



LICENCIATURA ENGENHARIA DO AMBIENTE

## Projeto Integrador

**Pegada de carbono associada à reparação de computadores - caso de estudo ReBOOT**

Ano letivo 2022/23

**Anselmo Mário Dias Cardoso**

**Entidade:** Câmara Municipal do Porto

**Tutor Entidade:** Manuel António Ferrinho Semedo, Departamento Municipal de Planeamento e Gestão Ambiental

**Tutor FEUP:** Joana Maia Dias, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais

Porto, 26 de maio de 2023

## Resumo

No âmbito da unidade curricular Projeto Integrador, a alocação do meu estágio curricular surge associada ao projeto ReBOOT, promovido pelo Departamento Municipal de Planeamento e Gestão Ambiental da Câmara Municipal do Porto.

O principal objetivo do trabalho desenvolvido consiste na quantificação da pegada de carbono associada à reparação de computadores, que visa promover o prolongamento do tempo de vida dos equipamentos informáticos a partir da substituição de um ou mais componentes avariados, num universo de 500 unidades.

A abordagem deste estudo estabelece diferentes cenários de modalidade de reparação, comparando posteriormente as dimensões de impacte associado às emissões da produção e transporte dos componentes, nomeadamente em função da atitude generalizada do consumidor em adquirir um novo equipamento, comportamento que o projeto ReBOOT pretende alterar encaminhando os equipamentos informáticos para a reparação.

Os resultados obtidos permitem concluir que a modalidade de reparação representativa do projeto ReBOOT, compreende as reparações de menor impacte ambiental.

Importa realçar que a evolução rápida e contínua das tecnologias da informação e comunicação, bem como a complexidade dos processos produtivos envolvidos nos componentes relevantes em estudo, resultam em considerações de natureza ambiental desfasadas do estado de arte corrente e que urge cautela na interpretação dos resultados obtidos, tal como na literatura existente.

Finalmente, consideram-se cumpridos os objetivos delineados, na medida em que foi quantificada a pegada de carbono das reparações associadas ao projeto ReBOOT.

## Índice

Resumo.....	II
1 Objetivos .....	3
2 Enquadramento.....	3
2.1 Projeto ReBOOT .....	3
2.2 Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrónicos .....	4
2.3 Princípios de Gestão e Tratamento de Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrónicos.....	5
2.4 Evolução de REEE em Portugal.....	6
2.5 Resíduos IT na Área LIPOR .....	7
3 Metodologia.....	8
3.1 Pegada de carbono .....	8
3.2 Unidade funcional.....	8
3.3 Fronteiras do sistema .....	8
3.4 Emissões associadas à produção por componente.....	9
3.5 Emissões associadas ao transporte até ao cliente.....	10
3.6 Cenários considerados.....	10
4 Resultados e Discussão .....	11
4.1 Resultados .....	11
4.2 Discussão dos resultados .....	14
5 Avaliação Global .....	14
5.1 Limitações .....	15
6 Referências bibliográficas .....	16
A Anexo A.....	A

**Lista de Figuras**

Figura 1: Evolução da colocação de equipamentos informáticos e telecomunicações (categoria 6) e recolha de resíduos de IT, em quilotoneladas (kt). Fonte: Eurostat ..... 6

Figura 2: Contribuição para as emissões de cada etapa do ciclo de vida de um computador portátil, em kg de CO<sub>2</sub>e. .... 9

Figura 3: Emissões associadas a cada cenário definido, em CO<sub>2</sub>e..... 14

Figura 4: Evolução da colocação de equipamentos elétricos e eletrónicos (EEE) e recolha de resíduos de EEE, em quilotoneladas (kt). Fonte: Eurostat..... A

Figura 5: Evolução da taxa de valorização e reutilização de resíduos IT, face aos objetivos mínimos legislados. Fonte: Eurostat ..... B

Figura 6: Distribuição percentual dos componentes intervencionadas em 500 reparações. Fonte: RecycleGekks ..... B

Figura 7: Emissões, em percentagem, associadas às reparações, por cenário, em quilogramas de CO<sub>2</sub>e. .... C

**Lista de Tabelas**

Tabela 1: Metas nacionais de recolha, valorização e preparação para reutilização e reciclagem de REEE em Portugal..... 5

Tabela 2: Quantidade de REEE e resíduos de categoria legal 6 recolhidos pela LIPOR, entre 2019 e 2022. Fonte: ERP-Portugal ..... 7

Tabela 3: Emissões associadas à produção de componentes relevantes, em kg de CO<sub>2</sub>e 9

Tabela 4: Emissões associadas ao transporte até ao cliente de componentes relevantes, em kg de CO<sub>2</sub>e ..... 10

Tabela 5: Estimativa do número de peças necessárias, peças recuperadas (stock ReBOOT) e peças a adquirir, em função do objetivo de reparação (500 equipamentos), por componente relevante..... 11

Tabela 6: Emissões associadas ao cenário B, em quilogramas de CO<sub>2</sub>e ..... 13

Tabela 7: Emissões associadas ao cenário C, em quilogramas de CO<sub>2</sub>e ..... 13

Tabela 8: Classificação de EEE colocados no mercado nas seguintes categorias e respetivos resíduos. Fonte: DL-152-D/2017 ..... A

Tabela 9: Rácio de peças utilizadas em cada reparação. Fonte: RecycleGekks ..... B

Tabela 10: Estimativa de quantidade de peças necessárias, peças recuperadas (stock ReBOOT) e peças a adquirir, em função do objetivo de reparação (500 computadores). ... C

## 1 Objetivos

Em virtude da alocação do meu estágio curricular ao projeto ReBOOT, promovido pelo Departamento Municipal de Planeamento e Gestão Ambiental da Câmara Municipal do Porto, foram definidos os seguintes objetivos de trabalho:

- Levantamento e análise bibliográfica dos impactos ambientais de equipamentos informáticos, através da revisão da literatura, considerando o ciclo de vida de um computador portátil;
- Levantamento quantitativo dos equipamentos informáticos descartados junto dos parceiros do projeto (ERP Portugal e LIPOR);
- Cálculo das emissões de carbono e redução de consumo de materiais associados à reparação e/ou substituição de peças no âmbito do projeto

Todos os objetivos específicos definidos concretizam-se na estimativa final do impacto geral do projeto ReBOOT, em termos de poupança de recursos.

## 2 Enquadramento

### 2.1 Projeto ReBOOT

No âmbito do projeto “Asprela + Sustentável” promovido pela EEA Grants no programa “Ambiente, Alterações Climáticas e Economia de Baixo Carbono”, o ReBOOT alinha com as pretensões previstas no Roadmap para a Economia Circular e materializa os compromissos da CMP quanto à extensão da vida útil do material informático, num incentivo à transição para um modelo de economia circular (Ministério do Ambiente e Ação Climática & EEA Grants Portugal, 2023).

O projeto ReBOOT pretende aumentar o tempo de vida útil dos equipamentos informáticos e eletrónicos promovendo a reutilização destes, a partir da reparação ou upcycle, facilitando o acesso a estes mesmos dispositivos por parte de famílias em situações socioeconómicas vulneráveis, aliviando a pobreza digital e a pressão sobre recursos não renováveis, simultaneamente produzindo incentivo aos modelos de negócios sustentáveis, em conformidade com os objetivos do Pacto Ecológico Europeu (2019) e do novo Plano de Ação para a Economia Circular (2020).

O projeto ReBOOT envolve, como parceiros, elementos-chave da cadeia de recolha e valorização: a LIPOR (Associação de Municípios para a Gestão Sustentável de Resíduos do Grande Porto), PortoAmbiente (empresa municipal de gestão de resíduos) e a European Recycling Platform Portugal (ERP Portugal, entidade gestora do fluxo específico de resíduos de equipamentos elétricos e eletrónicos).

A dinamização de infraestruturas partilhadas, empreendendo práticas de transformação de produtos em fim-de-vida em produtos reutilizáveis, constituem objetivos que procuram

alinhar com eixos delineados no RoadMap para a Economia Circular 2030 do Município do Porto (Monteiro, 2021). Em termos objetivos, pretende-se receber, recuperar e doar 500 equipamentos reconicionados, otimizando-os, ao longo dos 36 meses do projeto.

## 2.2 Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrónicos

Tendo como principal objetivo deste estágio curricular, no âmbito do Projeto ReBOOT, a análise dos potenciais impactos ambientais das reparações aos equipamentos informáticos, definindo como unidade de estudo um computador portátil, importa enquadrar, pela sua natureza, o Fluxo Específico de Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrónicos.

Na atual redação, no contexto legislativo, define-se o fluxo específico de resíduos, no Decreto-Lei nº 152-D, a partir da sua retificação mais recente de 21 de janeiro de 2021, como categorias de resíduos que, pela quantidade produzida ou propriedades intrínsecas, urge uma gestão diferenciada, desde a sua origem até ao seu destino final. A gestão de resíduos idênticos permite otimizar a utilização de métodos de tratamento de resíduos e construir oportunidades para cada fluxo.

Os Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrónicos (REEE) constituem todos e quaisquer equipamentos elétricos e eletrónicos (EEE) de que o detentor de desfaz, intencionalmente ou com carácter obrigatório, incluindo todos os componentes, subconjuntos e materiais consumíveis que fazem parte integrante do equipamento quando este é descartado. Por outro lado, compreende-se por EEE os 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 1000 V para corrente alternada e 1500 V para corrente contínua (APA, 2023).

Em seguimento da legislação europeia, Diretiva 2012/19/EU, a legislação portuguesa classifica os EEE em 6 categorias de acordo com a funcionalidade dos equipamentos (Figura 1 do Anexo A). A unidade estrutural em análise, os computadores portáteis pessoais, enquadram-se na definição da categoria legal 6: equipamentos informáticos e de telecomunicações (IT) de pequenas dimensões (nenhuma dimensão externa superior a 50 cm).

Importa referir que a legislação que regula o fluxo de REEE tem por base o princípio da responsabilidade alargada do produtor, sendo atribuída 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 onde entidades como a ERP realizam a gestão.

## 2.3 Princípios de Gestão e Tratamento de Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrónicos

No âmbito do sistema integrado de gestão de REEE, as entidades gestoras encontram-se sujeitas aos princípios e objetivos de gestão estabelecido na legislação, nomeadamente a estruturação de uma rede de recolha seletiva, o financiamento dos custos de triagem, armazenagem, transporte, tratamento, valorização e eliminação dos REEE depositados na rede de recolha seletiva, e o cumprimento de metas de recolha e objetivos mínimos de valorização. Para além da obrigação de adesão a um sistema coletivo, os produtores de EEE estão sujeitos a obrigações de registo nos termos da lei, de forma a tornar possível o acompanhamento e a fiscalização do cumprimento das suas obrigações (APA, 2023).

A aplicação das medidas e ações instituídas na legislação nacional concretizou-se através do licenciamento, em abril de 2006, das seguintes entidades gestoras de sistemas coletivos de gestão de REEE: AMB3E (mais recentemente Electrão), ERP Portugal e, mais recentemente, foi concedida licença a uma nova entidade gestora, a E-CYCLE.

A legislação nacional, na redação do DL-152-D/2017, estabelece na Secção IV o preâmbulo dos Princípios de Gestão e Tratamento de Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrónicos, onde constam metas nacionais de recolha (artigo 56º), objetivos mínimos de valorização (artigo 57º e anexo X) destes resíduos, bem como orientações e regras específicas para as operações de recolha, tratamento e preparação para a reutilização e valorização (artigos 58º - artigo 63º).

Apresentam-se, sucintamente, na Tabela 1, as metas nacionais de recolha e objetivos mínimos de valorização de REEE, em vigor desde 15 de agosto de 2018, para a categoria legal 6:

*Tabela 1: Metas nacionais de recolha, valorização e preparação para reutilização e reciclagem de REEE em Portugal*

<b>Operação</b>	<b>Objetivo</b>
Recolha	65 % do peso médio dos EEE colocados no mercado nos três anos anteriores ou, alternativamente, 85 % dos REEE gerados em Portugal, considerando o peso total dos REEE recolhidos provenientes de utilizadores particulares e não particulares.
Valorização	75 % devem ser valorizados
Preparação para reutilização e reciclagem	55 % devem ser preparados para reutilização e reciclagem;

## 2.4 Evolução de REEE em Portugal

Apesar de todas as entidades gestoras de resíduos integrantes do sistema integrado de gestão de REEE (SIGREEE) reportarem, anualmente, os dados relativos à recolha e encaminhamento para tratamento destes resíduos, denotam-se disparidades no reporte em categorias como “EEE colocados no mercado” entre as diferentes entidades gestoras.

Na medida em que estes dados refletem, globalmente, a realidade em território nacional, entende-se que o facto de apresentarem valores distintos para o mesmo período representa uma fragilidade ou inconsistência na análise individual dos mesmos. Como tal, o apuramento destes dados tendo em vista a sua análise parece mais coesa e válida tomando o reporte comunitário a que a Agência Portuguesa do Ambiente (I.P.) é obrigada, de acordo com nº5 do artigo 97º-A do Regime Unificado dos Fluxos Específicos de Resíduos (DL-152-D/2017), onde publica os resultados de gestão alcançados a nível nacional para cada fluxo específico de resíduos, após a validação pela Comissão Europeia.

A Figura 4 demonstra a evolução da quantidade de EEE colocados no mercado nacional, bem como a quantidade de resíduos de EEE recolhidos em Portugal, entre 2009 e 2020.

Em Portugal, verifica-se a tendência crescente de introdução de produtos elétricos e eletrónicos no mercado, cerca de 212 mil toneladas em 2020, refletindo o paulatino crescendo do volume de produção mundial e a acessibilidade a estes produtos. De acordo com o reporte comunitário, Portugal tem sido consistentemente incapaz de cumprir as metas de recolha, estabelecidas no contexto legislativo, nos últimos anos.

Complementarmente, a Figura 1 apresenta a mesma evolução relativa à quantidade de equipamentos informáticos e de telecomunicações de pequenas dimensões colocados no

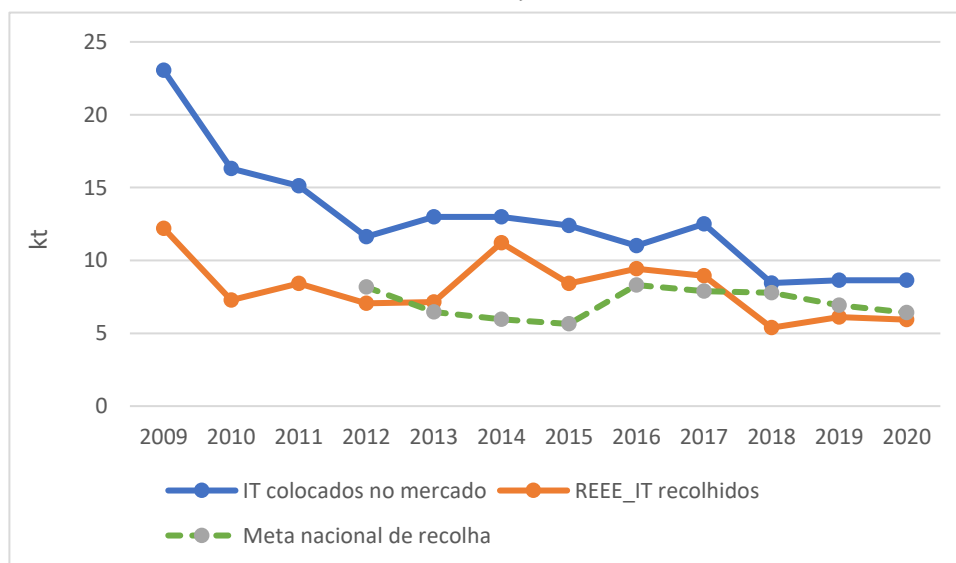


Figura 1: Evolução da colocação de equipamentos informáticos e telecomunicações (categoria 6) e recolha de resíduos de IT, em quilotoneladas (kt). Fonte: Eurostat



mercado e a quantidade, em toneladas, de resíduos recolhidos, desta categoria, para a mesma linha temporal.

Contrariando a tendência de crescimento da quantidade de novos produtos que chegam ao mercado português, os equipamentos IT introduzidos mostram uma descida considerável ao longo do último decénio, perto de 8,6 mil toneladas em 2020. Quanto aos quantitativos de IT recolhidos, estes refletem uma diminuição mais suave comparativamente à desaceleração da introdução de novos produtos no mercado.

Em respeito aos princípios de tratamento e gestão de REEE, a Figura 5 estabelece o paradigma, em Portugal, para os compromissos de valorização e preparação para reutilização e reciclagem destes equipamentos .

Logo a partir de 2017, os dados reportados pela Agência Portuguesa do Ambiente revelam ineficiência no tratamento dos resíduos de equipamentos de IT, nomeadamente no período subsequente a 2019, verificando-se incumprimentos face aos objetivos mínimos estabelecidos para a valorização destes resíduos.

## 2.5 Resíduos IT na Área LIPOR

A LIPOR é o sistema de gestão de resíduos em alta que assegura a receção e o tratamento de resíduos urbanos onde se incluem os REEE, nos municípios de Espinho, Gondomar, Maia, Matosinhos, Porto, Póvoa de Varzim, Valongo e Vila do Conde (alguns integrantes da AMP) onde é possível compreender a realidade particular dos resíduos de IT na região abrangente da Área Metropolitana do Porto.

A partir dos dados reportados pela ERP-Portugal (Tabela 2), como Entidade Gestora licenciada do SIGREEE, que encaminha para operadores de tratamento estes resíduos de EEE, é possível estabelecer um ponto de situação relativamente à área abrangida pela recolha seletiva da LIPOR. Dado que a LIPOR é uma entidade não licenciada para o tratamento e valorização de REEE, apenas recebe estes resíduos sendo que a ERP-Portugal é mediadora do encaminhamento para os devidos operadores de tratamento destes REEE.

*Tabela 2: Quantidade de REEE e resíduos de categoria legal 6 recolhidos pela LIPOR, entre 2019 e 2022. Fonte: ERP-Portugal*

	2019	2020	2021	2022
REEE	1 581,91	1 729,74	1 550,35	1 392,93
IT	20,60	14,28	23,37	15,20

Os dados relativos às quantidades (toneladas) de resíduos de IT recolhidos pela LIPOR mostram, face aos quantitativos genéricos de recolha de REEE, alguma insignificância desta

categoria comparativamente ao panorama nacional de recolha destes resíduos, correspondendo somente a 0,2% deste último.

### **3 Metodologia**

#### **3.1 Pegada de carbono**

Cumprindo o objetivo de analisar quantitativamente o potencial impacte ambiental das reparações de equipamentos informáticos associados ao projeto ReBOOT, e após o levantamento e revisão bibliográfica em torno dos impactes destes equipamentos, considerando a diferentes etapas do seu ciclo de vida, definiu-se a pegada de carbono como ferramenta de análise.

A pegada de carbono de um produto é a metodologia que estima e quantifica as emissões totais de gases de efeito de estufa, em unidades de carbono equivalente, ao longo do seu ciclo de vida, tal como desde a extração de matéria-prima utilizada na produção até ao fim de vida do produto (CarbonTrust, 2007).

#### **3.2 Unidade funcional**

A partir dos dados apresentados pela literatura, que estabelece como unidade funcional para o estudo um modelo de computador portátil Dell Latitude E6400, é possível compreender o peso relativo do impacte de cada uma das fases do seu ciclo de vida (O'Connell e Stutz, 2010). O estudo referenciado tem ligação à empresa e apresenta detalhe muito relevante que pode auxiliar a elaboração de estudos a partir de outras ferramentas (tais como ACV) (Liu et al., 2016).

#### **3.3 Fronteiras do sistema**

O estudo estabelece como fronteiras do sistema em análise os seguintes parâmetros, que permitem compreender com maior pormenor as etapas relevantes na quantificação dos impactes das reparações em estudo:

- Produção:
  - extração de matéria-prima e produção de componentes na Ásia;
  - transporte para montagem final;
  - montagem final na Europa (Polónia);
- Transporte:
  - transporte para o cliente (Alemanha);
- Fase de uso:
  - uso na Europa, atendendo ao mix energético respetivo, para um tempo de vida de 4 anos;
- Fim-de-vida (EoL):

- transporte para reciclagem (500km);
- fim-de-vida com deposição em aterro ou reciclagem.

A pegada de carbono total para um computador portátil varia, na literatura em análise, entre 300-400 kg de emissões de CO<sub>2</sub> equivalente, ainda que o estudo considere, para um produto comercializado na Europa, a pegada de carbono total de 320 kg de CO<sub>2</sub> equivalente (O’Connell & Stutz, 2010). As principais contribuições advêm da etapa de produção, cerca de 50%, e também da fase de uso, aproximadamente 47% (Figura 2).

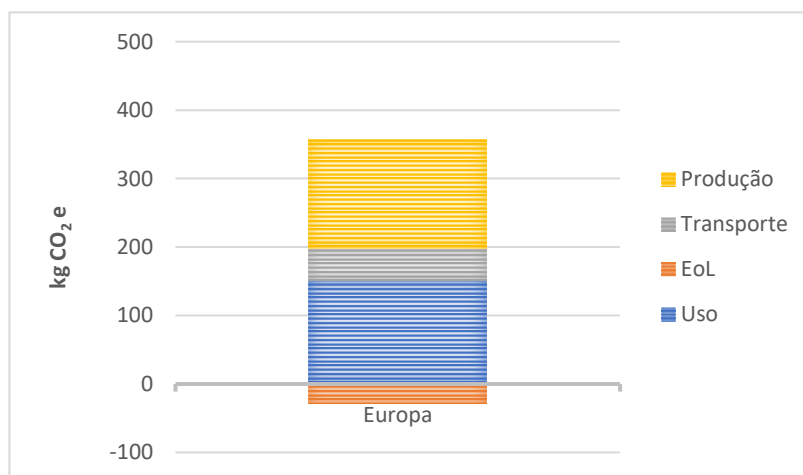


Figura 2: Contribuição para as emissões de cada etapa do ciclo de vida de um computador portátil, em kg de CO<sub>2</sub>e.

Acrescentar que a fase de fim-de-vida considera, na Figura 2, uma taxa de preparação para reutilização e reciclagem igual a 75%, sugerindo ainda que as emissões evitadas pelo material reciclado sejam interpretadas como um crédito de potenciais emissões.

Na medida em que se procuram conhecer as contribuições parciais relativas aos componentes que possam ser substituídos no âmbito de uma reparação, o estudo em análise indica que a produção de componentes (extração de materiais, processamento e transporte para montagem) representa a maior contribuição para as emissões (ca. 75%) da totalidade da etapa de produção. Importa, pois, adquirir os valores correspondentes às emissões associadas à produção e transporte de cada um dos componentes relevantes nas reparações de equipamentos no projeto ReBOOT.

### 3.4 Emissões associadas à produção por componente

Assim, a partir dos dados publicados (O’Connell & Stutz, 2010), é possível apresentar um catálogo de emissões de gases de efeito de estufa por componente relevante (Tabela 3).

Tabela 3: Emissões associadas à produção de componentes relevantes, em kg de CO<sub>2</sub>e

Componente	Emissões (kg CO <sub>2</sub> eq)
Ecrãs	38,0
Baterias	9,5

Discos HDD/SD	2,0
Tampas	25,0
Memórias RAM	25,2
Teclado	1,0

### 3.5 Emissões associadas ao transporte até ao cliente

A partir da base de dados partilhada, após contacto estabelecido com a autora do artigo “Disassembly-based bill of materials data for consumer electronic products” (Babbitt et al., 2020), foi possível aceder à lista de componentes (BoM) de um computador portátil equiparado ao modelo em análise no estudo e, assim, determinar a percentagem, em massa, dos componentes relevantes. Esta determinação permite calcular a contribuição de cada componente para as emissões associadas ao transporte do produto final até ao cliente, conforme apresentado na Tabela 4.

*Tabela 4: Emissões associadas ao transporte até ao cliente de componentes relevantes, em kg de CO<sub>2</sub>e*

Componente	Percentagem, em massa	Emissões (kg CO <sub>2</sub> eq)
Ecrãs	18%	8,72
Baterias	14%	6,96
Discos HDD/SD	5%	2,32
Tampas	23%	11,28
Memórias RAM	13%	6,35
Teclado	6%	2,72

### 3.6 Cenários considerados

Esta é uma etapa relevante na quantificação do impacte geral do projeto, uma vez que foram delineados, na metodologia adotada, 3 cenários possíveis de reparação de uma unidade funcional:

- Cenário A (Novo), implica a aquisição de uma nova unidade, ou seja, o consumidor/utilizador opta pela não reparação do computador portátil (passível de ser reparado);
- Cenário B (ReBOOT Real), constitui um modelo híbrido da reparação, que é efetuada substituindo-se os componentes disfuncionais pela conjugação possível de peças recuperadas, mediante disponibilidade, ou peças novas. Este é o cenário representativo do projeto ReBOOT, refletindo a filosofia de reparabilidade do projeto ReBOOT, na medida em que concentra a atenção no prolongamento do

tempo de vida do equipamento a partir da substituição de um ou mais componentes avariados.

- Cenário C (reparação convencional), este cenário permite estabelecer o paradigma das emissões associadas a uma intervenção convencional, onde a reparação é efetuada a partir de peças novas;

Estes cenários são considerados já que o projeto ReBOOT reconhece a insuficiência de stock de peças recuperadas face ao objetivo de reparação definido.

Por fim, é estabelecida a comparação das dimensões de impacte associado às emissões da produção e transporte dos componentes nos diferentes cenários, nomeadamente em função do cenário A que é aquele que reflete a atitude generalizada do consumidor em adquirir um novo equipamento, comportamento que o projeto ReBOOT pretende alterar encaminhando os equipamentos informáticos para a reparação.

## 4 Resultados e Discussão

### 4.1 Resultados

Em função dos dados recolhidos através da CMP e RecycleGeeks, e atendendo ao objetivo de reparação de 500 unidades portáteis pelo projeto ReBOOT, importa conhecer o espólio de peças recuperadas, de modo a aferir as quantidades de peças a adquirir.

Assim, segundo os dados partilhados pela entidade acolhedora (CMP) em parceria com o RecycleGeeks, parceiros do projeto e sediados no UPTEC, o projeto dispõe inicialmente de 98 peças correspondentes a discos SSD fornecidos diretamente pela Porto Digital (parceira do projeto). De acordo com os dados partilhados pelos Recycle Geeks, é possível recuperar 30% das peças de um computador em fim de vida. Tendo em conta o objetivo de recolher 600 equipamentos no projeto ReBOOT, assume-se que 180 peças serão recuperadas. Conforme o rácio de componentes necessários por reparação determinado (Tabela 9 e Figura 6 - Anexo A), urge a aquisição de 357 novas peças para substituição, tomando a oferta da Porto Digital como uma aquisição (\*).

*Tabela 5: Estimativa do número de peças necessárias, peças recuperadas (stock ReBOOT) e peças a adquirir, em função do objetivo de reparação (500 equipamentos), por componente relevante.*

Componente	% reparações p/ componente	Peças necessárias (un.)	Peças a adquirir (un.)	Stock_reBOOT (recuperação) (un.)
Ecrãs	30%	180	126	54

Baterias	20%	120	84	36
Discos	15%	90	98*	*
Ecrãs com <i>touchscreen</i>	10%	60	42	18
Teclado para portátil	10%	60	42	18
Tampas	10%	60	42	18
Memórias RAM	5%	30	21	9
<b>Total</b>		<b>600</b>	<b>455 (357*)</b>	<b>153</b>

Importa referir que a distribuição destes resultados, por somente obedecer à percentagem de reparações em cada componente que é substituído, não reflete a complexidade e incerteza da recuperação de componentes a partir de computadores portáteis. Os resultados apresentados contemplam um excedente de 8 unidades de discos de memória SSD, em respeito ao enunciado anteriormente.

Tendo em conta os cenários definidos na metodologia, procedeu-se ao cálculo das emissões de CO<sub>2</sub>e associadas à etapa de produção dos componentes relevantes nas diferentes modalidades de reparação (cenário B e C). Esta quantificação é perspetivada através da emissão de poluentes (CO<sub>2</sub>e) relativos aos processos de produção dos componentes e transporte até ao cliente.

O cenário A, pela natureza da escolha, reflete a pegada de carbono associada à aquisição, de 500 unidades de computadores portáteis na Europa, nas vertentes da produção e transporte até ao consumidor, totalizando 87,84 toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente.

Para o cenário B, tendo que o espólio do projeto ReBOOT é incapaz de satisfazer as necessidades das reparações, a reparação híbrida aproveita a ponderação de componentes quantificados na Tabela 5. Atendendo à necessidade de adquirir novas peças, esta compra resulta num impacte ambiental de cerca de 12 toneladas de emissões de CO<sub>2</sub> equivalente. Por outro lado, as emissões evitadas pela reutilização de peças recuperadas totalizam aproximadamente 6,2 toneladas, conforme apresentado na Tabela 6 .

Tabela 6: Emissões associadas ao cenário B, em quilogramas de CO<sub>2</sub>e

Componente	Cenário B	
	Emissões da produção e transporte de peças novas (kg CO <sub>2</sub> e)	Emissões evitadas pela recuperação de peças usadas (kg CO <sub>2</sub> e)
Ecrãs	5886,1	2522,6
Baterias	1382,8	1975,4
Discos	423,5	-
Ecrãs com <i>touchscreen</i>	1962,0	725,8
Teclado para portátil	156,0	66,9
Tampas	1523,7	653,0
Memórias RAM	575,9	226,8
<b>Total</b>	<b>11910,0</b>	<b>6170,5</b>

Para o cenário C, admitindo as reparações que são promovidas utilizando exclusivamente componentes adquiridos novos, a pegada de carbono estimada para esta modalidade de reparação representa emissões de CO<sub>2</sub> equivalente de aproximadamente 16,8 toneladas, conforme apresentada na Tabela 7.

Tabela 7: Emissões associadas ao cenário C, em quilogramas de CO<sub>2</sub>e

Cenário C	
Componente	Emissões peças novas (kg CO <sub>2</sub> e)
Ecrãs	8408,8
Baterias	1975,4
Discos	388,9
Ecrãs com <i>touchscreen</i>	2802,9
Teclado para portátil	222,9
Tampas	2176,7
Memórias RAM	822,6
<b>Total</b>	<b>16798,3</b>

## 4.2 Discussão dos resultados

Os resultados obtidos para cada um dos cenários definidos evidenciam que qualquer uma das opções de modelo de reparação é preferível face à pegada de carbono associada à aquisição de novos equipamentos (cenário A), conforme o objetivo de reparação do projeto.

Verifica-se que o cenário B compreende a modalidade de reparação de menor impacto ambiental, totalizando 86% de poupança de emissões de CO<sub>2</sub>e face ao cenário A (Figura 3). A reparação ReBOOT representa, ainda, relativamente à reparação convencional (cenário C), a poupança de 29% das emissões de poluentes.

O cenário C, pela aquisição de novos componentes para as reparações associadas, emite mais 41% de CO<sub>2</sub>e do que o cenário B, ainda que represente uma poupança de 81% de emissões face à eventualidade de adquirir equipamentos novos (cenário A).

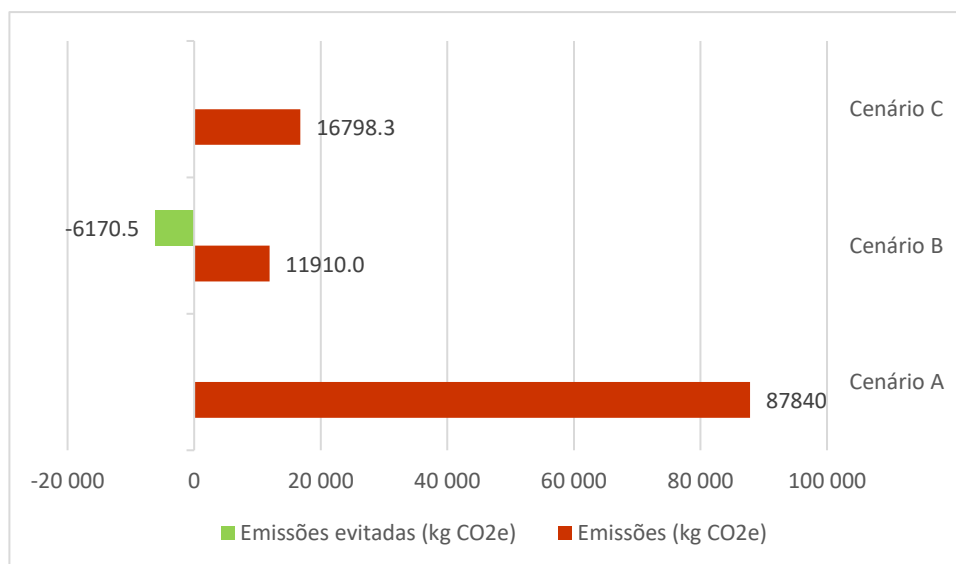


Figura 3: Emissões associadas a cada cenário definido, em CO<sub>2</sub>e.

Uma análise mais profunda dos resultados, a partir da Figura 7 do Anexo, mostra que a combinação de ecrãs (e ecrãs com *touchscreen*), as tampas (*casing*) e as baterias representa, em média, 92% das emissões associadas às reparações do projeto ReBOOT. Ainda que a intensidade energética associada aos processos produtivos destes componentes justifique a relevância das suas contribuições para a etapa de produção, no contexto das reparações do projeto ReBOOT a distribuição dos componentes utilizados na reparações é o fator mais relevante (Figura 6 do Anexo).

## 5 Avaliação Global

Ao longo das semanas de trabalho desenvolvido junto do Departamento Municipal de Planeamento e Gestão Ambiental da Câmara Municipal do Porto, no âmbito do projeto



ReBOOT, foram debatidas as principais dificuldades e entraves, relatados no capítulo Limitações, relacionados com a revisão bibliográfica da literatura incidente no contexto de quantificação das emissões relativas ao processo produtivo de um computador portátil.

O objetivo e âmbito do projeto permitiram contactar, com maior proximidade e num contexto mais realista, com ferramentas de análise e decisão ambiental, promovendo o aprofundamento de conhecimentos relacionados com a definição de uma metodologia e fronteiras do sistema em estudo. Como tal, foi cumprido com sucesso o objetivo delineado para a compreensão do ciclo de vida de um computador portátil, bem como a quantificação e contextualização do paradigma dos resíduos de equipamentos elétricos e eletrónicos em Portugal e também na área sujeita à atuação da LIPOR.

O cálculo das emissões associadas à reparação das unidades funcionais condizentes com o objetivo geral do ReBOOT, constituíram maior empenho e dedicação, sobretudo na interpretação e tratamento dos dados recolhidos.

Finalmente, julga-se cumprido o objetivo principal deste estágio curricular, na medida em que foi quantificada a pegada de carbono das reparações associadas ao projeto ReBOOT, concluindo que a modalidade de reparação aplicada no âmbito do projeto representa a maior poupança de emissões de CO<sub>2</sub> equivalente e, simultaneamente, a menor emissão por reparação associada. Estas conclusões são suportadas pela literatura revista, na medida em que, para os computadores portáteis, relativamente aos impactes ambientais, a reparação é consistentemente a opção mais favorável (André et al., 2019; Bovea et al., 2020; Hischier & Böni, 2021).

## 5.1 Limitações

Como consideração final, importa frisar que a evolução rápida e contínua das tecnologias da informação e comunicação induz alterações constantes na composição material dos componentes de um computador portátil. Como tal, a representatividade do produto em análise nos estudos referenciados resulta em considerações de natureza ambiental desfasadas do estado de arte corrente (Tecchio P., Ardente F., Marwede M., & Clemm C., Dimitrova G. Mathieux F., 2018)

Relativamente à produção de componentes, a incerteza associada às considerações da análise é exacerbada pela complexidade dos processos produtivos envolvidos. Assim, é aconselhada cautela e ponderação na interpretação da literatura existente, tendo em conta as considerações tomadas para a análise (Teehan & Kandlikar, 2012).

## 6 Referências bibliográficas

- André, H., Ljunggren Söderman, M., & Nordelöf, A. (2019). Resource and environmental impacts of using second-hand laptop computers: A case study of commercial reuse. *Waste Management*, 88, 268-279. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.03.050>
- APA. (2023). *Fluxos específicos de resíduos | Agência Portuguesa do Ambiente*. <https://apambiente.pt/residuos/fluxos-especificos-de-residuos>
- Babbitt, C. W., Madaka, H., Althaf, S., Kasulaitis, B., & Ryen, E. G. (2020). Disassembly-based bill of materials data for consumer electronic products. *Scientific Data*, 7(1). Scopus. <https://doi.org/10.1038/s41597-020-0573-9>
- Bovea, M. D., Ibáñez-Forés, V., & Pérez-Belis, V. (2020). Repair vs. replacement: Selection of the best end-of-life scenario for small household electric and electronic equipment based on life cycle assessment. *Journal of Environmental Management*, 254, 109679. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109679>
- CarbonTrust. (2007). *Carbon Footprint Measurement Methodology*. <https://semspub.epa.gov/work/09/1142519.pdf>
- Hischier, R., & Böni, H. W. (2021). Combining environmental and economic factors to evaluate the reuse of electrical and electronic equipment - a Swiss case study. *Resources, Conservation and Recycling*, 166, 105307. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105307>
- Liu, J., Yang, D., Lu, B., & Zhang, J. (2016). Carbon footprint of laptops for export from China: Empirical results and policy implications. *Journal of Cleaner Production*, 113, 674-680. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.11.026>
- Ministério do Ambiente e Ação Climática, C.-C. de G. da R. I. do, & EEA Grants Portugal. (2023). *Asprela + Sustentável*. EEA Grants Portugal. <https://www.eeagrants.gov.pt/pt/programas/ambiente/projetos/projetos/asprela-plus-sustentavel/>

- Monteiro, M. (2021, março 24). A primeira comunidade energética do Porto vai nascer na Asprela. *PÚBLICO*. <https://www.publico.pt/2021/03/24/local/noticia/primeira-comunidade-energetica-porto-vai-nascer-asprela-1955796>
- O’Connell, S., & Stutz, M. (2010). Product carbon footprint (PCF) assessment of Dell laptop—Results and recommendations. *Proceedings of the 2010 IEEE International Symposium on Sustainable Systems and Technology*, 1-6.  
<https://doi.org/10.1109/ISSST.2010.5507731>
- Tecchio P., Ardente F., Marwede M., & Clemm C., Dimitrova G. Mathieux F. (2018). *JRC Technical Report—Analysis of material efficiency aspects of personal computers\_2018-02-06.pdf*.  
[https://computerregulationreview.eu/sites/computerregulationreview.eu/files/JRC%20Technical%20Report%20-%20Analysis%20of%20material%20efficiency%20aspects%20of%20personal%20computers\\_2018-02-06.pdf](https://computerregulationreview.eu/sites/computerregulationreview.eu/files/JRC%20Technical%20Report%20-%20Analysis%20of%20material%20efficiency%20aspects%20of%20personal%20computers_2018-02-06.pdf)
- Teehan, P., & Kandlikar, M. (2012). Sources of Variation in Life Cycle Assessments of Desktop Computers. *Journal of Industrial Ecology*, 16(s1), S182-S194.  
<https://doi.org/10.1111/j.1530-9290.2011.00431.x>

## A Anexo A

Tabela 8: Classificação de EEE colocados no mercado nas seguintes categorias e respetivos resíduos. Fonte: DL-152-D/2017

Categoria legal	Resíduos
Categoria 1	Equipamentos de regulação da temperatura
Categoria 2	Ecrãs, monitores e equipamentos com ecrãs de superfície superior a 100 cm <sup>2</sup>
Categoria 3	Lâmpadas
Categoria 4	Equipamentos de grandes dimensões com qualquer dimensão externa superior a 50 cm
Categoria 5	Equipamentos de pequenas dimensões sem dimensões externas superiores a 50 cm
Categoria 6	Equipamentos informáticos e de telecomunicações de pequenas dimensões, com nenhuma dimensão externa superior a 50 cm

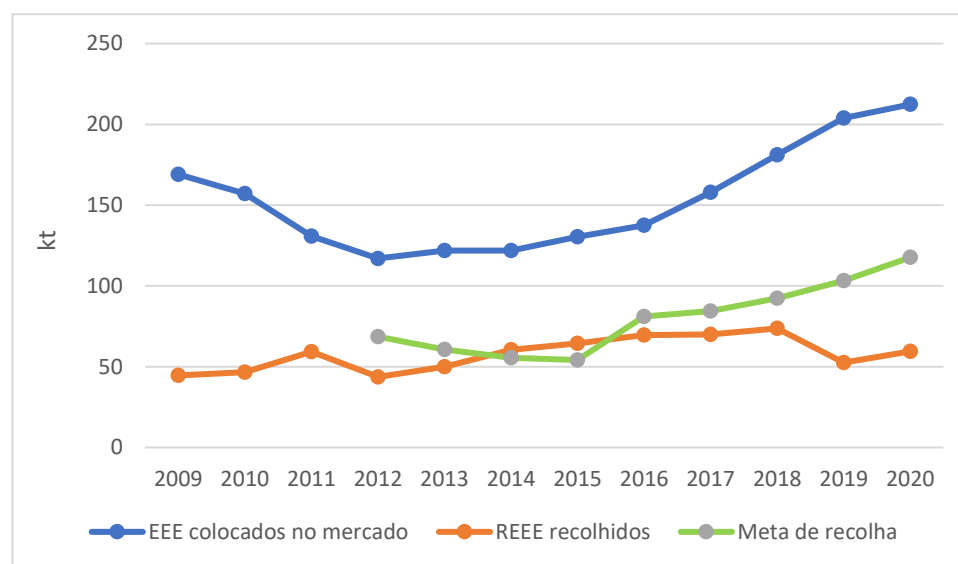


Figura 4: Evolução da colocação de equipamentos elétricos e eletrónicos (EEE) e recolha de resíduos de EEE, em quilotoneladas (kt). Fonte: Eurostat

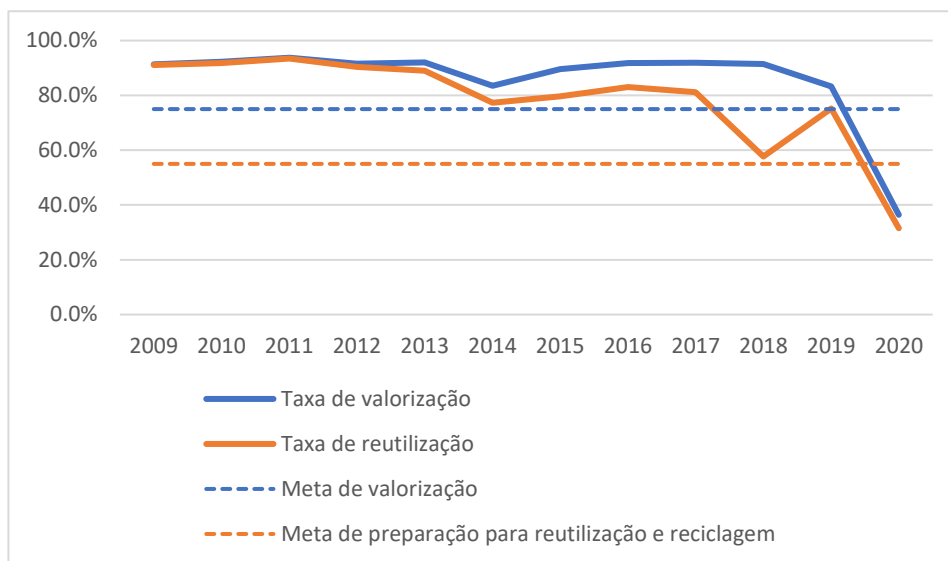


Figura 5: Evolução da taxa de valorização e reutilização de resíduos IT, face aos objetivos mínimos legislados. Fonte: Eurostat

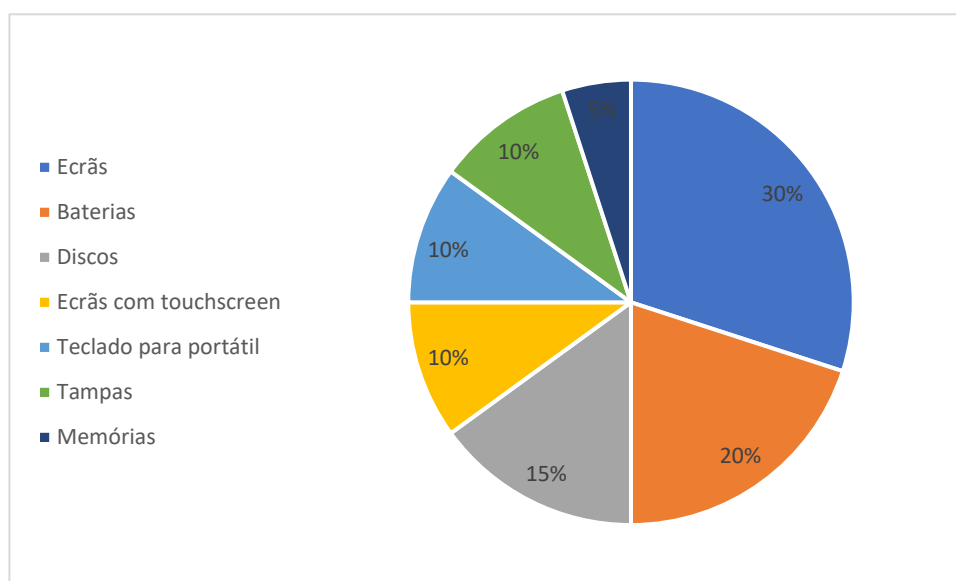


Figura 6: Distribuição percentual dos componentes intervencionadas em 500 reparações. Fonte: RecycleGekks

Tabela 9: Rácio de peças utilizadas em cada reparaçào. Fonte: RecycleGekks

<b>Rácio de peças/reparaçào</b>	<b>1,20</b>
---------------------------------	-------------

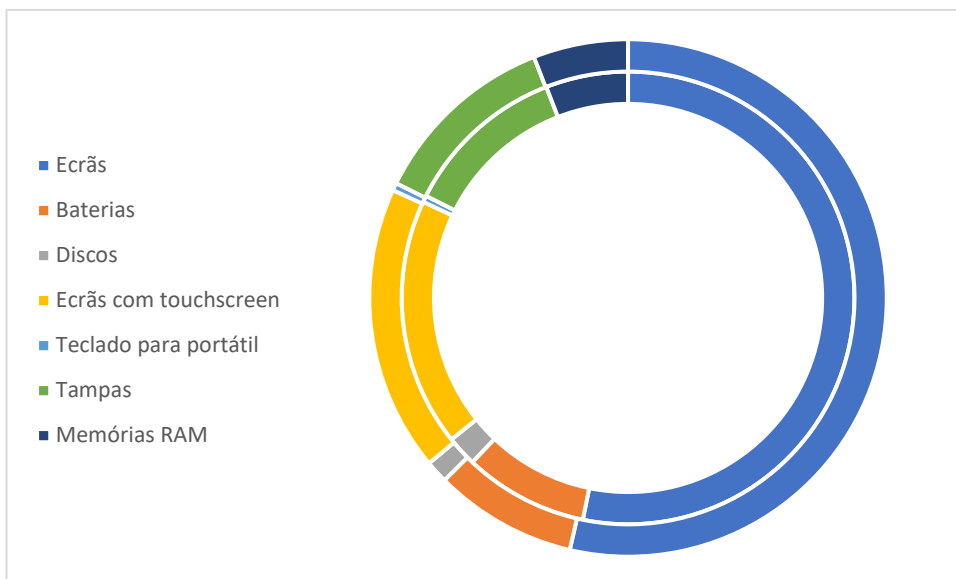


Figura 7: Emissões, em percentagem, associadas às reparações, por cenário, em quilogramas de CO<sub>2</sub>e.

Tabela 10: Estimativa de quantidade de peças necessárias, peças recuperadas (stock ReBOOT) e peças a adquirir, em função do objetivo de reparação (500 computadores).

Objetivo de reparação (computadores portáteis)	Total de peças necessárias	Stock Potencial ReBOOT	Peças a adquirir
500	600	278	322