos serem da categoria 5 existem sempre alguns que podem pertencer a outras categorias por causa das cargas não serem completamente homogêneas e serem classificadas de acordo com a categoria dos REEE mais representativa. Os restantes, isto é, os pequenos eletrodomésticos, são encaminhados para um OGR que cumpre todos os requisitos legais e ambientais e já possui todo o equipamento para o processo tradicional de reciclagem e o *know-how* necessários para o processo.

No capítulo seguinte será possível verificar o porquê da separação dos REEE que possuem os componentes melhores. O desmantelamento automatizado não permite separar de acordo, nem com o sistema antigo nem com o novo, por causa dos componentes resultantes saírem demasiado destruídos.

6. Implementação de um Novo Sistema de Separação das Placas de Circuito Impresso (PCI) Resultantes do Desmantelamento dos REEE

6.1. Sistema Antigo de Separação

A separação das placas de circuito impresso (PCI) conforme as suas características já é realizada na empresa, sendo estas encaminhadas para outro OGR para posterior valorização. A sua classificação consiste em dez categorias diferentes, sendo estas:

- Placas pobres;
- Placas novas;
- Placas velhas;
- Placas ricas;
- Placas douradas sem componentes;
- Placas prateadas sem componentes;
- Placas acobreadas sem componentes;
- Placas douradas com componentes;
- Placas prateadas com componentes;
- Placas acobreadas com componentes.

A preparação das placas para separação requer a sua divisão segundo as categorias apresentadas anteriormente e também a remoção de quaisquer elementos metálicos, como por exemplo, dissipadores de calor de alumínio e parafusos que eventualmente possam conter.

As placas pobres encontram-se na Figura 86 e são placas que contêm uma face laranja acastanhada e outra verde. São normalmente encontradas em comandos de televisão e telefones fixos antigos.



Figura 86 - Placas pobres.

As placas novas são normalmente placas mãe de computadores, mas podem também ser placas de impressoras, rádios e outros equipamentos, que contêm os conectores coloridos, como se pode ver na Figura 87.



Figura 87 - Placas novas.

As placas velhas são parecidas com as placas novas, mas diferem na cor dos conectores, sendo esta a única característica que as distingue. Nas placas velhas os conectores possuem cor preta, como se verifica na Figura 88.



Figura 88 - Placas velhas.

As placas ricas são placas que possuem barras de conexão dourada. Nestas incluem-se, de uma forma geral, as placas gráficas, de som e de rede, sendo que caso as placas possuam conectores coloridos, a presença da barra dourada prevalece para a classificação, como se pode ver na Figura 89. Por isso, se uma placa possuir a barra de conexão dourada e os conectores pretos ou coloridos, deverá ser classificada como placa rica.



Figura 89 - Placas ricas.

As placas sem componentes douradas são placas que, como o próprio nome indica, estão isentas de componentes como processadores ou conectores por se tratar de placas base para o fabrico de placas para os EEE. E a designação douradas deve-se à sua aparência dourada, como é visível na figura 90.



Figura 90 - Placas sem componentes douradas.

Além das placas sem componentes douradas também existem as placas sem componentes prateadas e acobreadas. A diferença entre elas é a cor das suas saliências. Na Figura 91 encontram-se as placas sem componentes prateadas e na Figura 92 as placas sem componentes acobreadas.

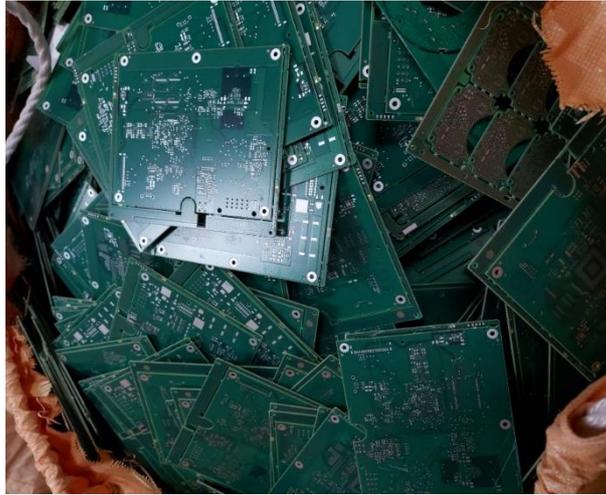


Figura 91 - Placas sem componentes prateadas.



Figura 92 - Placas sem componentes acobreadas.

Caso a placa já possua alguns componentes, ou caso seja uma placa de um REEE que não se insere em nenhuma das quatro primeiras classificações mencionadas (placas pobres, placas novas, placas velhas e placas ricas) será inserida na categoria das placas com componentes. As placas com componentes são separadas em douradas, prateadas e acobreadas, como acontece com as placas sem componentes. Estas três categorias encontram-se nas Figuras 93, 94 e 95, respetivamente.



Figura 93 - Placas com componentes douradas.



Figura 94 - Placas com componentes prateadas.

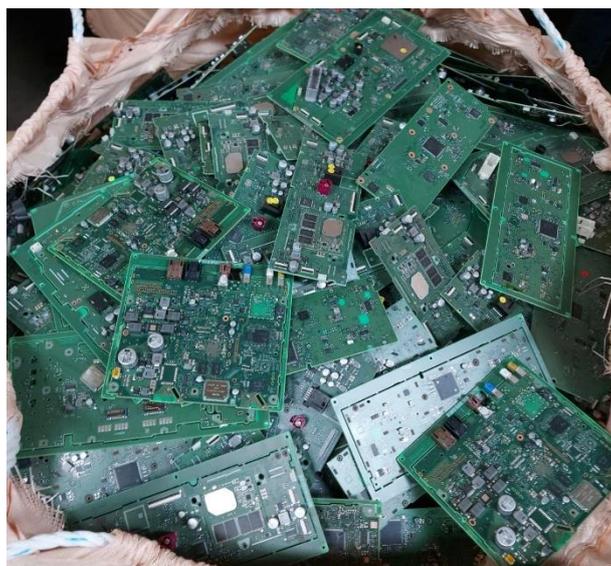


Figura 95 - Placas com componentes acobreadas.

6.2. Novo Sistema de Separação

A pesquisa pelo novo sistema de separação começou pela procura de empresas extratoras de metais preciosos dos componentes resultantes dos REEE ou empresas que os comprassem para posterior encaminhamento direto para essas empresas extratoras. As PCI são ricas em metais preciosos e, por essa razão, a sua reciclagem consiste na obtenção desses metais e na sua reintrodução no mercado, respeitando assim o conceito de economia circular. Desta forma, reduzem-se os impactos ambientais associados às explorações mineiras. Os metais preciosos mais comumente recuperados das PCI são o ouro, prata, platina e paládio ^[53].

Todas as empresas contactadas possuem um catálogo próprio com as classificações e separações que devem ser feitas, os quais diferem de empresa para empresa. Por uma questão de sigilo não serão divulgados os nomes das empresas contactadas, pelo que serão identificadas pelas letras A, B e C.

6.2.1. Classificações das Empresa Extratoras de Metais

6.2.1.1. Placas-Mãe e Placas Gráficas, de Rede e de Som

A primeira empresa contactada, que será denominada por empresa A daqui em diante, apresenta a sua classificação de acordo com o ano de fabrico das placas retiradas dos computadores. Relativamente às placas-mãe e placas gráficas, de rede e de som, separam as produzidas antes de 2000 das produzidas depois desse ano, sendo apenas necessárias duas categorias. O ano de produção das placas-mãe é relativamente de fácil observação, pois através do número do *socket*, que é a entrada para o processador - CPU (*Central Process Unit*) - é possível saber mais ou menos o ano em que foi produzida. Na Figura 96 encontra-se um *socket* 870 plástico cujo ano de lançamento não é conhecido.

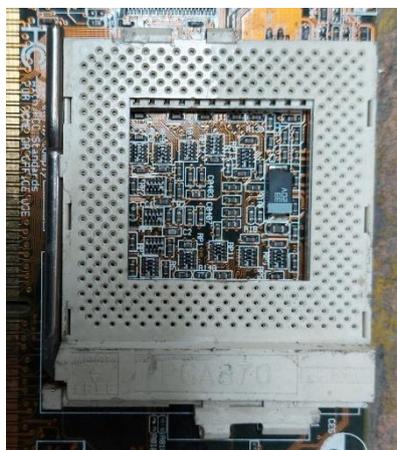


Figura 96 - *Socket* 870 plástico.

Já nas placas gráficas, de rede e de som essa classificação é bastante mais exigente pois não possuem nenhum elemento que permita a identificação imediata em contexto de fábrica. Na Figura 97 encontra-se uma placa gráfica cujo ano de fabrico também não é conhecido.



Figura 97 - Placa gráfica.

Na segunda empresa contactada, que será denominada por empresa B, a separação das placas-mãe e placas gráficas, de rede e de som, é feita em sete categorias, mas de fácil identificação. As placas-mãe são separadas de acordo com o número do *socket*, e as placas gráficas, de rede e de som podem ser enviadas todas juntas não dependendo de nenhum fator de classificação. O número do *socket*, como se pode ver na Figura 96, encontra-se gravado no plástico.

Por fim, na terceira empresa contactada, que será denominada por empresa C, a separação das placas-mãe é feita apenas de acordo com duas categorias tendo em conta se o *socket* é grande ou de *slot*, e se é pequeno ou de ferro. Nas Figuras 98 e 99 encontram-se placas-mãe que se inserem na primeira e segunda categoria, respetivamente. As placas gráficas, de rede e de som são mais uma vez classificadas como uma única categoria.



Figura 98 - Placas-mãe de *slot* (esquerda) e de *socket* grande (direita).



Figura 99 - Placas-mãe de *socket* pequeno (esquerda) e de *socket* metálico (direita).

Segundo a classificação antiga, as placas-mãe eram classificadas em placas novas ou velhas, tendo em conta as cores dos seus conectores, e as pilhas que contêm não necessitam de ser removidas. Neste caso, como as placas serão vendidas diretamente para a extração de metais preciosos, as pilhas não podem ser enviadas juntamente com as placas, assim como as pequenas bobinas de cobre que estas possuem. Como já era feito inicialmente, os dissipadores de calor em alumínio e os parafusos também devem ser removidos. Todos os componentes a ser removidos das placas serão alvo de reciclagem e/ou valorização por parte da empresa, enquanto se seguissem nas placas para as empresas A, B ou C iriam contaminar o processo da extração dos metais preciosos, ou até provocar pequenas explosões devido às pilhas.

6.2.1.2. Outras PCI Não Especificadas

Além das placas-mãe das torres de computadores existem muitas outras que são removidas de múltiplos REEE como autorrádios, fontes de alimentação, routers, entre outros. Na Figura 100 encontra-se uma PCI não especificada.

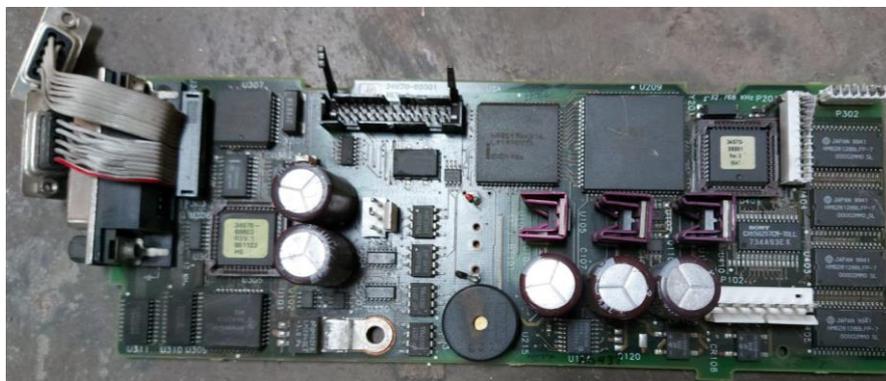


Figura 100 - PCI não especificada.

Na classificação das placas serão mencionados alguns componentes como circuitos integrados, EPROM (*Erasable Programmable Read-Only Memory*), chip BGA (*Ball Grid Array*), dissipador de calor e condensadores cujas fotos explicativas se encontram no anexo C nas Figuras C.1, C.2, C.3, C.4 e C.5, respetivamente. No caso da placa da Figura 100 será necessário cortar as fitas cobre que se encontram no canto superior esquerdo e remover os cinco condensadores que possui.

As PCI não especificadas são classificadas pela empresa A segundo quatro categorias:

- Categoria 1A: placas antigas com barras de conexão douradas, muitos circuitos integrados, EPROMs e/ou chips BGA, e não devem conter dissipadores de calor de alumínio ou outros componentes metálicos nem condensadores;
- Categoria 2A: placas sem barras de conexão douradas, com vários circuitos integrados, EPROMs e/ou chips BGA e sem dissipadores de calor e condensadores maiores que um polegar;
- Categoria 2B: placas sem barras de conexão douradas, com poucos circuitos integrados, EPROMs e/ou chips BGA e podem ocasionalmente conter dissipadores de calor e condensadores maiores que um polegar;
- Categoria 3: placas com componentes grandes, como condensadores e dissipadores de calor, e poucos ou nenhuns circuitos integrados, EPROMs e/ou chips BGA.

A empresa B utiliza uma classificação semelhante com designações idênticas, mas com cinco categorias:

- Categoria 1++: placas completamente equipadas com circuitos integrados, EPROMs e/ou chips BGA, com alguns componentes cobertos de dourado e sem dissipadores de calor ou condensadores;
- Categoria 1+: placas completamente equipadas com circuitos integrados e/ou EPROMs, vários chips BGA e sem dissipadores de calor ou condensadores;
- Categoria 2A: placas equipadas intensamente com circuitos integrados e/ou EPROMs, um ou dois chips BGA, conectores com pinos dourados e sem dissipadores de calor ou condensadores;
- Categoria 2B: placas ligeiramente equipadas com circuitos integrados e/ou EPROMs, conectores com pinos prateados e com componentes de baixo valor, como condensadores ou metais;

- Categoria 3: placas pouco equipadas com circuitos integrados e/ou EPROMs, e com componentes pesados.

Mais uma vez, relativamente à PCI da Figura 100, depois da remoção dos componentes referidos anteriormente, esta passa a inserir-se na categoria 2A.

Após o fim do estágio curricular realizado a empresa B anunciou que irá criar uma nova categoria intermédia entre as categorias 2B e 3. Contudo, não se sabe ainda qual será o nome dessa categoria nem os seus requisitos de classificação.

Para as empresas A e B, é necessário remover as pilhas, o alumínio presente nos dissipadores de calor, e as bobines de cobre, caso sejam componentes que façam parte das placas (pois nem todas as possuem). Para a empresa C, é necessário remover todos os componentes mencionados anteriormente com exceção das bobines de cobre.

A empresa C, ao contrário das duas empresas já mencionadas, possui uma classificação mais complexa com 7 categorias:

- Placas Telecom com bobines de cobre: placas de telecomunicações com bobines de cobre e conectores de pinos dourados;
- Placas Telecom sem bobines de cobre: placas de telecomunicações sem bobines de cobre com circuitos integrados e/ou EPROMs e conectores de pinos dourados;
- Placas com encaixes e banda dourada: placas com barras de conexão douradas e encaixes de *slot*;
- Placas PC+: placas completamente equipadas com circuitos integrados e/ou EPROMs, vários chips BGA e sem dissipadores de calor ou condensadores;
- Placas MG: placas equipadas intensamente com circuitos integrados e/ou EPROMs, um ou dois chips BGA, conectores com pinos dourados e sem dissipadores de calor ou condensadores;
- Placas MG-: placas ligeiramente equipadas com circuitos integrados e/ou EPROMs, conectores com pinos prateados e com componentes de baixo valor, como condensadores ou metais;
- Placas LG: placas pouco equipadas com circuitos integrados e/ou EPROMs, e com componentes pesados;

Na Figura 101 encontra-se uma placa Telecom sem bobines de cobre e na Figura 102 uma placa com encaixes e banda dourada.

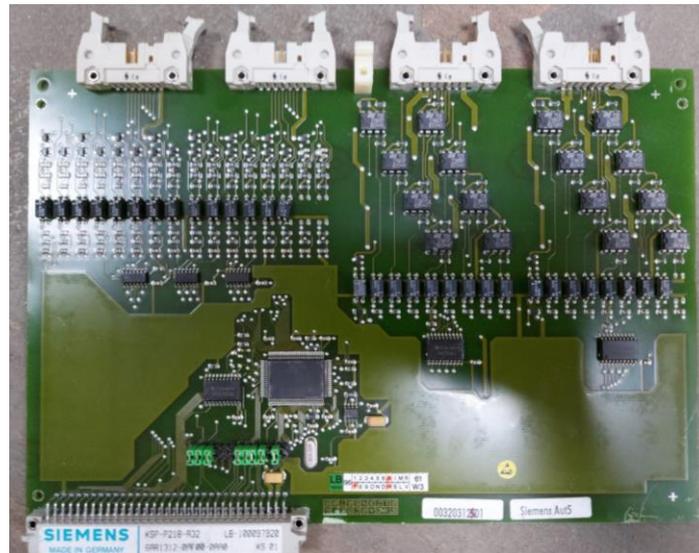


Figura 101 - Placa Telecom sem bobines de cobre.



Figura 102 - Placa com encaixes e banda dourada.

A classificação das PCI não especificadas pelas três empresas, sem contar com as placas Telecom e as placas com encaixes e banda dourada, não é muito discrepante. Na Tabela 26 encontra-se a comparação das suas categorias. Entre as empresas A e B algumas categorias possuem o mesmo nome e de um modo geral é possível relacionar todas as categorias entre as três empresas.

Tabela 26 - Comparação das categorias das PCI não especificadas das três empresas

Empresas	A	B	C
	-	1++	-
Categorias	1A	1+	PC+
	2A	2A	MG
	2B	2B	MG-
	3	3	LG

6.2.1.3. Painéis Traseiros de Servidor

Existem ainda os painéis traseiros de servidor que são classificados de formas diferentes pelas empresas. Na Figura 103 encontra-se um exemplo de um painel traseiro de servidor.

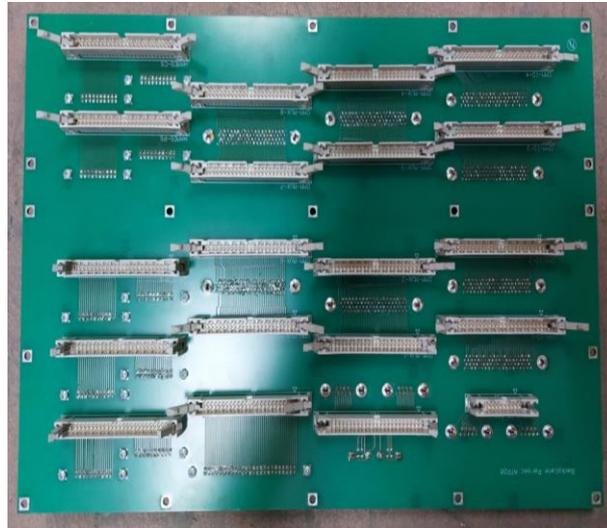


Figura 103 - Painel traseiro de servidor.

A empresa A classifica os painéis traseiros de servidor apenas com uma categoria e com este nome, na qual se inserem todos os painéis, quer sejam muito ou pouco preenchidos.

No caso da empresa B, esta já os separa e classifica em quatro categorias diferentes:

- Painéis traseiros - categoria alta+: painéis totalmente cobertos com conectores de pinos dourados;
- Painéis traseiros - categoria alta: painéis totalmente preenchidos com pinos de conexão dourados no interior e alguns conectores de pinos dourados na superfície;
- Painéis traseiros - categoria média: painéis com metade da superfície preenchida com conectores de pinos dourados ou metade do interior com pinos de conexão;
- Painéis traseiros - categoria baixa: painéis com menos de metade da superfície preenchida com conectores de pinos dourados ou menos de metade do interior com pinos de conexão;

Por fim, a empresa C divide-os apenas em duas categorias:

- Painéis traseiros com encaixes de ficha macho: painéis traseiros em que os encaixes apresentam apenas pinos dourados;
- Painéis traseiros com encaixes de ficha fêmea: painéis traseiros com encaixes para os pinos dourados.

Mais uma vez, como no caso das placas-mãe, verifica-se uma diversidade na classificação dos painéis traseiros, tanto no número de categorias, como na forma de classificação.

6.2.2. Classificação Implementada na Empresa

A nova classificação das PCI permite a obtenção das frações de materiais devido à nova triagem realizada. Aquando do desmantelamento dos REEE da categoria 6, após a remoção das placas, procede-se à remoção das pilhas, dissipadores de calor de alumínio, parafusos e componentes metálicos extras, bobines de cobre, e condensadores, no caso de serem condensadores demasiado grandes (aproximadamente com diâmetro superior a uma moeda de 1 cêntimo). Todos estes componentes fazem parte das frações que são inseridas na economia circular e valorizadas pela empresa, como se pode ver na Tabela 27. Desta forma, a recuperação dos metais preciosos das PCI é mais eficaz e livre de contaminações.

Tabela 27 - Componentes e frações obtidas da triagem das PCI

Componente removido	Fração
Pilhas	Pilhas - Resíduo perigoso
Dissipador de calor	Alumínio - Metal não ferroso
Parafusos	Sucata ligeira - Metal ferroso
Bobines de cobre	Cobre - Metal não ferroso
Condensadores	Componentes

A nova classificação implementada na empresa resulta numa mistura das diferentes formas de classificação das empresas A, B e C, de acordo também com o ganho que é possível obter da sua reciclagem.

A separação das placas-mãe será feita de acordo com a empresa B que separa tendo em conta o número do *socket*. Como os valores desta indústria variam conforme o preço dos metais preciosos, é impossível saber exatamente quanto se vai receber pelas categorias separadas, por exemplo, na semana seguinte. Caso se verifique que a empresa C, que compra as placas-mãe de acordo com o tamanho dos *sockets*, paga mais pelo material as categorias serão misturadas e enviadas para essa empresa na altura da expedição. De forma a aproveitar o transporte as placas gráficas, de rede e de som serão enviadas para a mesma empresa que as placas-mãe.

As outras PCI não especificadas serão separadas de acordo com a empresa C relativamente às placas Telecom com ou sem bobines de cobre e às placas com encaixes e banda

dourada. As restantes irão ser separadas de acordo com as classificações gerais mencionadas anteriormente. De um modo geral serão divididas segundo as categorias:

- Placas Telecom sem bobines de cobre;
- Placas Telecom com bobines de cobre;
- Placas com encaixes e banda dourada;
- Placas 1++;
- Placas PC+/1+;
- Placas MG/2A;
- Placas MG-/2B;
- Placas LG/3.

Os painéis traseiros de servidor serão divididos de acordo com a separação da empresa B que consiste em quatro escalas de preenchimento dos painéis e não serão consideradas as separações da empresa A e C. O painel traseiro que se encontra na Figura 103 pertence à categoria alta.

Na Tabela 28 encontra-se o resumo e comparação entre o método de separação antigo e o novo na empresa.

Como é possível verificar, a classificação passa de dez para vinte categorias. Cada categoria presente nos catálogos apresenta um preço tabelado, embora esses preços variem diariamente, no caso da empresa A, e mensalmente no caso da empresa B e C. Como as PCI são bastante diversificadas o valor real de cada lote é sempre diferente, e pode ser superior ou inferior ao valor tabelado, mas nesse caso não serão feitos reembolsos nem pagamentos extras. Desta forma é possível calcular o ganho esperado pelo envio do material e descontar os custos de transporte.

Após a implementação do novo método de separação, a empresa B deu a conhecer um serviço que também possui que consiste no envio do material sem qualquer método de separação. Neste caso a cotação seria dada no final da extração de acordo com o teor de metais preciosos obtido e o valor a pagar seria o valor real. Este processo é vantajoso, caso o lote enviado tenha um valor superior ao valor tabelado, mas desvantajoso no caso contrário. Por essa razão, a empresa não está interessada e irá implementar o sistema de separação apresentado nesta dissertação.

Tabela 28 - Comparação entre a separação antiga e a nova separação das PCI na empresa

Separação antiga	Nova separação	
Placas pobres	<i>Socket 1 a 8</i>	Placas com encaixes e banda dourada
Placas novas	<i>Socket 370 + slot</i>	Placas 1++
Placas velhas	<i>Socket 462 + 423</i>	Placas PC+/1+
Placas ricas	<i>Socket AM2 + AM3</i>	Placas MG/2A
Placas douradas sem componentes	<i>Socket 478</i>	Placas MG-/2B
Placas prateadas sem componentes	Nova geração (<i>socket</i> plástico não mencionado antes ou metálico)	Placas LG/3
Placas acobreadas sem componentes	Dual (com dois <i>sockets</i>)	Painéis traseiros - categoria alta+
Placas douradas com componentes	Placas gráficas de rede e som	Painéis traseiros - categoria alta
Placas prateadas com componentes	Placas Telecom sem bobines de cobre	Painéis traseiros - categoria média
Placas acobreadas com componentes	Placas Telecom com bobines de cobre	Painéis traseiros - categoria baixa

7. Conclusões

A gestão de resíduos é uma temática importante no que diz respeito à manutenção do planeta Terra tal e qual como o conhecemos. Não é possível mudar o passado, mas é possível fazer a diferença no futuro, mudando mentalidades e procurando soluções para a produção descontrolada de produtos que resultam em resíduos, e conseqüente, a sua deposição em aterro.

As políticas aplicadas à gestão de resíduos têm como intuito a consciencialização da população, mas principalmente dos empresários e/ou produtores de produtos que utilizamos no dia a dia. Criam também a obrigatoriedade de cumprimento de medidas, por exemplo, na responsabilização de todos os intervenientes no ciclo de vida do produto, e a recolha seletiva por parte do produtor.

A hierarquia dos resíduos, a economia circular, os códigos LER e os fluxos específicos de resíduos são conceitos que beneficiam a gestão de resíduos e devem ser usados para otimizar todos os processos de gestão.

Os Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrónicos (REEE) são os resíduos que atualmente apresentam um crescimento exponencial descontrolado devido aos desenvolvimentos tecnológicos e o seu tratamento não está a acompanhar esse aumento. É necessário tomar medidas que permitam realizar a sua reciclagem e aproveitar alguns dos seus componentes para os inserir na economia circular.

A reciclagem e valorização dos REEE ainda necessita de muitos desenvolvimentos, mas como se pode ver pelas metas de eficiências das entidades gestoras em Portugal, é possível recuperar entre 81 % a 96 % dos componentes que os constituem.

A linha de desmantelamento para a reciclagem de REEE permitiria tratar uma maior quantidade no mesmo espaço de tempo relativamente ao desmantelamento manual, embora não seja o ideal no que diz respeito à obtenção dos seus componentes. Por essa razão, a empresa continua a realizar o desmantelamento manual dos REEE com a melhor eficiência possível no que diz respeito à relação custo-benefício, sendo que os restantes REEE entrariam no processo de desmantelamento mecânico que consistiria na sua trituração. Caso se escolhesse o desmantelador mecânico EWD 12, o investimento a realizar seria de 127 000 €, o que resultaria numa prestação mensal de 6 743 € e num ganho bastante superior ao custo. Contudo, devido à elevada mão de obra necessária e ao facto dos REEE não serem o único fluxo a ser tratado na

empresa o EWD 12 não será adquirido e os pequenos eletrodomésticos são encaminhados para um OGR o que só apresenta vantagens para ambos.

O desmantelamento manual dos REEE que não são encaminhados para a empresa parceira resulta nos diversos componentes já apresentados anteriormente. Estes componentes irão ser alvo de uma melhoria, principalmente as PCI. A nova triagem realizada às PCI permite separar os metais não preciosos, como o alumínio e cobre, os componentes perigosos, como as pilhas, e outros componentes que impedem a sua correta reciclagem, como os condensadores de dimensões consideráveis. E ainda, permite a redução dos impactes ambientais associados à sua extração pela reutilização e contribuição para a economia circular.

Uma vez que a produção dos EEE, e conseqüentemente dos REEE, está a aumentar em todo o mundo de uma forma exponencial, é indispensável procurar novas soluções que permitam valorizar ao máximo os seus componentes.

Referências Bibliográficas

- [1] Chandrappa, R.; Das, D.B. *Solid Waste Management: Principles and Practice*, 1^a ed, Springer, Alemanha, 2012, p. 1-18.
- [2] Barles S. History of Waste Management and the Social and Cultural Representations of Waste. *The Basic Environmental History*, 1^a ed, Agnoletti M., Serneri S. N., Springer, Alemanha, 2014, Volume 4, p. 199-226.
- [3] The Industrial Revolution. Khan Academy. Disponível em <<https://www.khanacademy.org/humanities/big-history-project/acceleration/bhp-acceleration/a/the-industrial-revolution>>. Acesso em 19 de janeiro de 2021.
- [4] Cawadias, A. P. Neo-Hippocratism. *The British Medical Journal* **1931**, 2(3696), p. 869.
- [5] Decreto-Lei n.º 178/2006 de 5 de setembro. *Diário da República*. N.º 171/2006, Série I.
- [6] Decreto-Lei n.º 73/2011 de 17 de junho. *Diário da República*. N.º 116/2011, Série I.
- [7] Decreto-Lei n.º 102-D/2020 de 10 de dezembro. *Diário da República*. N.º 239/2020, Série I.
- [8] Decreto Legislativo Regional n.º 29/2011/A de 16 de novembro. *Diário da República*. N.º 220/2011, Série I.
- [9] Parecer do Comité Económico e Social Europeu sobre a “Comunicação da Comissão ao Parlamento Europeu, ao Conselho, ao Comité Económico e Social Europeu e ao Comité das Regiões - O papel da produção de energia a partir de resíduos na economia circular” de 17 de fevereiro de 2017. *Jornal Oficial da União Europeia*.
- [10] Posmanik, R.; Labatut, R. A.; Kim, A. H.; Usack, J. G.; Tester, J. W.; Angenent, L.T. Coupling hydrothermal liquefaction and anaerobic digestion for energy valorization from model biomass feedstocks. *Bioresource Technology* **2017**, 233, p. 134 - 143.
- [11] Diretiva 2018/851/UE do Parlamento Europeu e do Conselho de 30 de maio de 2018. *Jornal Oficial da União Europeia*.
- [12] Desclassificação de Resíduos. Agência Portuguesa do Ambiente. Disponível em <<https://apambiente.pt/residuos/desclassificacao-de-residuos>>. Acesso em 13 de maio de 2021.

- [13] Hart, J.; Adams, K.; Gieseckam, J.; Tingley, D.D.; Pomponi F. Barriers and drivers in a circular economy: the case of the built environment. *Procedia CIRP* **2019**, 80, p. 619-624.
- [14] Michelini, G.; Moraes, R.N.; Cunha, R.N.; Costa, J.M.H.; Ometto, A.R. From Linear to Circular Economy: PSS Conducting the Transition. *Procedia CIRP* **2017**, 64, p. 2-6.
- [15] Mendes, G. A gestão ambiental rumo à economia circular: como o Brasil se apresenta nessa discussão. *Sistemas & Gestão* **2019**, 14, p. 223 - 231.
- [16] Alvarez-de-los-Mozos, E., Renteriab, A. Collaborative robots in e-waste management. *Procedia Manufacturing* **2017**, 11, p. 55 - 62.
- [17] Decisão 2014/955/UE da Comissão de 18 de dezembro de 2014. *Jornal Oficial da União Europeia*.
- [18] Decreto-Lei nº 152-D/2017, de 11 de dezembro. *Diário da República*. N.º 236/2017, Série I.
- [19] Forti V., Baldé C.P., Kuehr R., Bel G. The Global E-waste Monitor 2020: Quantities, flows and the circular economy potential. Universidade das Nações Unidas (UNU)/ Instituto das Nações Unidas para Formação e Pesquisa (UNITAR) – co-hosted Programa Ciclos Sustentáveis (SCYCLE), União Internacional de Telecomunicações (ITU) e Associação Internacional de Resíduos Sólidos (ISWA), Bona/Genebra/Roterdão.
- [20] Per capita electronic waste generation worldwide from 2010 to 2019 (in kilograms per capita). Statista. Disponível em <<https://www.statista.com/statistics/499904/projection-ewaste-generation-per-capita-worldwide/>>. Acesso em 23 de abril de 2021.
- [21] Electronic waste generated worldwide from 2010 to 2019 (in million metric tons). Statista. Disponível em <<https://www.statista.com/statistics/499891/projection-ewaste-generation-worldwide/>>. Acesso em 23 de abril de 2021.
- [22] Poverty and Equity. The world bank. Disponível em <<https://databank.worldbank.org/source/poverty-and-equity>>. Acesso em 4 de maio de 2021.
- [23] Shittu, O. S., Williams, I.D., Shaw, P.J. Global E-waste management: Can WEEE make a difference? A review of e-waste trends, legislation, contemporary issues and future challenges. *Waste Management* **2021**, 120, p.549-563.

[24] Generation of electronic waste worldwide in 2019, by type (in million metric tons). Statista. Disponível em <<https://www.statista.com/statistics/499912/ewaste-generation-worldwide-by-type/>>. Acesso em 23 de abril de 2021.

[25] Recycling rate of e-waste. Eurostat. Disponível em <https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/t2020_rt130/default/table?lang=en>. Acesso em 17 de março de 2021.

[26] Share of e-waste in Europe documented to be collected and properly recycled in 2019, by sub region. Statista. Disponível em <<https://www.statista.com/statistics/1154654/ewaste-documented-recycling-europe/>>. Acesso em 23 de abril de 2021.

[27] World Happiness Report 2021. World Happiness Report. Disponível em <<https://worldhappiness.report/archive/>>. Acesso em 4 de maio de 2021.

[28] Quality of Life Index by Country 2021. Numbeo. Disponível em <https://www.numbeo.com/quality-of-life/rankings_by_country.jsp>. Acesso em 4 de maio de 2021.

[29] Recycling rate of e-waste. Eurostat. Disponível em <https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/t2020_rt130/default/table?lang=en>. Acesso em 17 de março de 2021.

[30] Circular material use rate. Eurostat. Disponível em <https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/cei_srm030/default/table?lang=en>. Acesso em 17 de março de 2021.

[31] Estatísticas do Ambiente: 2019. Instituto Nacional de Estatística. Disponível em <<https://www.ine.pt/xurl/pub/470719178>>. Acesso em 7 de maio de 2021.

[32] Mundada, M.N., Kumar, S., Shekdar, A.V. E-waste: a new challenge for waste management in India. *International Journal of Environmental Studies* **2004**, 61(3), p. 265 - 279.

[33] Buechler, D. T., Zyaykina, N. N., Spencer, C. A., Lawson, E., Ploss, N. M., Hua, I. Comprehensive elemental analysis of consumer electronic devices: Rare earth, precious, and critical elements. *Waste Management* **2020**, 103, p. 67 - 75.

- [34] Lin, H.T., Nakajima, K., Yamasue, E, Ishihara, K. N. An optimum treatment for waste electronic home appliance in remote area: The case of Kinmen, Taiwan. *Waste Management* **2019**, 89, p. 379 - 385.
- [35] Sajid, M., Syed, J.H., Iqbal, M., Abbas, Z., Hussain, I., Baig, M.A. Assessing the generation, recycling and disposal practices of electronic/electrical-waste (E-Waste) from major cities in Pakistan. *Waste Management* **2019**, 84, p. 394 - 401.
- [36] Comunicação da Comissão relativa a orientações técnicas sobre a classificação de resíduos de 9 de abril de 2018. *Jornal Oficial da União Europeia*.
- [37] Rezayat, M.R., Yaghoubi, S., Fander, A. A hierarchical revenue-sharing contract in electronic waste closed-loop supply chain. *Waste Management* **2020**, 115, p. 121 - 135.
- [38] Relatório Anual de Atividades de REEE. Electrão. 2019. Disponível em < <https://www.electrao.pt/relatorios-de-atividade/>>. Acesso em 30 de março de 2021.
- [39] Relatório Anual de Atividade de REEE. ERP Portugal. 2019. Disponível em < <https://erp-recycling.org/pt-pt/relatorios/>>. Acesso em 30 de março de 2021.
- [40] Relatório Anual de Atividade de REEE. WEEECYCLE. 2019. Disponível em < <https://www.weecycle.pt/index.php/relatorios/>>. Acesso em 30 de março de 2021.
- [41] Evolução da gestão de equipamentos elétricos e eletrónicos e resíduos de equipamentos elétricos e eletrónicos. Agência Portuguesa do Ambiente. Ficha Técnica. Versão 1.0. Novembro de 2020.
- [42] Impact of glass from cathode ray tubes (CRT) in achieving the WEEE recycling and recovery targets. WEEE Forum. 2018. Disponível em <http://weee-forum.org/wp-content/uploads/2019/06/CRT-glass_Issue-paper_Final.pdf>. Acesso em 19 de maio de 2021.
- [43] Rautela, R.; Arya, S.; Vishwakarma, S.; Lee, J.; Kim, K.H.; Kumar, S. E-waste management and its effects on the environment and human health. *Science of the Total Environment* **2021**, 773, n.º 145623.
- [44] Ilankoon, I.M.S.K.; Ghorbani, Y.; Chong, M.N.; Herath, G.; Moyo, T.; Petersen, J. E-waste in the international context – A review of trade flows, regulations, hazards, waste management strategies and technologies for value recovery. *Waste Management* **2018**, 82, p. 258 - 275.

- [45] Souza, J.P.; Freitas, P.E.; Almeida, L.D.; Rosmaninho, M.G. Development of new materials from waste electrical and electronic equipment: Characterization and catalytic application. *Waste Management* **2017**, 65, p. 104 - 112.
- [46] Ibanescu, D.; Cailean, D.; Teodosiu, C.; Fiore, S. Assessment of the waste electrical and electronic equipment management systems profile and sustainability in developed and developing European Union countries. *Waste Management* **2018**, 73, p. 39 - 53.
- [47] Solving the E-waste Problem (Step) Initiative: Annual Report 2015/2016. United Nations University. 2017. Disponível em <<http://collections.unu.edu/collection/UNU:6078>>. Acesso em 31 de maio de 2021.
- [48] Olympics. Tokyo 2020 Medal Project: Towards an Innovative Future for All. Disponível em <<https://olympics.com/tokyo-2020/en/games/medals-project/>>. Acesso em 2 de agosto de 2021.
- [49] Lee, D.; Offenhuber, D.; Duarte, F.; Biderman, A.; Ratti, C. Monitour: Tracking global routes of electronic waste. *Waste Management* **2018**, 72, p. 362 - 370.
- [50] Chen, X.; Zhu, J.; Ruan, J.; Tang, Y.T.; Qiu, R.L. Debromination and decomposition mechanisms of phenolic resin molecules in ball milling with nano-zerovalent iron. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering* **2020**, 8, p. 172 - 178.
- [51] Tarifa de Acesso às Redes Eletricidade 2021. Preçário EDP. Publicado a 23 de dezembro de 2021. Disponível em <https://helpcenter.edp.pt/media/2175/tarifa-de-acesso-as-redes_2021.pdf>. Acesso em 21 de julho de 2021.
- [52] Operações de crédito (outros clientes). Preçário Caixa Geral de Depósitos. 5 de julho de 2021. Disponível em <<https://www.cgd.pt/Precario/Documents/Folheto-Completo-Taxas-Juro.pdf>>. Acesso em 21 de julho de 2021.
- [53] Iqbal, A.; Jan, M. R.; Shah, J.; Rashid, B. Dispersive solid phase extraction of precious metal ions from electronic wastes using magnetic multiwalled carbon nanotubes composite. *Minerals Engineering* **2020**, 154, n.º 106414.

Anexos

A. Lista indicativa de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos

Categoria 1 - Equipamentos de regulação da temperatura:

- a) Frigoríficos;
- b) Congeladores;
- c) Equipamentos de distribuição automática de produtos frios;
- d) Equipamentos de ar condicionado;
- e) Equipamentos desumidificadores;
- f) Bombas de calor;
- g) Radiadores a óleo;
- h) Outros equipamentos de regulação da temperatura que utilizem para o efeito outros fluidos que não a água.

Categoria 2 - Ecrãs, monitores e equipamentos com ecrãs de superfície superior a 100 cm²:

- a) Ecrãs;
- b) Aparelhos de televisão;
- c) Molduras fotográficas;
- d) LCD;
- e) Monitores;
- f) Computadores portáteis «*laptop*»;
- g) Computadores portáteis «*notebook*».

Categoria 3 - Lâmpadas:

- a) Lâmpadas fluorescentes clássicas;
- b) Lâmpadas fluorescentes compactas;
- c) Lâmpadas fluorescentes;
- d) Lâmpadas de descarga de alta intensidade, incluindo lâmpadas de sódio sob pressão e lâmpadas de haletos metálicos;
- e) Lâmpadas de sódio de baixa pressão;
- f) LED.

Categoria 4 - Equipamentos de grandes dimensões:

- a) Máquinas de lavar roupa;
- b) Secadores de roupa;
- c) Máquinas de lavar loiça;
- d) Fogões;
- e) Fornos elétricos;
- f) Placas de fogão elétricas;
- g) Luminárias;
- h) Equipamento para reproduzir sons ou imagens;
- i) Equipamento musical (excluindo tubos de órgãos instalados em igrejas);
- j) Aparelhos utilizados no tricô e tecelagem;
- k) Macrocomputadores (*mainframes*);
- l) Impressoras de grandes dimensões;
- m) Copiadoras de grandes dimensões;
- n) Caça-níqueis (*slot machines*) de grandes dimensões;
- o) Dispositivos médicos de grandes dimensões;
- p) Instrumentos de monitorização e controlo de grandes dimensões;
- q) Distribuidores automáticos de grandes dimensões que fornecem produtos e dinheiro;
- r) Painéis fotovoltaicos.

Categoria 5 - Equipamentos de pequenas dimensões:

- a) Aspiradores;
- b) Aparelhos de limpeza de alcatifas;
- c) Aparelhos utilizados na costura;
- d) Luminárias;
- e) Micro-ondas;
- f) Equipamentos de ventilação;
- g) Ferros de engomar;
- h) Torradeiras;
- i) Facas elétricas;
- j) Cafeteiras elétricas;
- k) Relógios;

- l) Máquinas de barbear elétricas;
- m) Balanças;
- n) Aparelhos para cortar o cabelo e outros aparelhos para o cuidado do corpo;
- o) Calculadoras de bolso;
- p) Aparelhos de rádio;
- q) Câmaras de vídeo;
- r) Gravadores de vídeo;
- s) Equipamentos de alta-fidelidade;
- t) Instrumentos musicais;
- u) Equipamento para reproduzir sons ou imagens;
- v) Brinquedos elétricos e eletrónicos;
- w) Equipamentos de desporto;
- x) Computadores para ciclismo, mergulho, corrida, remo, e outros desportos;
- y) Detetores de fumo;
- z) Reguladores de aquecimento;
- aa) Termóstatos;
- bb) Ferramentas elétricas e eletrónicas de pequenas dimensões;
- cc) Dispositivos médicos de pequenas dimensões;
- dd) Instrumentos de monitorização e controlo de pequenas dimensões;
- ee) Distribuidores automáticos de pequenas dimensões;
- ff) Equipamentos de pequenas dimensões com painéis fotovoltaicos integrados.

Categoria 6 - Equipamentos informáticos e de telecomunicações de pequenas dimensões
(com nenhuma dimensão externa superior a 50 cm):

- a) Telemóveis;
- b) GPS;
- c) Calculadoras de bolso;
- d) Routers;
- e) Computadores pessoais;
- f) Impressoras;
- g) Telefones.

B. Folha de Registo - Monitorização do Desmantelamento dos REEE

Tabela B. 1 - Folha de registo para a monitorização do desmantelamento dos REEE

Entrada resíduo			DESCONTAMINAÇÃO			DESMANTELAMENTO							
						Plástico (kg)	Componentes (kg)	Cabos elétricos (kg)	Metais Ferrosos (kg)	Metais Não Ferrosos (kg)	Vidro (kg)	Rejeitado / CDR (kg)	
LER	Categ.	Peso (ton)	Certific. (S/N)	Componentes Perigosos	Peso (kg)	19 12 04	16 02 16	16 02 16	19 12 02	19 12 03	19 12 05	19 12 12	
	Visores			Drives	Pequenos eletrodomésticos	Fitas cobre	Ventoinh	Balastros	Placas (geral)	Outros	Outros	Outros	Outros
	Outros			Outros	Outros	Outros	Outros	Outros	Outros	Outros	Outros	Outros	

C. Componentes das Placas de Circuito Impresso

Alguns componentes das placas são responsáveis pela sua classificação, como no caso dos chips BGA, circuitos integrados e EPROMs, como se pode ver nas Figuras C.1, C.2, C.3, C.4 e C.5.



Figura C. 1 - Circuito Integrado.

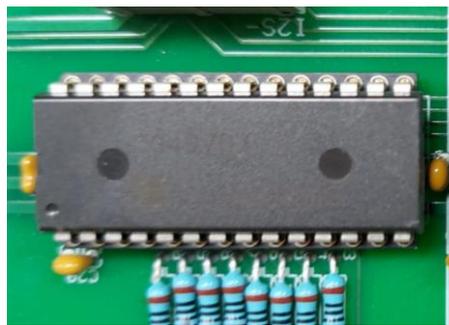


Figura C. 2 - EPROM.



Figura C. 3 - Chip BGA.



Figura C. 4 - Dissipador de calor de alumínio.



Figura C. 5 - Condensador.