



# APLICAÇÃO DE FERRAMENTAS PARA AVALIAR O IMPACTO AMBIENTAL DO RETROFITTING EM MÁQUINAS INDUSTRIAIS - CASO DE ESTUDO

LÚCIO TIAGO PATRÍCIO DA SILVA

julho de 2023

# APLICAÇÃO DE FERRAMENTAS PARA AVALIAR O IMPACTO AMBIENTAL DO RETROFITTING EM MÁQUINAS INDUSTRIAIS - CASO DE ESTUDO

Lúcio Tiago Patrício da Silva

Departamento de Engenharia Eletrotécnica

Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Área de Especialização em Sistemas e planeamento Industrial



Relatório elaborado para satisfação parcial dos requisitos da Unidade Curricular de  
Tese/Dissertação do Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Candidato: Lúcio Tiago Patrício Da Silva, Nº 1070862, 1070862@isep.ipp.pt  
Orientação científica: Susana Nicola, sca@isep.ipp.pt; Telmo Manuel Sampaio Pinto de  
Matos, tpm@isep.ipp.pt

Empresa:

Supervisão: Carla Pereira, carla.pereira@pt.controlar.com



Departamento de Engenharia Eletrotécnica  
Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores  
Área de Especialização em Sistemas e Planeamento Industrial

**2023**



*Aos meus pais, porque tudo lhes devo. . .*



## *Agradecimentos*

Com esta tese, completo 12 anos de estudo no ensino superior, sempre como trabalhador-estudante, o que por si só é extremamente cansativo mesmo em regime parcial. Com muito trabalho e esforço e com ajuda de alguns colegas, por isso quero agradecer a todos que me apoiam ao longo do caminho.

Aos meus familiares, que sempre estiveram presentes nos bastidores, que me apoiaram incondicionalmente na conquista dos meus objetivos, e a toda minha família que sempre acreditou em mim, deixando uma dedicatória especial ao meu pai, que apesar de não estar entre nós, sei que era um dos sonhos dele ter um filho engenheiro.

À Professora Susana Nicola e ao Professor Telmo Matos expresso a minha gratidão pela disposição que tiveram em aceitar o papel de orientadores, além de esclarecer todas as minhas dúvidas e apoiar-me ao longo do projeto.

Por fim, gostaria de agradecer à gerência da empresa CONTROLAR por proporcionarem a realização deste projeto nas instalações da empresa e usar informações confidenciais como base da minha dissertação. Um agradecimento aos colaboradores da empresa que de certa forma de ajudaram a obter as informações necessárias, especialmente á minha colega Carla Pereira, por ser mentora deste projeto.



## *Resumo*

A crescente preocupação com o tema da eficiência energética e da sustentabilidade, levou a empresa CONTROLAR a incluir no seu plano estratégico, um conjunto de objetivos para fazer face às exigências da política de neutralidade carbónica. Assim, a presente dissertação teve como objetivo desenvolver ferramentas para avaliar o impacto ambiental das máquinas bem como do *retrofitting* das mesmas.

Foi selecionada como base para o projeto, uma máquina que já completou um ciclo de vida, isto é, já foi reutilizada após o fim do ciclo de vida do produto ao qual estava a testar. A abordagem teórica centrou-se no ciclo de vida do produto e nas metodologias de cálculo do impacto das emissões CO<sub>2</sub> (dióxido de carbono), bem como, abordar temas como os protocolos de fabricantes de componentes e o desenvolvimento sustentável.

Após análise dos equipamentos que constituem a máquina, foi decidido aprofundar o tema, analisando também os componentes que constituem o quadro elétrico. Após consulta do fator de emissão das matérias-primas que compõem os equipamentos, foi possível calcular a pegada de carbono de cada componente do quadro elétrico fixando o valor de 129,962 Kg CO<sub>2</sub>eq (Equivalente da quantidade de dióxido de carbono) como pegada de carbono desta componente. A análise das fases do ciclo de vida da máquina permitiu obter valores de emissões GHG (*greenhouse gas*) de aproximadamente 209 kg CO<sub>2</sub>eq para o fabrico da máquina e 244 kg CO<sub>2</sub>eq para a fase de transporte.

Por fim, foi efetuada uma análise ao fim de vida dos equipamentos que compõem a máquina e o resultado espretable é que o material que é inserido no quadro elétrico tenha um tempo de vida superior ao equipamento instalado na máquina.

## *Palavras-Chave*

Economia Circular, Metodologia LCA, Pegada de carbono, Fator de emissão, Máquinas industriais.



## *Abstract*

The growing concern with the subject of energy efficiency and sustainability led the company CONTROLAR to include in the company's strategic plan a set of objectives to meet the requirements of the policy of carbon neutrality. Thus, this dissertation aimed to develop tools to assess the environmental impact of machines and their retrofitting.

As a basis for the project, a machine that has already completed a life cycle was selected, that is, it has already been reused after the end of the life cycle of the product it was testing. The theoretical approach focused on the product's life cycle and on methodologies for calculating the impact of CO<sub>2</sub> emissions, as well as addressing topics such as component manufacturers' protocols and sustainable development.

After analyzing the equipment that makes up the machine, it was decided to deepen the theme, with the material that was inserted in the electrical panel. After consulting the emission factor of the raw materials that make up the equipment, it was possible to calculate the carbon footprint of each component, as well as to set the value of 129.962 Kg CO<sub>2</sub>eq as the carbon footprint of the switchboard. The analysis of the phases of the machine's life cycle allowed obtaining GHG emission values of 209 kg CO<sub>2</sub>eq for the manufacture of the machine and 244 kg CO<sub>2</sub>eq for the transport phase.

Finally, an end-of-life analysis of the equipment that makes up the machine was carried out and the expected result is that the material that is inserted in the electrical panel has a longer life than the equipment installed in the machine.

## *Keywords*

Circular Economy, LCA Methodology, Carbon Footprint, Emission Factor, Industrial machine



# Índice

<b>AGRADECIMENTOS</b> .....	<b>I</b>
<b>RESUMO</b> .....	<b>III</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>V</b>
<b>ÍNDICE</b> .....	<b>VII</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	<b>IX</b>
<b>ÍNDICE DE TABELAS</b> .....	<b>XI</b>
<b>ACRÓNIMOS</b> .....	<b>XIII</b>
<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO .....	2
1.2. DEFINIÇÃO DO PROBLEMA.....	3
1.2.1. QUESTÕES DE INVESTIGAÇÃO .....	4
1.2.2. OBJETIVOS .....	4
1.3. PLANO DE TRABALHO .....	5
1.4. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO .....	6
<b>2. ESTADO DA ARTE</b> .....	<b>8</b>
2.1. ECONOMIA CIRCULAR E SUSTENTÁVEL PARA A INDÚSTRIA .....	8
2.1.1. ECONOMIA CIRCULAR E SUSTENTÁVEL .....	8
2.1.2. RETROFITTING DE PRODUTOS E MÁQUINAS .....	11
2.2. AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA (LIFE TIME ASSESSMENT).....	12
2.2.1. METODOLOGIA LCA.....	13
2.2.2. MÉTODOS DE ANÁLISE DE IMPACTO DO CICLO DE VIDA .....	17
2.2.3. SOFTWARES E BASES DE DADOS .....	22
2.3. PEGADA ECOLÓGICA DO PRODUTO.....	24
2.3.1. SOFTWARES E BASES DE DADOS .....	24
2.3.2. PRINCÍPIOS PARA O ESTUDO DA PEGADA ECOLÓGICA DE PRODUTOS.....	25
2.3.3. FASES DE UM ESTUDO DA PEGADA ECOLÓGICA DO PRODUTO .....	26
2.4. GHG PROTOCOL .....	29
2.4.1. ÂMBITOS GHG PROTOCOL.....	29
2.4.2. ETAPAS DE UM INVENTÁRIO PADRÃO DE GHG DE PRODUTO .....	30
2.4.3. MÉTODO IPCC .....	36
2.5. PEP ECOPASSPORT .....	37

2.6. 2030 CALCULATOR .....	38
2.7. DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL .....	40
2.7.1. COMPUTAÇÃO SUSTENTÁVEL.....	40
2.7.2. SOFTWARE SUSTENTÁVEL.....	40
2.7.3. PASSAPORTE DIGITAL DO PRODUTO .....	41
<b>3. CASO DE ESTUDO .....</b>	<b>43</b>
3.1. DEFINIÇÃO DO OBJETIVO E ÂMBITO.....	43
3.2. ANÁLISE DE INVENTARIO.....	47
3.2.1. CICLO DE VIDA DO PRODUTO .....	47
3.2.2. INVENTÁRIO DE COMPONENTES ADQUIRIDOS .....	49
3.2.3. INVENTÁRIO DE RECURSOS NECESSÁRIOS .....	50
3.3. AVALIAÇÃO DO IMPACTO DO CICLO DE VIDA .....	51
3.3.1. ANÁLISE DO FATOR DE EMISSÃO DAS MATÉRIAS-PRIMAS.....	52
3.3.2. CÁLCULO DA PEGADA DE CARBONO DOS COMPONENTES.....	53
3.3.3. INVENTÁRIO DE RECURSOS NECESSÁRIOS .....	55
3.3.4. CÁLCULO DA PEGADA DE CARBONO NA PRODUÇÃO DA MÁQUINA .....	56
3.3.5. ANÁLISE DO TEMPO DE VIDA DOS EQUIPAMENTOS.....	56
3.4. INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS LCA.....	59
3.4.1. INTERPRETAÇÃO DOS DADOS DO LCA .....	59
3.4.2. ANÁLISE DE CENÁRIOS DE REUTILIZAÇÃO .....	61
3.5. SÍNTESE DO CASO DE ESTUDO .....	63
<b>4. CONCLUSÕES .....</b>	<b>65</b>
4.1. TRABALHOS FUTUROS.....	66
<b>REFERÊNCIAS DOCUMENTAIS.....</b>	<b>67</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>77</b>

## Índice de Figuras

<b>Figura 1</b> <i>Gantt Chart</i> das tarefas do projeto.	5
<b>Figura 2</b> Cadeia de valor da economia circular [7].	10
<b>Figura 3</b> Metodologia 6R no ciclo de vida do produto [10].	11
<b>Figura 4</b> Processo Iterativo LCA [12].	12
<b>Figura 5</b> Metodologia LCA [15].	14
<b>Figura 6</b> Procedimento geral para o cálculo do eco indicador [23].	18
<b>Figura 7</b> Relação entre os parâmetros no ReCiPe 2016 [24].	19
<b>Figura 8</b> Esquema geral da estrutura do IMPACT 2002+ [27].	21
<b>Figura 9</b> Representação dos âmbitos do <i>GHG Protocol</i> [51].	29
<b>Figura 10</b> Exemplo de aplicação do cálculo da pegada de carbono [63].	39
<b>Figura 11</b> Representação da máquina e do Display a ser testado.	44
<b>Figura 12</b> Representação do quadro elétrico com a disposição dos equipamentos.	46
<b>Figura 13</b> Ciclo de vida detalhado.	47
<b>Figura 14</b> Ciclo de vida com recursos em análise.	50
<b>Figura 15</b> Contribuição para a pegada de carbono por família de componentes.	59
<b>Figura 16</b> Contribuição para a pegada de carbono por componente.	60
<b>Figura 17</b> Potencial de aquecimento global por fase do produto.	61
<b>Figura 18</b> Cenários de reutilização da máquina com base nos componentes do quadro elétrico, considerando 3 reutilizações.	62



## *Índice de Tabelas*

Tabela 1	Família de componentes	49
Tabela 2	Horas de trabalho por fase de ciclo de vida	50
Tabela 3	Outros recursos relevantes do ciclo de vida.	51
Tabela 4	Fator de emissão por tipo de matéria-prima.	53
Tabela 5	Tabela com a pegada de carbono da família dos bornes.	54
Tabela 6	Valores da pegada de carbono por família de componentes.	55
Tabela 7	Emissões GHG na fase de produção.	55
Tabela 8	Emissões GHG na fase de transporte	56
Tabela 9	Características relativas ao uso da máquina.	57
Tabela 10	Tempo de vida dos equipamentos do quadro elétrico.	57
Tabela 11	Tempo de vida de equipamentos da máquina.	58
Tabela 12	GWP por variável atmosférica	77
Tabela 13	Outras normas e regulamentos	77
Tabela 14	Tipos de conversão e fatores de conversão	78
Tabela 15	Lista de material analisado (Parte 1)	79
Tabela 16	Lista de material analisado (Parte 2)	80
Tabela 17	Fator de emissão de matérias-primas	81



## Acrónimos

- 6R – Recuperar, Reciclar, Redesenhar, Reduzir, Remanufaturar e Reutilizar
- CML-IA – *Institute of Environmental – Data Base*
- CO<sub>2</sub> – Dióxido de carbono
- CO<sub>2</sub>eq – Equivalente da quantidade de dióxido de carbono
- DALY – *Disability Adjusted Life Years*
- DEE – Departamento Engenharia Eletrotécnica
- DPP – Passaporte Digital do Produto
- EDP – Declaração Ambiental do Produto
- EoL – *End of Line*
- FE – Fator de emissão
- GHG – Gases do Efeito Estufa
- GWP – Aquecimento Global Potencial
- ILCD – *International Reference Life Cycle Data System*
- IPCC – Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas
- ISEP – Instituto Superior de Engenharia do Porto
- ISO – Organização internacional de Normalização
- KOM – *Kick-off Meeting*
- KPI – *Key Performance Indicator*

- LCA – *Life Cycle Assessment*
- LCC – *Life Cycle Costing*
- LCI – Inventário do Ciclo de Vida
- LCIA – Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida
- MEEC – Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e Computadores
- MJ – *Mega Joule*
- PDF – *Potentially Disappered Fraction*
- PEF – *Product Ecological Footprint*
- PEFCR – *Product Environmental Footprint Category Rules*
- PEP – *Product Environmental Profile*
- TCO – *Total Cost of Ownership*
- TIC – Tecnologias de Informação e Comunicação
- TEDI – Tese / Dissertação
- UNFCCC – Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima
- WBCSD – *World Business Council for Sustainable Development*

# 1. INTRODUÇÃO

O primeiro capítulo do documento contextualiza as questões associadas ao projeto desenvolvido na empresa CONTROLAR. Além disso, as soluções propostas são explicadas de forma concisa e compreensível, tendo em conta as questões de investigação colocadas e os objetivos a alcançar com as mesmas, através da metodologia de investigação admitido. Por fim, são apresentados o cronograma do plano de tarefas e a estrutura geral do documento.

Este trabalho descreve um projeto desenvolvido no âmbito da tese/dissertação (TEDI) do 2º ano do Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores (MEEC) do Departamento de Engenharia Eletrotécnica (DEE) do Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP). Este projeto foi desenvolvido em conjunto com a equipa do departamento de Investigação, Desenvolvimento e Inovação da empresa CONTROLAR.

## 1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

A CONTROLAR - Eletrónica Industrial e Sistemas é uma empresa que atua no ramo de automação industrial, oferecendo soluções personalizadas para diversos setores, em particular para a indústria automóvel. Entre os serviços oferecidos pela empresa, estão o desenvolvimento e fabricação de sistemas eletrónicos para o controlo e monitorização de processos industriais, como sistemas de automação de máquinas, sistemas de controlo de qualidade, sistemas de aquisição de dados, sistemas de controlo de temperatura, entre outros.

A preocupação ambiental que surgiu nos últimos anos e a necessidade de se produzir produtos cada vez mais sustentáveis em toda a cadeia de valor, levou a que a CONTROLAR definisse uma estratégia corporativa e um compromisso de reduzir a pegada de carbono de forma gradual, até atingir a neutralidade carbónica em 2040 [1]. Para cumprir este objetivo, poderá ser necessário repensar o modelo de negócio, tendo em conta a economia circular, de forma a reduzir o seu impacto ambiental. A análise do ciclo de vida do produto passa, portanto, a ter um papel importante por ser uma ferramenta essencial para o desenvolvimento de estratégias mais sustentáveis na produção e consumo de bens e serviços.

A aplicação de metodologias e ferramentas como a metodologia LCC (*life cycle costing*), LCA (*Life Cycle Assessment*) e TCO (*Total Cost of Ownership*) permitem calcular custos monetários relevantes e avaliar os impactos ambientais dos recursos utilizados ao longo do ciclo de vida do produto.

O trabalho a ser apresentado baseia-se nas metodologias LCC e LCA indicadas anteriormente, de forma a criar um modelo que avalie o impacto ambiental e económico das máquinas desenvolvidas pela CONTROLAR. De facto, dada a evolução do setor automóvel, este tipo de máquinas tem tendência a ter um ciclo de vida curto, uma vez que são fabricadas à medida do produto do cliente e das necessidades de teste do mesmo. Assim sendo, com a evolução ou surgimento de novos produtos do automóvel, as soluções de teste desenvolvidas à medida tornam-se rapidamente obsoletas, pelo que é necessário construir uma máquina nova, ou fazer um *retrofitting* na anterior. Esta última tem sido uma

abordagem muito adotada pela CONTROLAR junto dos seus clientes, mas que até hoje ainda não tinha sido quantificada em termos económicos e ambientais. Para além de ser importante ter um indicador que evidencie a redução do desperdício pela reutilização de uma grande parte dos equipamentos, seria de todo relevante ter uma forma de avaliar e comparar diferentes possibilidades da utilização da máquina ao longo do seu tempo de vida, ainda antes da produção da mesma. Tal poderá apoiar a decisão do tipo de materiais e equipamentos a utilizar, para a produção da mesma.

Posto isto, com o presente trabalho pretende-se elaborar um caso de estudo para avaliar o impacto ambiental do *retrofitting* já efetuado numa máquina desenvolvida pela CONTROLAR, tendo por base as metodologias acima referidas. Além disso, com este estudo, pretende-se o desenvolvimento de um modelo que possa ser usado em futuros projetos da CONTROLAR, e que permita avaliar diferentes cenários de utilização e até suportar o desenvolvimento de novos modelos de negócio, com o intuito de apoiar o objetivo de alcançar a neutralidade carbónica em 2040.

## 1.2 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

Este projeto apresenta o seguinte problema: a empresa não tem controlo das emissões CO<sub>2</sub> geradas pelos equipamentos bem como o fim de vida útil dos componentes. O conhecimento dos colaboradores em relação á pegada de carbono é remota, uma vez que são raras as empresas que dispõem essas informações e as comunicam aos clientes.

O plano estratégico da empresa aborda a economia circular, bem como a cadeia de valor gerada pela aplicação de métodos de avaliação do ciclo de vida de produtos. Em virtude do desafio lançado á empresa CONTROLAR, surgiu a necessidade de analisar ferramentas de avaliação do impacto ambiental, de forma a ir ao encontro às melhorias de eficiência energética e sustentabilidade, nomeadamente na redução das emissões de CO<sub>2</sub>. A questão da pegada de carbono das máquinas fabricadas na empresa e os componentes a utilizar, é analisada neste projeto.

### 1.2.1 Questões de Investigação

A presente dissertação pretende dar resposta aos problemas enunciados, através das seguintes questões de investigação:

1. Quais os métodos que são utilizados para a avaliação do ciclo de vida de produtos e equipamentos, de modo a analisar as fases do ciclo de vida?
2. Quais os softwares utilizados para a determinação dos impactos económicos e ambientais, bem como as unidades de medida que lhes são associadas?
3. Quais as metodologias e protocolos que abordam os impactos ambientais, nomeadamente a pegada de carbono?
4. Como se calcula o fator de emissões de um componente com base na matéria-prima que o constitui?
5. Como pode ser gerido o processo de fabrico das máquinas com base na possível reutilização das máquinas?
6. Como resposta a estas questões de investigações, foram delineados os seguintes objetivos descritos na secção 1.2.2.

### 1.2.2 Objetivos

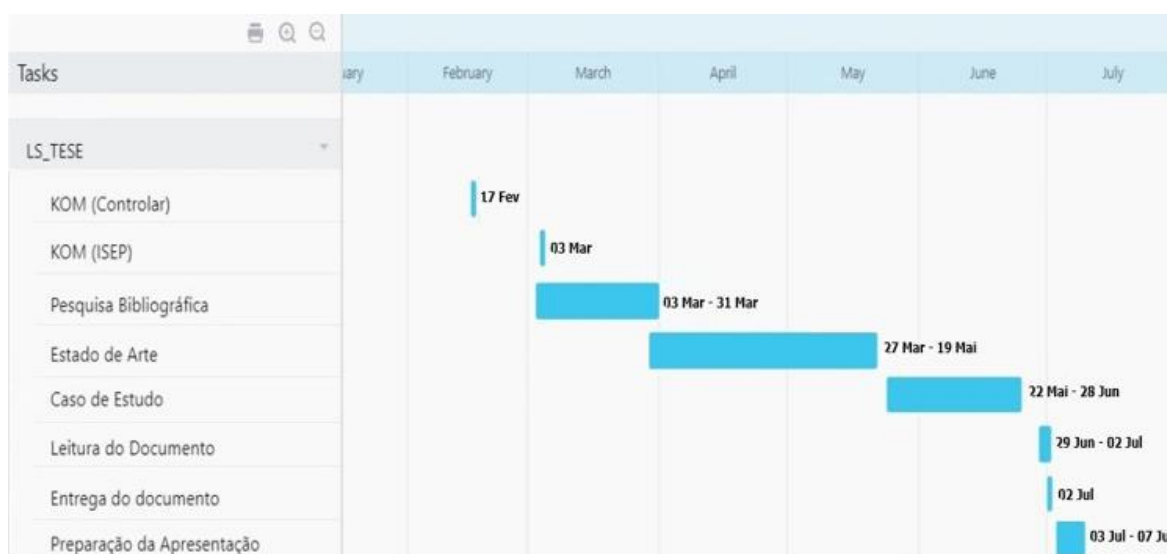
Os objetivos associados a esta dissertação são listados de seguida:

- Permitir uma visão completa dos impactos para cada fase do ciclo de vida
- Determinação do impacto ambiental ao longo do ciclo de vida de um produto, segundo a perspetiva do fabricante.
- Identificar os princípios associados às metodologias de calculo das pegadas de carbono.
- Compreender o conceito da pegada de carbono.
- Reconhecer e aplicar algumas ferramentas de cálculo da pegada de carbono.

- Apoiar a decisão sobre estratégias de reutilização de Produtos.

### 1.3 PLANO DE TRABALHO

O *Gantt chart* apresentado na Figura 1 resume, de forma ilustrativa, a calendarização das tarefas concretizadas.



**Figura 1** *Gantt Chart* das tarefas do projeto.

Este projeto começou com uma KOM (*Kick-off Meeting*), na empresa CONTROLAR, com o objetivo de apresentar os projetos que a equipa de IDI tinha em mente. Escolhido o projeto, realizou-se uma KOM com os orientadores para o acompanhamento do projeto. Apesar de não estarem representadas no diagrama, eram feitas reuniões quinzenais com os orientadores e mentora do projeto, a fim de efetuar o seu acompanhamento e evolução.

A pesquisa bibliográfica ocorreu durante o mês de março e concentrou-se sobre os temas em causa, nomeadamente sobre a metodologia LCA e sobre os métodos utilizados para a determinação da pegada de carbono. O estado de arte, que corresponde ao mapeamento da informação retirada da pesquisa bibliográfica e é tarefa mais longa pelo facto de este trabalho abordar diferentes conceitos e métodos.

O caso de estudo corresponde ao tempo necessário para abordar um caso prático, neste caso, o cálculo da pegada de carbono de componentes de uma máquina industrial.

Por fim, as últimas tarefas abordam a leitura do documento e entrega do documento, bem como a preparação da apresentação da dissertação.

## 1.4 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

O presente documento contém 4 capítulos: Introdução, Estado da Arte, Caso de Estudo e a Conclusão.

No Capítulo 1 é apresentada a contextualização da dissertação, os objetivos inerentes à mesma e a calendarização das tarefas que permitiram atingir os objetivos definidos.

No Capítulo 2, é descrito o estado da arte, que aborda o contexto teórico desta tese. Começa com a abordagem à economia circular e a metodologia de avaliação do ciclo de vida dos produtos. São ainda analisados outros métodos e abordagens possíveis para a determinação da pegada de carbono.

O capítulo 3, incide sobre o caso de estudo da determinação das emissões CO<sub>2</sub> geradas por equipamentos colocados no quadro elétrico de uma máquina fabricada na CONTROLAR, bem como da possibilidade de reutilizar a máquina através do *retrofitting*.

O capítulo 4, está focado nos aspetos relevantes a reter após a leitura do documento. Neste capítulo é realizada uma reflexão sobre o projeto desenvolvido e o impacto do mesmo, no processo de fabrico de máquinas. Adicionalmente, são realçadas as possíveis melhorias futuras que podem ser implementadas.



# 2. ESTADO DA ARTE

Para auxílio na compreensão do presente documento, este capítulo tem como finalidade apresentar as pesquisas existentes sobre o tópico em estudo assim como fornecer uma visão geral do campo de pesquisa, identificando as principais lacunas e elaborando os principais conceitos inerentes a esta dissertação.

## 2.1. ECONOMIA CIRCULAR E SUSTENTÁVEL PARA A INDÚSTRIA

### 2.1.1 Economia Circular e Sustentável

A economia circular visa redefinir o crescimento, focando em benefícios positivos para toda a sociedade [2]. A economia circular é um modelo económico que procura minimizar o desperdício de recursos, maximizando a reutilização, recuperação e reciclagem de materiais [3]. Tal implica alterações graduais na atividade económica do consumo de recursos finitos e que de uma forma sustentada, sejam substituídos no sistema elementos que lhe são prejudiciais.

Sustentado por uma transição para fontes de energia renováveis, o modelo circular assenta na economia, capital natural e capital social. Este baseia-se em três princípios [4]:

- Reduzir a quantidade de recursos utilizados na produção;
- Manter produtos e materiais em uso pelo maior tempo possível;
- Regenerar sistemas naturais acelerando a transição por meio de modelos de negócios circulares.

A adoção generalizada de modelos de negócios circulares pode acelerar a transição para uma economia circular, já que estes levam a uma redução do consumo de recursos e a geração de resíduos [5]. Os formuladores de políticas e os reguladores têm um papel a

desempenhar para facilitar a adoção de modelos de negócios circulares. Por sua vez, empresas e indústrias que adotam modelos de negócios circulares podem apoiar a transição, alcançando ganhos de eficiência por meio de uma maior produtividade económica e de recursos, reduções nas emissões de CO<sub>2</sub> e novas oportunidades de emprego e prosperidade [6]. Cinco tipos de modelos de negócios circulares são descritos abaixo, tais como alguns exemplos associados:

### **Extensão da vida útil do produto**

Reparar e manter - Fornecer serviços de reparação e manutenção para prolongar a vida útil dos produtos existentes no mercado.

*Upgrade* - Melhorar o desempenho do produto atualizando os componentes existentes.

Revenda - Revenda de produtos que já atingiram sua vida útil para mercados de segunda e terceira mão.

Retrabalho - Processo de devolução de produtos usados ou descartados a uma condição de novo, ou melhoria da funcionalidade original dos produtos e revendê-los com preço mais baixo.

### **Reciclagem de lixo**

Reciclar - Recolher e recuperar materiais de fim de vida dos produtos e reutilizá-los em produção própria.

Devolver - Devolver as peças e materiais desperdiçados à fonte (por exemplo, resíduos e subprodutos da própria produção).

### **Produto como serviço**

Produto como serviço - Oferece aos clientes o uso de um produto contra uma taxa de assinatura ou cobrança baseada no uso, em vez de adquiri-lo.

Desempenho como um serviço - Oferece aos clientes a compra de um pré-serviço e nível de qualidade definidos e comprometem-se a garantir um resultado específico.

## Compartilha de modelos de negócios

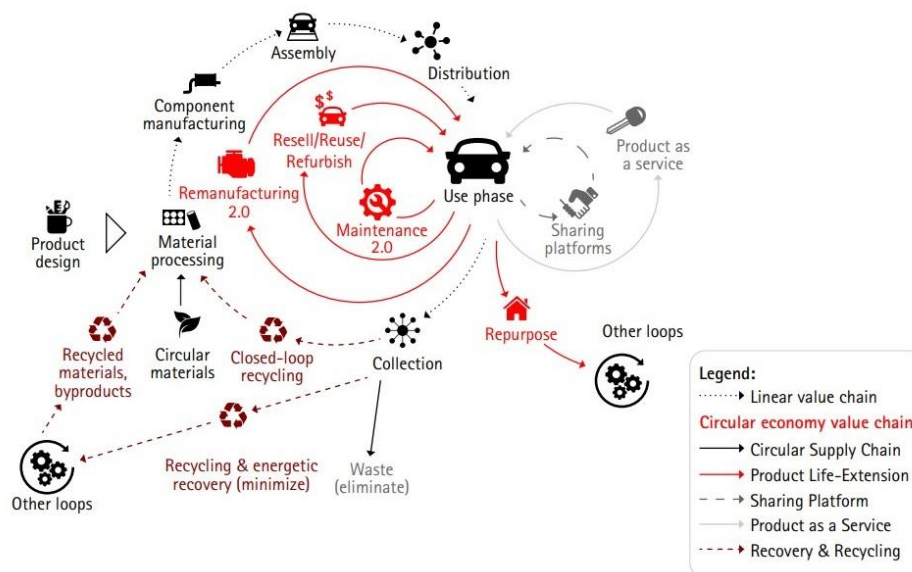
Partilha - Desenvolver soluções que permitam maior utilização da sua capacidade. Permite taxas de uso aumentadas por meio de modelos colaborativos para uso, acesso ou propriedade.

## Modelos de negócios circulares de base biológica

Construir para durar - Projetar produtos que sejam duráveis e fáceis de reparar, como é o caso de produtos modulares.

Suprimentos circulares – Uso de materiais recicláveis na produção, por exemplo, materiais de base renovável ou biológica, produtos químicos e energia para aumentar a taxa de recuperação.

A Figura 2 representa as possíveis cadeias de valor presentes na economia circular em torno do uso de um automóvel, desde a fase de *Design* até à fase de fim de vida. Podem ser geradas várias cadeias de valor, tendo em conta o uso que lhe é dado e como será feito o seu desmantelamento.



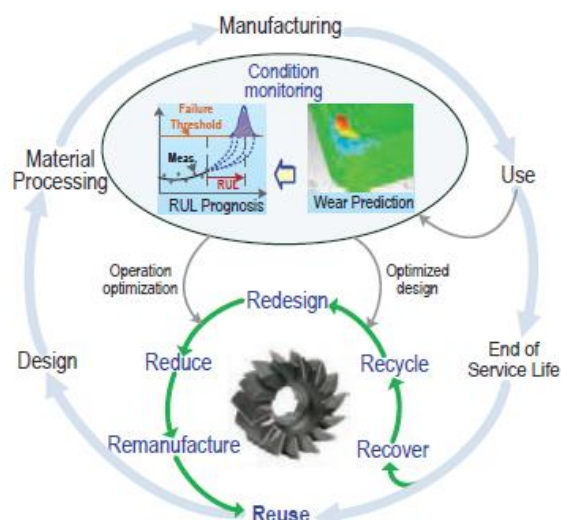
**Figura 2** Cadeia de valor da economia circular [7].

## 2.1.2 Retrofitting de Produtos e Máquinas

O *retrofitting/refurbishing* de produtos existentes tem sido considerada uma abordagem bem-sucedida para aumentar a produtividade e fortalecer a economia circular, bem como reduzir a pegada ambiental. Aumentar a consciencialização sobre o impacto ambiental causado pela produção e consumo de materiais e maior rigor nos regulamentos motivam esse desenvolvimento sustentável [8].

Na indústria de manufatura espera-se que haja uma transição para novos modos de operação que aumente os benefícios económicos por maior eficiência no recurso, como é o caso dos materiais e energia utilizados, e ao mesmo tempo reduzir o impacto ambiental, como é o caso das emissões tóxicas e a geração de resíduos, de forma a alcançar uma vida do produto sustentável.

A característica chave para diferenciar os produtos sustentáveis de suas contrapartes tradicionais são os seus múltiplos ciclos de vida. Quando um produto sustentável se aproxima do fim do seu primeiro ciclo de vida útil, ele entra numa fase de pós-vida, que visa maximizar o uso de material através dos “6R”: recuperar, reciclar, redesenhar, reduzir, remanufaturar e reutilizar [9]. A Figura 3 faz referência a como os 6R, podem ser incorporados no ciclo de vida dos produtos e como é otimizado o processo mediante o processo 6R selecionado.



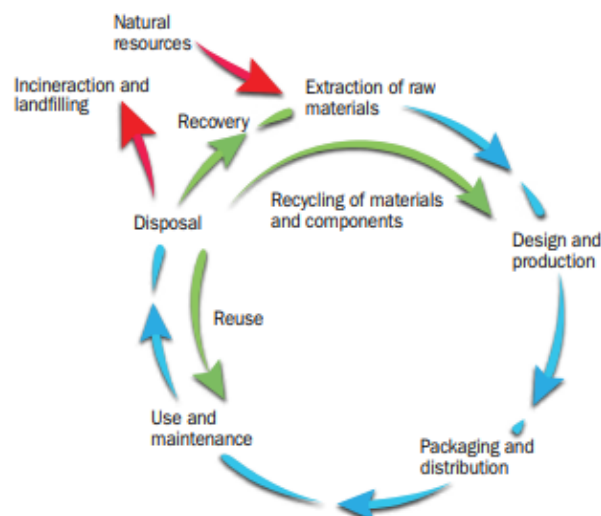
**Figura 3** Metodologia 6R no ciclo de vida do produto [10].

No processo pós-vida, recuperar refere-se ao reparo ou retrofit de um produto para estender a sua vida útil. Tal significa redesenhar os materiais reciclados para uma configuração atualizada ou adicionar funcionalidades ao produto original para atender às novas necessidades dos clientes e aos seus requisitos, seguido dos retrabalhos que restauram o produto usado em condições como novas, para reutilização no novo ciclo de vida. Neste processo, os componentes dos resíduos resultantes da recuperação e procedimentos de remanufatura entram numa operação de reciclagem que extrai os materiais de alto valor para reduzir a quantidade de novos materiais a serem usados na remanufatura subsequente.

## 2.2. AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA (LIFE CYCLE ASSESSMENT)

Uma forma de avaliar os efeitos da economia circular é fazer uma avaliação do ciclo de vida (LCA) do produto ou serviço. A metodologia LCA é uma ferramenta robusta com base científica que pode medir e avaliar produtos e modelos de negócios provenientes de economia circular [11].

A metodologia LCA apresentada na Figura 4 avalia esses impactos ao longo da vida útil de um produto, desde a extração da matéria-prima até a processamento de materiais, fabricação, distribuição, uso, reparo e manutenção, e eventual descarte ou reciclagem.



**Figura 4** Processo Iterativo LCA [12].

O procedimento LCA identifica e quantifica a energia e os materiais utilizados, bem como os resíduos e as emissões libertados para o ambiente, avaliando o impacto destes inputs e outputs, os quais podem ser definidos para um único processo ou para o ciclo de vida completo, desde a aquisição de matérias-primas até à disposição final do produto [13].

### 2.2.1 Metodologia LCA

A abordagem LCA foi definida pela primeira vez pela Organização Internacional de Normalização (ISO). A metodologia LCA, baseia-se nas normas internacionais ISO14040 (2006) e ISO14044 (2006) [14].

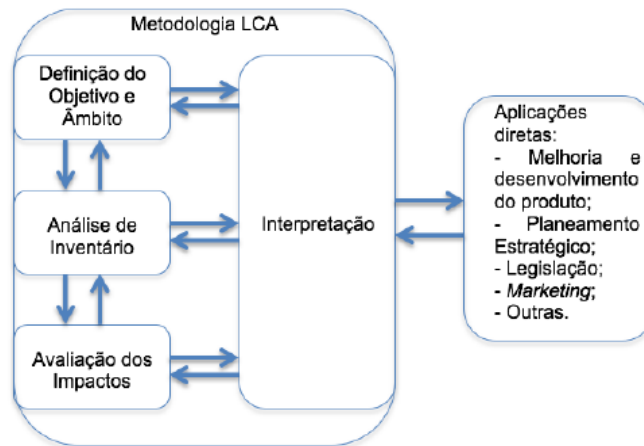
A norma ISO 14040:2006 descreve os princípios e a estrutura para a avaliação LCA, que inclui: definição do objetivo e o âmbito da LCA, a fase de análise do inventário do ciclo de vida (LCI), a fase de avaliação do impacto do ciclo de vida (LCIA), a fase de interpretação do ciclo.

A norma ISO 14044:2006 especifica requisitos e fornece diretrizes para a avaliação do ciclo de vida (LCA). Abrange estudos de LCA e de LCI.

Como se pode observar na Figura 5, segundo as normas em análise, um estudo LCA envolve, então, quatro fases, as quais serão descritas de seguida:

- a) Definição do Objetivo e Âmbito;
- b) Análise de Inventário (*LCI -- Life Cycle Inventory*);
- c) Avaliação de Impactos (*LCIA -- Life Cycle Impact Assessment*);
- d) Interpretação.

A aplicação desta metodologia, tem como benefícios a melhoria e desenvolvimento do produto, melhoria do planeamento estratégico, correta aplicação das normas e legislação referentes aos ciclos de vida dos produtos, bem como auxilia na aplicação de estratégias de marketing.



**Figura 5** Metodologia LCA [15].

### a) Definição do Objetivo e Âmbito

A primeira fase especifica os objetivos e a quem se pretende comunicar os resultados do estudo. Esta fase inclui a definição da fronteira do sistema, da unidade funcional do sistema, categorias de impacto, alocações e dos requisitos relativamente à qualidade dos dados. Serão abordados de seguida alguns destes pontos:

- A definição da unidade funcional e da fronteira do sistema são passos fundamentais para qualquer análise comparativa entre duas alternativas. Trata-se de um conjunto de critérios que especificam quais os processos unitários que fazem parte do sistema. Para um dado caso deve ser identificado um elemento (ou corrente) representativo do processo que permaneça constante para ambas as alternativas, sendo definido como unidade funcional [16].
- A fronteira do sistema delimita o processo em análise, indicando os inputs e outputs que devem ser considerados. Dependendo do tipo de análise pretendida, a fronteira pode ser classificada entre o sistema tecnológico e o ambiente, entre os processos significativos e não significativos, ou entre o sistema tecnológico em estudo e outros sistemas tecnológicos. Pode-se então considerar uma abordagem *cradle-to-grave* (se considera o ciclo de vida completo), *gate-to-gate* (se considera apenas um processo), *cradle-to-gate* (se apenas considera as fases de aquisição de matérias-primas e de produção), e *gate-to-grave* (se apenas considera as fases de utilização e de fim de vida) [17].

- O fluxo de referência consiste na quantidade de produto necessária para desempenhar a função/funções considerada(s), servindo de base para a determinação das entradas e saídas do sistema.

## **b) Análise de Inventário**

Esta fase é dedicada à recolha de informações e procedimentos para calcular e quantificar os dados de entradas e saídas de um processo (consumo de eletricidade, consumo de água, materiais usados, bem como as emissões associadas). Esses dados são então utilizados para avaliar o desempenho ambiental do produto ou processo e identificar as áreas em que podem ser feitas melhorias.

O inventário da Análise do Ciclo de Vida (LCI) pode ser realizado por meio de diversas ferramentas e métodos, como entrevistas com especialistas, análise de documentos técnicos e dados de relatórios de empresas. É importante que os dados recolhidos sejam representativos e precisos, para que a avaliação final seja confiável e precisa.

As principais etapas para obtenção de uma LCI são as seguintes [18]:

1. Preparação para a recolha dos dados;
2. Recolha e tratamento dos dados;
3. Validação dos dados;
4. Relacionar dados com processos unitários;
5. Relacionar dados com a unidade funcional;
6. Redefinição das fronteiras do sistema.

## **c) Avaliação de Impactos (LCIA)**

A fase de avaliação do impacto no ciclo de vida destina-se a avaliar a significância dos impactos ambientais potenciais, utilizando os resultados da análise do inventário do ciclo de vida, ou seja, analisa os efeitos ambientais e humanos decorrentes dos aspetos ambientais associados a cada uma das fases do ciclo de vida [19].

De acordo com a norma ISO 14040, a fase de avaliação de impactos deverá incluir os seguintes passos:

1. Seleção e Definição das Categorias de Impacto - identificação das categorias mais relevantes relacionadas com o impacto ambiental (por exemplo, aquecimento global, acidificação, toxicidade terrestre).
2. Classificação - atribuir resultados LCI às categorias de impacto (por exemplo, classificação de dióxido de carbono emissões ao aquecimento global).
3. Caracterização - modelagem dos impactos de LCI dentro das categorias de impacto usando fatores de conversão (por exemplo, modelar o impacto potencial do dióxido de carbono e do metano no aquecimento global).
4. Normalização - expressar potenciais impactos de modo que podem ser comparados (por exemplo, comparar o impacto do aquecimento global de dióxido de carbono e de metano para as duas opções).
5. Agrupamento – Classificação dos indicadores (por exemplo, classificação dos indicadores por localização: local, regionais e globais).
6. Ponderação - realçar os potenciais impactos mais importantes.
7. Avaliação dos resultados do LCIA - obter uma melhor compreensão da confiabilidade dos resultados do LCIA.

#### **d) Interpretação**

A fase de interpretação é um processo sistemático para identificar, qualificar, verificar, avaliar, estruturar e conferir confiança da informação contida nos resultados da análise de inventário, apresentando-os de forma a satisfazer o objetivo e o âmbito do estudo [20].

A fase de interpretação do ciclo de vida de um estudo LCA compreende três elementos [21]:

a) Identificação dos pontos significativos baseados nos resultados das fases de LCI ou LCIA do estudo LCA. Os pontos significativos podem ser: categorias dos dados de inventário, tais como, energia, emissões, resíduos, etc.

b) Avaliação pela verificação da plenitude, sensibilidade e consistência. O objetivo da verificação da plenitude é assegurar que toda a informação relevante e dados necessários para a interpretação estejam disponíveis e completos.

c) Conclusões, recomendações e relatório. O objetivo deste terceiro elemento é desenhar conclusões preliminares, e verificar que elas estão consistentes com os requisitos do objetivo e âmbito do estudo, incluindo, em particular, requisitos de qualidade dos dados, suposições e valores pré-definidos.

### 2.2.2 Métodos de análise de Impacto do Ciclo de Vida

Os métodos de Análise de Impacto do Ciclo de Vida (LCIA) são utilizados para avaliar o impacto ambiental de produtos, processos ou serviços ao longo de todo o seu ciclo de vida, desde a extração de matérias-primas até ao descarte final. Estes métodos são úteis para identificar áreas onde a intervenção pode ser feita para reduzir o impacto ambiental ao longo do ciclo de vida. A escolha do método depende do objetivo da análise, do tipo de produto ou processo em avaliação, tal como das preferências do utilizador. É importante selecionar o método mais apropriado para garantir que a avaliação do desempenho ambiental seja precisa e confiável.

#### a) **Método Eco-Indicador 99**

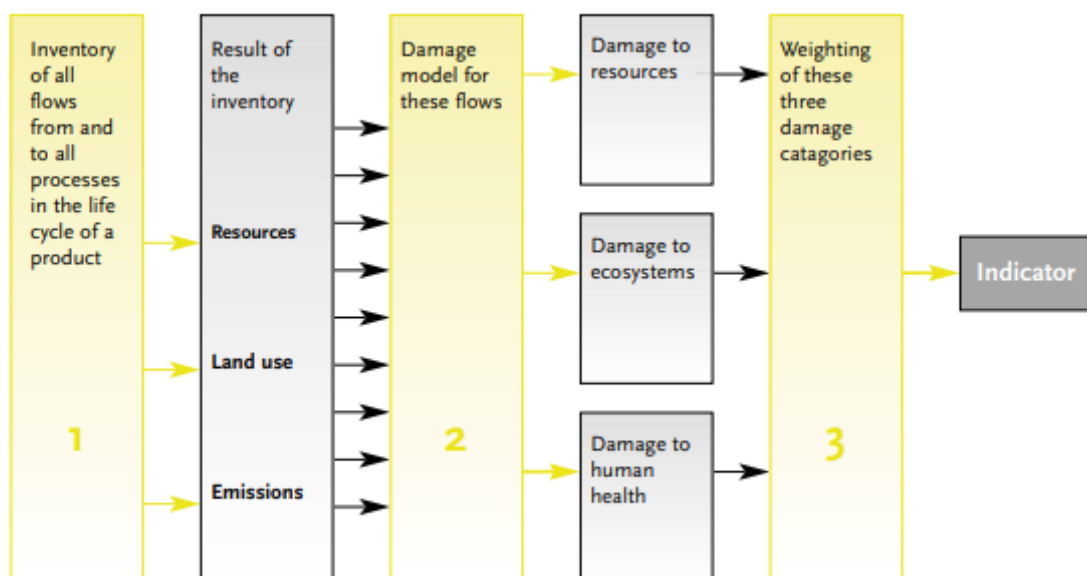
O método Eco-indicador 99 surge a partir de uma reestruturação do Eco-indicador 95, desenvolvido por *Goedkoop e Spriensma*, nos Países Baixos, e que consiste num exemplo de abordagem *endpoint* (focado no dano) [22].

No método Eco-indicador 99, a normalização e ponderação são executadas ao nível da “categoria de dano” (nível de ponto final na terminologia ISO). Existem três categorias de dano:

- Saúde Humana (*Human Health*) – unidade: “DALY – *Disability Adjusted Life Years*”, que inclui a ponderação de diferentes incapacidades causadas por doenças.
- Qualidade do ecossistema (*Ecosystem Quality*) – unidade: PDF - “*Potentially Disappered Fraction*”, relativa a diferentes espécies de plantas.
- Recursos – unidade: MJ (Mega Joule) de energia adicional, relativa à energia necessária para compensar uma futura diminuição do grau de pureza do minério.

Os resultados do indicador de categoria de impacto que são calculados na fase de caracterização são adicionados para formarem as categorias de dano.

A Figura 6 representa os passos a efetuar no procedimento de determinação do eco-indicador 99, desde a fase de inventário de fluxos do processo do ciclo de vida do produto, passando pelos modelos de impacto ambiental desses fluxos (recursos, uso e emissões), até á ponderação das categorias de danos (Recursos, ecossistema e vida humana).



**Figura 6** Procedimento geral para o cálculo do eco indicador [23].

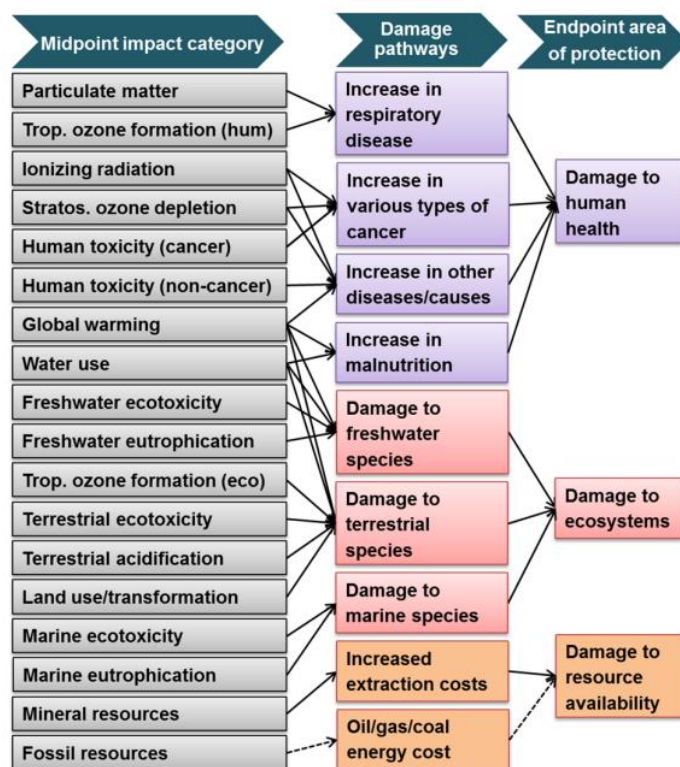
Os valores-padrão do eco-indicador podem ser considerados como figuras adimensionais, sendo usado o ponto eco-indicador (Pt). Nas listas de indicadores ECO, geralmente é usada a unidade miliponto (mPt).

## b) Método ReCiPe

Este é um método amplamente utilizado que foi desenvolvido na Europa. Ele é baseado numa abordagem de pontos de referência, que compara as emissões de um produto ou processo com as emissões de outros produtos ou processos com o mesmo impacto ambiental.

Este método ReCiPe 2016 sucede aos métodos Eco-indicador 99 e CML-IA (*Institute of Environmental – Data Base*), sendo este último método caracterizado por ser um banco de dados que contém fatores de caracterização para avaliação de impacto do ciclo de vida (LCIA) e é facilmente lido pelos programas de software de análise á metodologia LCA. O método ReCiPe foi desenvolvido com o propósito de integrar a abordagem problem-oriented (ou de análise das causas) do método CML-IA e a abordagem damage-oriented (ou de análise de danos) do método Eco-indicador 99.

Como se pode observa na Figura 7 o ReCiPe 2016 compreende dois conjuntos de categorias de impacto associados com conjuntos de fatores de caracterização, estes são categorias de *Midpoint* e de *Endpoint*. Inclui ainda os danos causados por essas categorias.



**Figura 7** Relação entre os parâmetros no ReCiPe 2016 [24].

Dezoito das categorias de impacto são abordadas no nível intermediário *midpoint*: Mudança climática (CC), destruição do ozono (OD), acidificação terrestre (AT), eutrofização de água doce (FE), eutrofização marinha (ME), toxicidade humana (HT), formação de oxidante fotoquímico (POF), formação de material particulado (PMF), ecotoxicidade terrestre (TET), ecotoxicidade de água doce (FET), ecotoxicidade marinha (MET), radiação ionizante (IR), ocupação de terras agrícolas (ALO), ocupação do solo urbano (ULO), transformação natural do solo (NLT), esgotamento de água (WD), esgotamento de recursos minerais (MRD), e esgotamento de combustível fóssil (FD). Estas propriedades estão caracterizadas no Anexo A [25].

No nível do *endpoint*, a maioria dessas categorias de impacto de ponto médio são posteriormente convertidas e agregadas nas seguintes três categorias: Danos à saúde humana (HH), danos à diversidade do ecossistema (ED), e danos à disponibilidade de recursos (RA), que são as mesmas abordadas pelo método *Eco-indicador 99* [26].

Cada método (ponto médio, ponto final) contém fatores de acordo com as três perspectivas culturais. Estas perspectivas representam um conjunto de escolhas sobre questões como o tempo de execução e expectativas de uma adequada gestão, ou o desenvolvimento futuro de tecnologias que podem evitar danos futuros. São elas:

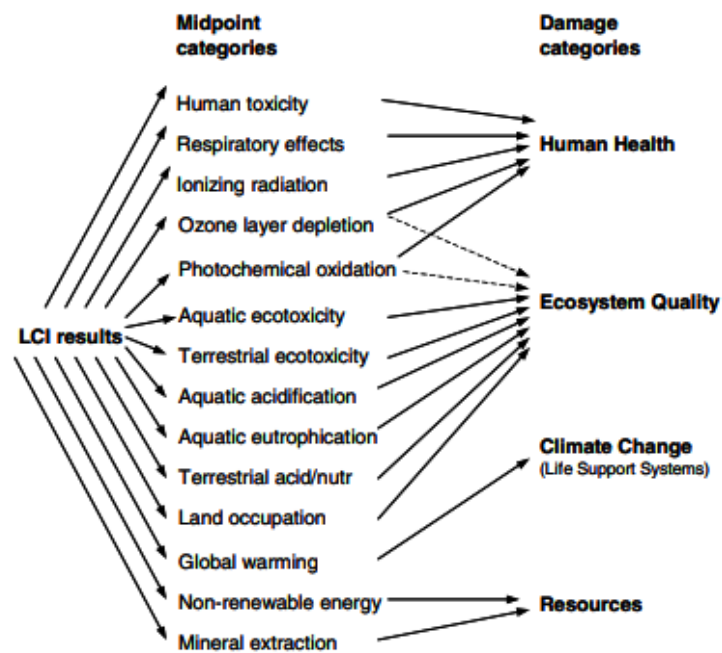
- Individualista: curto prazo, otimismo de que a tecnologia pode evitar muitos problemas no futuro.
- Hierarquista: modelo de consenso, como frequentemente encontrado em modelos científicos. Este é frequentemente considerado o modelo padrão.
- Igualitário: pensamento de longo prazo baseado no princípio da precaução.

### c) Método IMPACT 2002+

A metodologia IMPACT 2002+ (*ImPact Assessment of Chemical Toxics*) é um método suíço que propõe uma implementação viável da abordagem combinada *midpoint/endpoint*, através da conjugação de todos os resultados do LCI em 14 categorias intermédias: toxicidade humana, efeitos respiratórios, radiação ionizante, destruição da camada de ozônio, oxidação fotoquímica, ecotoxicidade aquática, ecotoxicidade terrestre,

acidificação/nutrição terrestre, acidificação aquática, eutrofização aquática, ocupação do solo, aquecimento global, energia não renovável, extração mineral) a quatro categorias de danos (saúde humana, qualidade do ecossistema, mudança climática, recursos).

A Figura 8 ilustra a arquitetura desta metodologia, onde cada seta simboliza que um caminho de impacto relevante é conhecido ou presumido que existe.



**Figura 8** Esquema geral da estrutura do IMPACT 2002+ [27].

Para o IMPACT 2002+ foram desenvolvidos novos conceitos e métodos, especialmente para a avaliação comparativa da toxicidade humana e da ecotoxicidade. Fatores de Danos Humanos são calculados para cancerígenos e não cancerígenos, empregando frações de ingestão, melhores estimativas de fatores de inclinação dose-resposta, bem como a gravidade [28].

Os fatores de caracterização para as categorias toxicidade humana, ecotoxicidade aquática e ecotoxicidade terrestre são fornecidos por esta metodologia, sendo que para outras categorias, estes fatores são adaptados de outros métodos como Eco-indicador 99, CML 2001 e IPCC. Quanto à fase de normalização, os seus fatores apresentam a unidade

Pessoa\*ano/unidade emissão (o número de pessoas afetadas durante um ano, por unidade de emissão, na Europa), enquanto os fatores de ponderação tomam o valor de 1 [29].

### 2.2.3 Softwares e bases de dados

As bases de dados de LCA pretendem auxiliar a etapa de levantamento de informação relativa à determinação de alguns processos de produção e serviços. Estas bases de dados são frequentemente atualizadas de forma a colmatar lacunas de informação. Por sua vez, existem programas de computador (softwares) que facilitam a realização da avaliação do ciclo de vida, utilizando a informação das bases de dados mencionadas [30].

#### a) SIMAPRO

Desenvolvido pela PRé Sustainability, o SimaPro é um software LCA amplamente utilizado, que oferece um conjunto abrangente de recursos para a realização de LCAs. O nome deste programa é um acrónimo de “*System for Integrated Environmental Assessment of Products*”, sendo um sistema para avaliação ambiental integrada de produtos.

Com o *SimaPro* é possível:

- Determinar KPIs para medir a sustentabilidade;
- Analisar desempenhos de sustentabilidade com avaliação do ciclo de vida (LCA);
- Comunicação clara por meio de relatórios de sustentabilidade baseados em factos concretos;
- Gerar Declarações Ambientais de Produto (EPD) em conformidade.

O *SimaPro* está disponível como uma versão para desktop com a opção de usar módulos baseados em nuvem. Construído com base em ciência robusta e pensamento de ciclo de vida, é ideal para designers de produtos, analistas e especialistas em sustentabilidade. Com bases de dados incluídas e uma metodologia consistente, pode-se ampliar facilmente os resultados em todos os diferentes estágios da avaliação do ciclo de vida de um produto. São oferecidos uma variedade de planos para atender a uma ampla gama de necessidades empresariais e educacionais [31].

**Última versão:** SimaPro 9.5

**Base de dados principal:** SimaPro database.

**Bases de dados adicionais:** Buwal 250; Dutch Input Output Database; Danish Food data; ecoinvent data v3.9.1; ESU ETH data; Franklin USA data; IDEMAT; Industry data 2.0; Agri-footprint 6.3. [32].

#### **b) GaBi**

Desenvolvido pela University of Stuttgart, LBP-GaBi e pela PE Internacional GmbH, este programa tem a função de criar variados balanços de LCA. Tem como principal característica ser um sistema modular, ou seja, integra planos, processos e fluxos, que lhe conferem funcionalidades modulares. Esta característica torna a estrutura do sistema clara e transparente, facilitando a sua utilização. Tem ainda a vantagem de apresentar o software e bases de dados de forma independente. Enquanto a base de dados grava toda a informação relacionada com o projecto, o software fornece ao utilizador a interface e possibilidade de construir e analisar bases de dados [33].

**Última versão:** GaBi 8.5 [34]

**Bases de dados:** ecoinvent v2.0 – integrated; ecoinvent v2.0 – plain; GaBi databases 2006 education database; GaBi databases 2006 extension databases; GaBi databases 2006 lean database.

#### **c) OpenLCA**

Desenvolvido desde 2006 pela GreenDelta, o OpenLCA é um software LCA de código aberto que oferece uma interface amigável e uma variedade de recursos para modelagem e análise de LCAs. Também possui uma grande comunidade de utilizadores que contribuem para o seu desenvolvimento e suporte [35].

Além disso, a natureza de código aberto do software torna-o muito adequado para uso com dados. O software, assim como quaisquer modelos criados, pode ser compartilhado livremente se a licença da base de dados permitir. O *openLCA* pode ser usado para diversas aplicações diferentes, como por exemplo [36]:

- LCA, LCC, Avaliação do Ciclo de Vida Social (S-LCA);
- Pegadas de carbono e água;
- EPD;
- A Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (EPA) *Design for the Environment label*;
- Política Integrada de Produtos (IPP);

**Última versão:** OpenLCA 1.11. [37]

**Bases de dados:** Agribalyse v3.0.1, Agri-footprint 5.0, bancos de dados ecoinvent v3.8 (todas as versões), ESU World Food (unidade e sistema), EuGeos' 15804\_A2-IA [38].

## 2.3 PEGADA ECOLÓGICA DO PRODUTO

A metodologia Product Environmental Footprint (PEF) foi desenvolvida pelo *Joint Research Centre* (JRC) da Comissão Europeia em cooperação com o *Directorate General for Environment* como uma abordagem padronizada para medir o impacto ambiental dos produtos. Ele visa fornecer de uma forma abrangente e comparável de avaliar o desempenho ambiental dos produtos, levando em consideração diferentes indicadores ambientais, como emissões de gases de efeito estufa, consumo de água e uso de recursos [39].

### 2.3.1 Metodologias

Este método segue as seguintes normas e metodologias:

- Normas ISO19, em particular ISO14044(2006), ISO/DIS14067(2012), ISO14025(2006), ISO14020(2000);
- Manual ILCD (International Reference Life Cycle Data System);
- Greenhouse Gas Protocol (WRI/ WBCSD);

- Princípios gerais para uma comunicação ambiental em produtos de mercado de massa BPX 30-323-0 (ADEME);
- Especificação para a avaliação das emissões de gases de efeito estufa do ciclo de vida de bens e serviços (PAS 2050, 2011).

É proposto um método para a quantificação dos impactos ambientais de fluxos de materiais/energia, bem como das emissões e resíduos associados a um produto ao longo do seu ciclo de vida. Propõe adicionalmente o desenvolvimento de PEFCRs (*Product Environmental Footprint Category Rules*), com o objetivo de fornecer uma orientação específica para o cálculo e a apresentação dos impactos ambientais de um determinado tipo (ou categoria) de produto [40].

### 2.3.2 Princípios para o estudo da pegada ecológica de produtos

Para produzir estudos PEF confiáveis, reproduzíveis e verificáveis, um conjunto básico de princípios analíticos deve ser respeitado. Esses princípios fornecem uma orientação abrangente na aplicação do método PEF. Eles devem ser considerados em relação a cada fase dos estudos do PEF, desde a definição do objetivo e do âmbito, passando pela recolha de dados, avaliação de impacto, relatórios e verificação dos resultados do estudo [41].

Os utilizadores deste método devem observar os seguintes princípios ao conduzir um estudo PEF:

1. Relevância - Todos os métodos utilizados e dados recolhidos para fins de quantificação do PEF devem ser tão relevantes para o estudo quanto possível.
2. Integridade - A quantificação do PEF deve incluir todos os fluxos de material/energia ambientalmente relevantes e outras intervenções ambientais, conforme necessário para a adesão ao limite do sistema definido, os requisitos de dados e os métodos de avaliação de impacto aplicados.
3. Consistência – A estrita conformidade com este método deve ser observada em todas as etapas do estudo do PEF, para garantir consistência interna e comparabilidade.

4. Precisão – Todo o esforço razoável deve ser feito para reduzir as incertezas na modelação do sistema do produto e na comunicação dos resultados.

5. Transparência - As informações do PEF devem ser divulgadas de forma a fornecer aos possíveis utilizadores a base necessária para a tomada de decisões e para que as partes interessadas avaliem a sua robustez e confiabilidade.

### 2.3.3 Fases de um estudo da pegada ecológica do produto

Neste método estão incluídas várias fases: Definição dos objetivos, Definição do âmbito, Criação do perfil de utilização dos recursos e de emissões, Avaliação dos impactos ambientais, e no final, a fase de Interpretação e Comunicação dos resultados obtidos [42];

1. A primeira fase (Definição dos objetivos e âmbito) inclui as aplicações previstas, as razões para a realização do estudo e o contexto da decisão, o público-alvo, a intenção de divulgar ou não as comparações do estudo ao público, a entidade que comissiona o estudo, e o procedimento de revisão (se aplicável) [43].

O método PEF requer definir a unidade funcional como [44]:

- O quê: a função ou serviço prestado.
- Quanto: a extensão da função ou serviço.
- Quanto tempo: a duração ou o tempo de vida.
- Quão bem: o nível esperado de qualidade.

2. A segunda fase visa a realização de um inventário de todos os fluxos de entrada e saída, tanto elementares (recursos, emissões) como não elementares (energia, resíduos, materiais), que deve ser compilado para todos os processos incluídos na cadeia de valor. Todos os fluxos devem ser modelados até ao nível de fluxo elementar para calcular o impacto associado no ciclo de vida do produto (por exemplo, a partir dos resíduos de saída, são determinadas as emissões específicas de ar, água e solo geradas pelos processos de tratamento). Os estágios obrigatórios do ciclo de vida incluídos num estudo de PEF são [45]:

- Aquisição de matéria-prima e pré-processamento: por exemplo, extração de recursos, pré-processamento de todos os materiais (incluindo materiais reciclados), agricultura, silvicultura, produção de embalagens e transporte associados a essas atividades;
- Fabricação: todos os processos que ocorrem desde a entrada até o portão de saída da instalação de produção (por exemplo, processamento químico, fabricação, montagem);
- Distribuição: transporte e armazenamento do(s) produto(s) acabado(s), incluindo os consumos das atividades de refrigeração e armazenamento (e.g., energia);
- Fase de uso: uso do(s) produto(s) para a função definida e vida útil, incluindo todos os consumos necessários (por exemplo, energia, materiais de manutenção, refrigeração);
- Fim de vida: todas as atividades que ocorrem a partir do momento em que o(s) produto(s) deixam de desempenhar sua função e são descartados ou reciclados. Isso inclui, por exemplo, recolha e transporte, desmontagem, triagem, processamento em material reciclado, aterro e incineração.

3. A terceira fase (Avaliação dos impactos ambientais) deve incluir as operações de classificação e caracterização dos fluxos, sendo opcionais as operações de normalização e ponderação.

a. Classificação: todos os inputs/outputs do inventário realizado na fase anterior devem ser correspondidos às categorias de impacto para as quais contribuem.

b. Caracterização: todos os valores dos inputs/outputs classificados são multiplicados por fatores de caracterização (os quais dependem do método de avaliação de impactos utilizado), representando a contribuição por unidade de input/output para cada categoria de impacto. O valor total dos resultados caracterizados de cada categoria de impacto corresponde à soma dos resultados caracterizados dos inputs/outputs considerados para essa categoria.

c. Normalização: o valor total dos resultados caracterizados de cada categoria de impacto é dividido pelo fator de normalização para essa categoria, sendo calculados os resultados normalizados [46].

d. Ponderação: os resultados normalizados são multiplicados por fatores de ponderação, os quais tomam o valor de 1 para todas as categorias de impacto. Por fim, a pontuação final é calculada através da soma dos resultados ponderados de cada categoria de impacto.

4. A quarta fase (Interpretação e Comunicação) é conduzida para se garantir que o desempenho do método PEF corresponde aos objetivos e aos requisitos de qualidade do estudo, e para se obterem conclusões e recomendações robustas da análise efetuada [47].

a. A robustez do método pode ser verificada através da análise da integridade do mesmo (assegurando que o inventário realizado na terceira fase está completo), de uma análise de sensibilidade (avaliando a influência de certas escolhas através da implementação de possíveis alternativas) e de uma análise de consistência (determinando se pressupostos, métodos e dados estão consistentes com o objetivo e âmbito).

b. A identificação de contribuições importantes de inputs/outputs e de processos pode ser realizada através da análise das contribuições para cada categoria de impacto (categorias de impacto mais relevantes, estágios do ciclo de vida, processos, fluxos).

c. A estimativa da incerteza consiste na interpretação da variação existente num resultado específico, com o uso de simulações, como por exemplo, análise Monte Carlo [48].

5. A quinta fase (verificação e validação) é obrigatória sempre que o estudo PEF, ou parte da informação nele contida, for utilizada para qualquer tipo de comunicação externa, ou seja, é necessário comunicar a qualquer parte interessada que não seja o comissário ou o utilizador do método PEF.

- Verificação é o processo de avaliação da conformidade realizado por um auditor acreditado para analisar a pegada ecológica, de forma a verificar se o estudo PEF foi realizado em conformidade com a versão mais atualizada do método PEF apresentado pela Comissão Europeia.

- Validação é a indicação dada de que a informação e os dados constados no relatório do estudo PEF são fiáveis, credíveis e corretos.

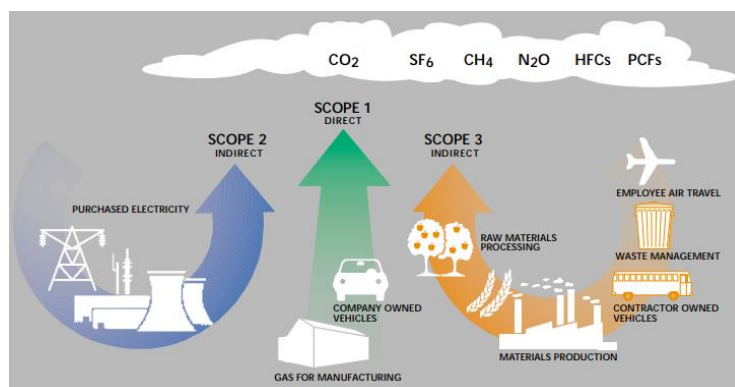
## 2.4 GHG PROTOCOL

A 11 de dezembro de 1997, um acordo internacional vinculado à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC) foi formada sob o nome de Protocolo de Quioto [1]. O principal objetivo do Protocolo de Quioto é o de comprometer os países industrializados a reduzir as sete principais emissões de gases de efeito estufa (GHG). Elas são o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>), óxido nitroso (N<sub>2</sub>O), hexafluoreto de enxofre (SF<sub>4</sub>), hidrofluorcarbonos (HFCs), perfluorcarbonos (PFCs) e hexafluoreto de enxofre (SF<sub>6</sub>). As emissões dos diferentes tipos de GHG são diferentes entre si. Existem várias categorias que empresas, órgãos governamentais e organizações devem considerar de modo a garantir a conscientização completa e a redução final de GHG. Obter uma melhor compreensão e mais insights sobre cada âmbito ajuda as empresas a ter sucesso na redução de emissões [49].

### 2.4.1 Âmbitos GHG Protocol

Os Âmbitos 1, 2 e 3 de emissões de gases do efeito estufa (GHG) são categorias de emissões definidas pelo *GHG Protocol*. Cada âmbito é usado por organizações, órgãos governamentais e reguladores para definir metas e objetivos para reduzir as emissões de carbono e outros gases químicos de efeito estufa que prejudicam o meio ambiente [50].

Cada âmbito é diferenciado pelo grau de controle que uma empresa ou organização tem sobre a fonte de emissão, e não pelo tipo de emissão. Segue de seguida uma explicação de cada âmbito, bem como a Figura 9, que ilustra os três âmbitos e as substâncias químicas que influenciam o GHG.



**Figura 9** Representação dos âmbitos do GHG Protocol [51].

Emissões de âmbito 1: As emissões de âmbito 1 são emissões diretas de gases de efeito estufa, de fontes pertencentes ou controladas por uma organização. Incluem emissões de caldeiras e fornos, emissões de transporte e emissões de produção química de processos próprios ou controlados. Tudo isso significa que as emissões são lançadas na atmosfera diretamente das atividades diárias da empresa.

Emissões de âmbito 2 - As emissões de âmbito 2 vêm do consumo de eletricidade, vapor, aquecimento e refrigeração. O consumo de energia contabilizado para as emissões de âmbito 2 é propriedade indireta das empresas, uma vez que depende dos fornecedores de energia.

Emissões de âmbito 3 - As emissões de âmbito 3 são mais complexas em termos de cálculo, pois estão ligadas não apenas à cadeia de valor de uma empresa, mas também a toda a vida útil do produto. As emissões de âmbito 3 são a fonte de emissões mais comum e significativa das empresas, já que se refere às emissões de GHG decorrentes das atividades da empresa. No entanto, a empresa não tem controle direto sobre as emissões resultantes.

Estas estão divididas nas seguintes categorias [52]:

Categoria 1: Bens e serviços adquiridos; Categoria 2: Bens de capital (máquinas, equipamentos, viaturas, etc.); Categoria 3: Atividades relacionadas com combustível e energia; Categoria 4: Transporte e distribuição a montante; Categoria 5: Resíduos gerados nas operações; Categoria 6: Viagens de Negócios; Categoria 7: Deslocações dos colaboradores; Categoria 8: Ativos arrendados a montante; Categoria 9: Transporte e distribuição a jusante; Categoria 10: Processamento de produtos vendidos; Categoria 11: Utilização dos produtos vendidos; Categoria 12: Fim de vida dos produtos vendidos; Categoria 13: Ativos arrendados a jusante; Categoria 14: Franchises; Categoria 15: Investimentos.

## 2.4.2 Etapas de um inventário padrão de GHG de produto

### **1ª Fase - Metas de negócios [53]**

As metas de negócios atendidas por inventários de GHG podem ser do seguinte tipo:

Gestão das mudanças climáticas - Identificar novas oportunidades de mercado e incentivos regulatórios, identificar riscos físicos e regulatórios relacionados ao clima no ciclo de vida de um produto, e avaliar os riscos de flutuações nos custos de energia e disponibilidade de material.

Rastreamento de desempenho - Concentrar esforços em melhorias de eficiência e oportunidades de economia de custos por meio de reduções de GHG ao longo do ciclo de vida de um produto, definir metas de redução de GHG relacionadas ao produto e desenvolver estratégias para atingir metas, medir e relatar o desempenho de GHG ao longo do tempo e rastrear melhorias de eficiência ao longo de um ciclo de vida do produto ao longo do tempo.

Gestão de fornecedores e clientes - Fazer parceria com fornecedores para alcançar reduções de GHG, avaliar o desempenho do fornecedor quanto aos aspectos de GHG dos esforços de aquisição verde, reduzir as emissões de GHG e uso de energia, custos e riscos na cadeia de abastecimento, evitar custos futuros relacionados com a energia e emissões e lançar uma campanha de educação do cliente para incentivar ações que reduzam as emissões de GHG.

Diferenciação do produto - Alcançar vantagem competitiva pela procura de oportunidades de redução de GHG e economia de custos para criar um produto de baixa emissão, redesenhar um produto para responder melhor às preferências do cliente, fortalecer a imagem de marca em relação ao desempenho de GHG, melhorar a retenção e recrutamento de colaboradores e fortalecer a reputação corporativa e a responsabilidade por meio da divulgação pública.

## **2ª Fase – Princípios de Contabilidade e Relatórios**

A contabilidade e o relatório de GHG de um inventário de produtos devem seguir os princípios de relevância, precisão, integridade, consistência e transparência.

Relevância – Certificar-se de que a contabilidade do inventário de GHG do produto, metodologias e relatórios servem as necessidades para a tomada de decisão do possível

utilizador. Apresentar informações no relatório de uma forma que seja facilmente compreensível pelos possíveis utilizadores.

Integridade – Certificar-se que o relatório de inventário cobre toda a vida útil do produto, ciclo de emissões e remoções de GHG dentro dos limites especificados, divulgar e justificar qualquer emissão significativa de GHG emissões e remoções que foram excluídas.

Consistência - Escolha de metodologias, dados e suposições que permitam fazer comparações significativas de um inventário de GHG ao longo do tempo.

Transparência - Abordar e documentar todas as questões relevantes de uma forma factual e coerente, com base numa auditoria clara. Divulgar quaisquer suposições relevantes e fazer referências apropriadas às metodologias, indicando as fontes usadas no relatório de inventário.

Precisão – Certificar-se de que as emissões e remoções de GHG relatadas não sejam sistematicamente maiores ou menores que as emissões e remoções reais, e que as incertezas sejam reduzidas tanto quanto possível. Obter precisão suficiente para permitir a possíveis utilizadores tomar decisões com razoável garantia quanto à confiabilidade das informações relatadas.

### **3ª Fase - Definição do âmbito**

Esta fase aborda os seguintes pontos:

- Escolha do produto a ser estudado (na orientação do setor);
- Escolha de uma unidade de análise (unidade funcional);
- Identificar se um inventário *cradle-to-gate* é apropriado;
- Identificar quaisquer GHG adicionais aplicáveis ao produto ou setor;

#### **4ª Fase – Confirmação dos limites [54]**

A próxima etapa no processo é definir os limites a aplicar, sendo que cada limite identifica quais emissões e remoções estão incluídas no inventário de GHG. Durante a definição do limite, as empresas devem concluir as seguintes etapas:

- Identificar os processos atribuíveis ao longo do ciclo de vida que estão diretamente conectados ao produto estudado e a sua capacidade de desempenhar sua função.
- Agrupar os processos atribuíveis em fases do ciclo de vida.
- Identificar os fluxos de serviço, material e energia necessários para cada processo atribuível.
- Ilustrar os processos do ciclo de vida do produto por meio de um mapa de processos.

#### **5ª Fase – Recolhas de dados e avaliação de qualidade [55]**

As empresas devem seguir os passos abaixo ao recolher os dados e avaliar a qualidade dos dados:

Etapa 1. Desenvolver um plano de gestão de dados e documentar os processos de recolha e avaliação de dados quando eles estão completos.

Etapa 2. Identificar todas as necessidades de dados usando o mapa de processo do produto.

Etapa 3. Identificar os tipos de dados.

Etapa 4. Recolher dados primários para todos os processos sob propriedade ou controlo da empresa.

Etapa 5. Avaliar e documentar os dados de qualidade dos dados de emissões diretas, dados de atividade e fatores de emissão, à medida que os dados são recolhidos.

Etapa 6. Melhorar a qualidade dos dados, focando nos processos que têm um impacto significativo nos resultados do inventário.

## **6ª Fase – Alocação**

- As empresas devem alocar emissões e remoções para refletir com precisão as contribuições do produto e coproduto(s) estudados para o total de emissões e remoções do processo comum.
- Quando as relações físicas por si só não podem ser estabelecidas ou usadas como base para alocação, as empresas devem selecionar a alocação económica ou outro método de alocação que reflita outras relações entre o produto estudado e o(s) coproduto(s).
- As empresas devem aplicar os mesmos métodos de alocação para entradas e saídas semelhantes dentro do ciclo de vida do produto.
- Para a alocação devido à reciclagem, as empresas devem usar o método de aproximação de circuito fechado ou o método de conteúdo reciclado, conforme definido por esta norma.
- As empresas devem divulgar e justificar os métodos usados para evitar ou realizar a alocação.

## **7ª Fase – Avaliação da Incerteza**

Deve ser relatada uma declaração qualitativa sobre a incerteza do stock e escolhas metodológicas. As opções metodológicas incluem:

- Perfil de uso e fim de vida;
- Métodos de alocação, incluindo alocação devido à reciclagem;
- Fonte dos valores do potencial de aquecimento global (GWP) usados;
- Modelos de cálculo.

## **8ª Fase – Cálculo dos resultados do inventário [56]**

As empresas devem seguir estas etapas ao calcular o impacto de GHG do produto estudado:

1. Escolher um valor GWP - Os fatores GWP mais atuais publicados pelo IPCC no momento da publicação desta norma são os fatores publicados no Quarto Relatório de Avaliação.
2. Calcular o CO<sub>2</sub> equivalente usando os dados adquiridos – O CO<sub>2</sub> equivalente é uma medida métrica usada para comparar as emissões de vários gases com efeito de estufa com base no seu GWP, convertendo quantidades de outros gases para a quantidade equivalente de CO<sub>2</sub> com o mesmo potencial de aquecimento global.
3. Calcular os resultados totais do inventário (CO<sub>2</sub>e/unidade de análise) - Uma vez calculados os resultados do inventário em CO<sub>2</sub>eq, a empresa precisa de garantir que todos os resultados estão na mesma base de fluxo de referência.
4. Calcular a percentagem do stock total resultados por estágio do ciclo de vida.

#### **9ª Fase - Garantia [57]**

O inventário de GHG do produto deve ser assegurado por um primeiro ou terceiro elemento, isto é, as três partes interessadas nesta fase: a empresa que faz o comunicado, os *stakeholders* e o segurador.

- As empresas devem escolher provedores de garantia que sejam independentes e não tenham conflitos de interesse com o processo de inventário de GHG do produto.
- As empresas devem relatar a declaração de garantia no relatório de inventário. A declaração deve incluir: O nível de garantia alcançado (limitado ou razoável), incluindo a opinião ou os resultados da revisão crítica, se a garantia foi realizada por uma primeira ou terceira parte, um resumo do processo de garantia, as competências relevantes dos provedores de garantia e como quaisquer potenciais conflitos de interesse foram evitados para garantia de primeira parte.

#### **10ª Fase – Comunicado**

Deve ser relatado publicamente as seguintes informações para estarem em conformidade com o Padrão de Produto do GHG *Protocol*: Informações Gerais e âmbito, configuração do limite, alocação, aquisição e qualidade de dados, incerteza, resultados do inventário,

garantia e definição de metas de redução, rastreamento de alterações de stock e rastreamento de desempenho.

### **11ª Fase – Definição de metas de redução e rastreamento de alteração do inventário**

Este padrão é projetado para ajudar a melhorar a qualidade e a consistência dos inventários de produtos e relatórios públicos com o objetivo final de ajudar as empresas e outras partes interessadas a reduzir as emissões dos produtos que projetam, fabricam, vendem, compram e usam. Essa etapa no processo de inventário permite que as empresas definam e atinjam metas de redução, rastreando de forma consistente e precisa nas alterações do inventário e identificando oportunidades de redução. Para definir metas de redução e acompanhar estas mudanças, as empresas devem:

- Desenvolver e relatar um inventário básico em conformidade com os requisitos desta norma.
- Recalcular o stock básico quando ocorrerem mudanças significativas e relatar essas mudanças.
- Preencher e divulgar um relatório de inventário atualizado, incluindo os resultados atualizados, os resultados do inventário básico e o contexto de mudanças significativas.
- Uso de uma unidade de análise consistente para permitir a comparação e acompanhar o desempenho ao longo do tempo.

### **2.4.3 Método IPCC**

O Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) é o órgão internacional para avaliar a ciência relacionada com as alterações climáticas. O IPCC foi criado em 1988 pelo Instituto Meteorológico Mundial Organização das Nações Unidas para o Meio Ambiente (OMM) e Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA) para fornecer aos formuladores de políticas com avaliações regulares da base científica das mudanças climáticas, seus impactos e riscos futuros, e opções de adaptação e mitigação [58].

As avaliações do IPCC são escritas por centenas de cientistas e fornecem uma base científica para os governos em todos os níveis desenvolverem políticas, e estão na base das negociações da Conferência do Clima da ONU – o Quadro das Nações Unidas Convenção sobre Mudanças Climáticas (UNFCCC). As avaliações são relevantes para as políticas, mas não são prescritivas, uma vez que podem apresentar projeções de mudanças climáticas futuras com base em diferentes cenários e os riscos que as mudanças climáticas representam e discutem as implicações das opções de resposta, mas não dizer aos formuladores de políticas quais ações devem tomar [59].

Existem três classes principais de matérias abordadas pelo método IPCC:

- A. Relatórios do IPCC (que incluem Avaliações, Síntese e Relatórios Especiais e seus Resumos para Formuladores de Políticas e Relatórios de Metodologia);
- B. Papéis Técnicos;
- C. Materiais de suporte.

## 2.5 PEP ECOPASSPORT

O *PEP ecopassport*<sup>®</sup> (*Product Environmental Profile*) é uma associação e um programa internacional para declarações ambientais de Tipo III, ou seja, verificadas por terceiros. Foi criada em 2009 com o objetivo de fornecer informações claras e precisas sobre o desempenho ambiental dos produtos, ajudando as empresas a fazer escolhas mais sustentáveis em termos de matérias-primas, processos de produção e embalagens. Compreende regras relevantes e consistentes para facilitar o cálculo LCA de equipamentos em conformidade com os requisitos da Norma ISO14040 [60].

Para obter a certificação PEP ecopassport, o produto deve ser avaliado com base em vários critérios, como emissões de gases de efeito estufa, consumo de energia e água, uso de recursos naturais, poluição do ar e da água, entre outros. Os resultados da avaliação são resumidos num relatório que apresenta o desempenho ambiental do produto numa escala de cores, permitindo que os consumidores e empresas identifiquem facilmente os

produtos mais sustentáveis. É utilizado em diversas indústrias, como a eletrónica, produtos químicos, têxteis, materiais de construção, entre outras. Trata-se de uma ferramenta importante para ajudar as empresas a melhorar a sustentabilidade dos seus produtos, e reduzir o seu impacto ambiental.

O programa *ecopassort* é baseado numa arquitetura de documentação de 3 níveis [61]:

- Nível 1: Instruções Gerais do Programa que definem a estrutura geral da abordagem e estabelecem os procedimentos usados para redigir, verificar e publicar um PEP de acordo com a norma ISO14025.
- Nível 2: Regras de categoria de produto (PCR). Elaboração de regras que fornecem um método de recuperação e análise de dados ambientais e o formato de declaração usados para gerar os dados na forma de um PEP.
- Nível 3: O PEP que declara as características ambientais dos produtos, de acordo com os requisitos do Programa *PEP ecopassort*.

## 2.6 2030 CALCULATOR

O *2030 Calculator* é uma ferramenta interativa de modelação energética desenvolvida pelo Departamento de Energia e Mudanças Climáticas do Reino Unido (DECC), em conjunto com a consultora sueca de pesquisa ambiental *Calculator 2050*. Esta ferramenta permite aos utilizadores explorar diferentes cenários de emissões de gases de efeito estufa, bem como seleccionar diferentes políticas e tecnologias de energia, e avaliarem o seu potencial impacto nas emissões de gases de efeito estufa, energia e custos associados. O objetivo principal do *2030 Calculator* é ajudar a entender as opções de política e tecnologia para alcançar as metas de redução de emissões de gases de efeito de estufa estabelecidas pelos diferentes países [62].

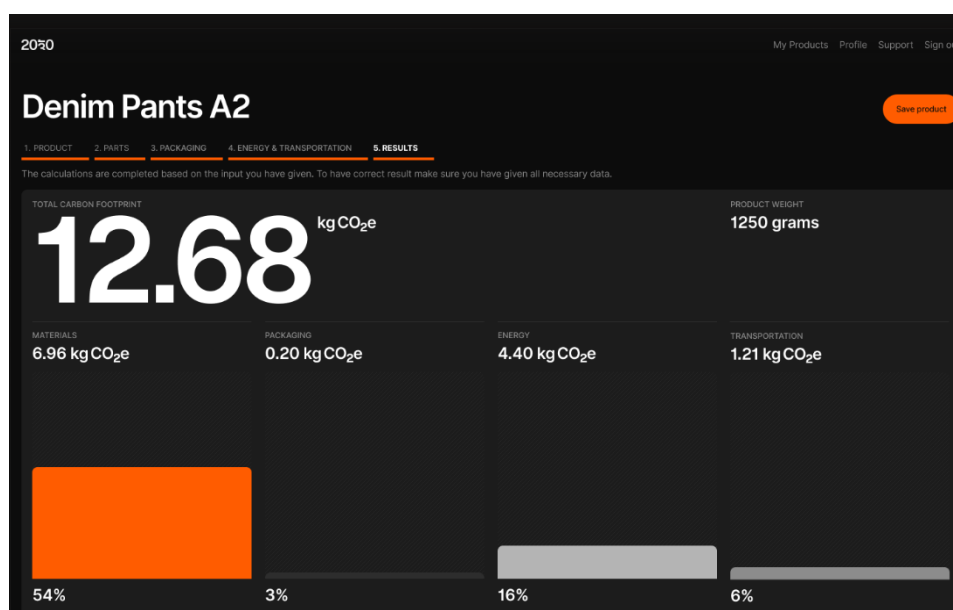
Foi desenvolvido e conseqüentemente atualizado com uma base de dados de emissões de CO<sub>2</sub> eq para as emissões *cradle-to-gate*, geradas por materiais usados em todas as peças e embalagens de produtos, uso médio de energia para montagem do produto tendo em conta a categoria de produto, tipo de energia usada na montagem, além do transporte,

considerando o peso total do produto, distância percorrida e modo de transporte entre fornecedor, fábrica e centro de distribuição.

Os dados do fator de emissão para materiais foram calculados através de uma combinação de fontes de dados licenciadas e abertas, incluindo *EcoInvent*, ICE (Universidade de *Bath*), IVL (Instituto Ambiental Sueco), DEFRA (Departamento de Meio Ambiente, Alimentos e Assuntos Rurais) e a metodologia LCA. Todos os dados foram normalizados para cobrir os mesmos pontos críticos e gama de valores para as fases *cradle-to-gate* usadas nos cálculos.

Calcular a pegada de carbono dos produtos tem sido difícil e caro, com cálculos regulares de LCA (Avaliação do Ciclo de Vida) o que leva semanas para serem concluídos para cada produto. O desafio de calcular a pegada de carbono dos produtos é especialmente difícil para marcas de pequeno e médio porte. Como resultado, os consumidores serão motivados a escolher produtos de menor impacto, e assim o campo de jogo será nivelado e os rótulos serão comparáveis.

Segue na Figura 10, o resultado da aplicação deste *software*. Numa primeira fase, é indicado o tipo de componente que é pretendido e de seguida selecionadas as matérias-primas que o componente é feito. O acondicionamento do componente não tem um peso significativo, mas é considerado. Por fim, a origem do componente, bem como o transporte que possa fazer é contabilizado.



**Figura 10** Exemplo de aplicação do cálculo da pegada de carbono [63].

## 2.7 DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL

### 2.7.1 Computação Sustentável

Computação sustentável é a aplicação dos princípios de sustentabilidade no desenvolvimento, uso e desperdício de tecnologias da informação e comunicação (TIC). Isso inclui a utilização de recursos de forma consciente e eficiente, a redução de emissão de gases de efeito estufa, a promoção da reutilização e reciclagem de equipamentos eletrônicos, além da adoção de práticas mais responsáveis e éticas no uso de dados e na segurança da informação [64].

Seguem alguns exemplos a considerar [65]:

Computação com o uso eficiente de energia - Uso de software e hardwares mais rápidos, pois consomem menor quantidade de energia. Configurar os equipamentos para consumirem uma menor quantidade de energia.

Projetos de *Data Centers Verdes* - Visa diminuir a quantidade de equipamentos mantendo o desempenho sob as ações dos recursos de TIC.

Produtos de TIC com selos ecológicos - Compra de produtos de empresas que empregam TIC Verde no fabrico dos seus equipamentos.

Consciência Ecológica - Conscientizar as pessoas presentes na organização para adotarem métodos sustentáveis. Adoção de práticas de regulação do uso de energia, como desligar automaticamente equipamentos em horários pré-determinados.

Descarte responsável e reciclagem - Descarte de equipamentos de TIC para ecocentros específicos ou então doar esses equipamentos. Uma nova estratégia utilizada pelas organizações é a reciclagem de cartuchos.

### 2.7.2 Software Sustentável

O desenvolvimento de software é pouco associado aos impactos ambientais e económicos da sustentabilidade. Mas a maneira como um sistema é construído tem grande importância

sobre como os recursos computacionais, energéticos e financeiros que suportam o seu ecossistema serão utilizados. Além disso, um software pode ser sustentável se desenvolvido de forma orientada a minimizar ou eliminar os impactos negativos ao meio ambiente e às pessoas [66].

Seguem algumas indicações dadas para a sustentabilidade do software [67]:

- Otimizar as áreas do código que consomem mais tempo ou recursos.
- Otimizar o impacto em dispositivos e equipamentos.
- Usar padrões e arquiteturas de software que melhor suportem padrões de armazenamento e acesso a dados.
- Otimizar o software e a arquitetura para tarefas assíncronas e agendadas.

### 2.7.3 Passaporte Digital do Produto

O objetivo de um Passaporte Digital do Produto (DPP) é permitir que os consumidores tomem decisões informadas com base nas informações disponíveis sobre um produto. Ele fornece transparência sobre as práticas de produção, as cadeias de suprimentos e os impactos ambientais e sociais associados ao produto. Com o passaporte digital do produto, os consumidores podem avaliar o desempenho sustentável de um produto e fazer escolhas alinhadas com suas preferências e valores [68].

Além disso, os passaportes digitais do produto também podem ser úteis para as empresas, pois podem melhorar a rastreabilidade, a comunicação com os consumidores e a gestão da cadeia de suprimentos. Essas informações detalhadas podem ser compartilhadas em várias etapas da vida útil de um produto, desde a produção até o descarte, facilitando a transição para uma economia mais circular e sustentável [69].

É importante ressaltar que as iniciativas relacionadas aos passaportes digitais do produto ainda estão em desenvolvimento e podem variar em termos de abordagem e implementação dependendo do setor, das regiões e das organizações envolvidas. Como tal, têm os seguintes pontos como resultado esperado [70]:

- Implantar e validar em escala a configuração DPP em pelo menos duas cadeias de valor.
- Informar sobre novas necessidades de padronização e especificações para garantir a interoperabilidade, segurança e aceitação por todas as partes interessadas.
- Recomendações com base nas lições aprendidas para implantações de DPP em outras cadeias de valor.

# 3. CASO DE ESTUDO

Com a abordagem desenvolvida no âmbito do Projeto PRODUTECH4S&C, o caso de estudo refere-se a um produto desenvolvido pela CONTROLAR SA.

A empresa centra-se no desenvolvimento e produção de aplicações industriais avançadas, sendo uma referência na área da Automação Industrial e Sistemas de Teste. Tendo a economia circular como um valor da empresa, este projeto ganha alguma relevância, uma vez que serve de base para a obtenção da pegada de carbono dos produtos desenvolvidos pela empresa.

O produto específico que foi escolhido para aplicar a abordagem à metodologia LCA é relevante porque se trata de um equipamento que foi alvo de retrofiting, o que vai ao encontro dos objetivos desta dissertação e particularmente desta abordagem. O produto será mais bem definido nas seções seguintes.

## 3.1. DEFINIÇÃO DO OBJETIVO E ÂMBITO

A aplicação escolhida para apresentar esta abordagem foi um produto representativo da CONTROLAR, que consiste num sistema de teste industrial que tem o propósito de testar *displays* automóveis em ambiente produtivo.

Numa primeira fase, este realiza o teste *Burn-in*, isto é, a estação de aquecimento realiza o perfil de temperatura entre 20°C a 85°C nos primeiros 10 minutos, permanecendo em 85°C por mais 50 minutos. Durante os primeiros 10 minutos, e ao mesmo tempo que é feito o aumento da temperatura, é realizado também o processo de *Flash*. Ao mesmo tempo, realiza testes em loop, isto é, mede o consumo de corrente, verificando se as entradas e saídas estão *OK*.

A função do módulo que está a ser testado é o de gerar o *vídeo* e o *áudio* para o *display* que mostra o painel de instrumentos.

Na Figura 11, é apresentada a máquina de teste, bem como o módulo que será testado.



**Figura 11** Representação da máquina e do Display a ser testado.

Este produto é desenvolvido para realizar diferentes níveis de testes funcionais em dispositivos e componentes eletrónicos no final da linha de produção. Algumas das principais características que a empresa prevê para esse sistema são a modularidade e customização, disponibilizando uma interface padrão que pode ser customizada com diferentes módulos e instrumentação específica para cada aplicação.

Este caso de estudo visa mostrar como a metodologia proposta pode ser aplicada num cenário real. Deste modo, o objetivo será avaliar e comparar o impacto de diferentes componentes, tal como analisar cenários de possível reutilização de equipamentos, de forma a repensar o modelo de negócios da empresa.

O atual modelo de negócios da Controlar está focado na venda e na entrega do equipamento ao cliente, que fica responsável pela máquina até ao final de sua vida útil. Normalmente, esses sistemas de teste são mantidos em operação durante 3 anos, tempo médio de ciclo de vida útil de um produto. No final do tempo de vida de fabrico do produto de teste, a máquina é desmantelada. O cliente tem de acarretar com estes custos de

desmantelamento, ou então é proposta ao fabricante um *retrofitting* da mesma, de forma a poder usá-la noutra produto. Nesta segunda opção há também custos para o cliente.

Para enfrentar esse desafio, a CONTROLAR questiona a possibilidade de implementar estratégias de reutilização que permitam manter a propriedade do produto em vários usos e adotar um modelo de negócios de servitização. Essas estratégias de reutilização exigiriam que a empresa fosse responsável por todos os custos do equipamento, desde o projeto até o desmantelamento, excluindo a fase de uso do cliente. No entanto, isso prolongaria o ciclo de vida da máquina e poderia resultar tanto em benefícios ambientais, tal como económicos.

A aplicação da metodologia LCA, em conjunto com regras e características das metodologias PEF e GHG Protocol, permitirá apresentar o desempenho ambiental, em termos de pegada de carbono de diferentes cenários medidos em KgCO<sub>2</sub> equivalente. A análise deste caso de estudo centra-se neste equipamento específico e no tipo de funções que desempenha. Tendo em conta que este é o primeiro estudo efetuado na CONTROLAR para o cálculo da pegada de carbono de uma máquina, e tendo em conta a complexidade destas máquinas, foi decidido escolher apenas o quadro elétrico da máquina. Além disso, não havia disponível um software de aplicação da metodologia LCA, o que torna extremamente difícil a obtenção, com rigor, da pegada de carbono na máquina por completo.

Segue a Figura 12, com a representação dos equipamentos do quadro elétrico da máquina escolhida. De realçar que não foram analisados todos os componentes presentes no quadro elétrico. Devido à dificuldade de obter informação referente a determinados componentes, estes foram retirados da lista de material detalhada no Anexo B, como é o caso da cablagem, isto é, os fios e cabos usados na ligação dos equipamentos não foram considerados.



**Figura 12** Representação do quadro elétrico com a disposição dos equipamentos.

De forma a analisar a metodologia LCA, todo o ciclo de vida *cradle-to-grave* do produto é avaliado, no entanto, apenas os impactos relacionados à propriedade dos fabricantes são considerados, como é o caso do fator de emissão da matéria-prima presente em cada componente (*cradle-to-gate*). Assim, não serão tidos em conta os efeitos associados, por exemplo, ao consumo de energia durante o funcionamento da máquina por parte do cliente, uma vez que se trata de uma fase a cargo do cliente.

No entanto, como será mostrado a seguir, a vida útil dos componentes foi levada em consideração, ou seja, se a vida útil de um componente crítico expirar durante a fase de uso, será necessário trocar por um *Spare part* com uma referência equivalente; ou em caso de *retrofitting*, é um componente a ser trocado no momento da intervenção.

No que diz respeito aos dados dos componentes, algumas aproximações e considerações podem ser necessárias, pois alguns componentes não estão disponíveis nas bases de dados do software LCA. Assim sendo, alguns dados foram obtidos em artigos que faziam referência a essas bases de dados, com exceção dos componentes de marcas que constam no PEP *passport*.

Com base nos resultados deste estudo, espera-se que a empresa tenha uma compreensão completa do impacto no ciclo de vida do produto, por forma a identificar componentes com maior impacto e encontrar soluções que permitam reduzir a pegada de carbono dos seus equipamentos.

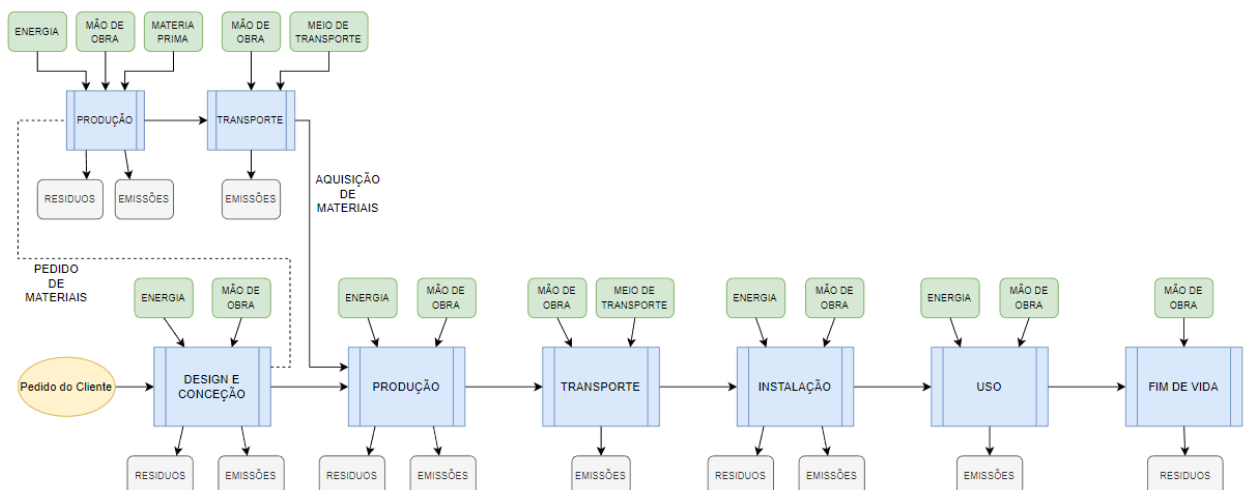
O objetivo para uma análise crítica na fase de interpretação é o de analisar os equipamentos que tenham uma pegada de carbono superior a 1,5 Kg CO<sub>2</sub>eq, além de que tenham um peso inferior a 1Kg. Esta é uma análise superficial, uma vez que o peso pode influenciar esse valor, já que a composição dos equipamentos é um dos principais fatores.

## 3.2. ANÁLISE DE INVENTÁRIO

### 3.2.1 Ciclo de vida do produto

Numa fase inicial, foi caracterizado o sistema em termos de ciclo de vida completo. Essa abordagem permite analisar os dados de entrada e saída de cada processo.

Na Figura 13 está representado o processo completo do ciclo de vida de uma máquina, com realce para o ciclo de pedido de materiais na fase de design e conceção da máquina.



**Figura 13** Ciclo de vida detalhado.

O ciclo de vida genérico deste tipo de produtos, no contexto da manufatura industrial, começa com a sua conceptualização e design. Nesta fase é apresentado por parte do cliente um conjunto de requisitos necessários para o produto em causa. A partir daí segue o desenvolvimento da máquina enquanto as equipas de projeto mecânico e projeto elétrico esboçam os conceitos de design. Esta fase é muito importante já que é nesta fase que os componentes a serem incorporados são selecionados. A escolha de componentes mais sustentáveis pode fazer uma grande diferença para reduzir a pegada de carbono da máquina.

Após a aprovação do projeto por parte do cliente, inicia-se a fase de produção. Os materiais e componentes selecionados na fase anterior são recepcionados e instalados na máquina após a montagem mecânica da estrutura. No final da montagem passa para a fase de testes, tanto elétricas como de software. O impacto do consumo de energia nessa etapa precisa ser considerado, enquanto os resíduos e as emissões foram considerados insignificantes para o estudo.

Após a fase de montagem e testes, o produto é transportado para o cliente. Os dados fornecidos referem-se ao transporte para um cliente, isto é, é contabilizado o tipo de veículo que faz o transporte da máquina e o veículo que transporta os colaboradores, a distância entre o fabricante e o cliente. As emissões são consideradas como parte da avaliação ambiental a considerar.

Na fase de instalação, durante a qual são realizados testes para avaliar a conformidade da máquina, requer a contabilidade das emissões de gases de efeito estufa emitidas nas viagens por parte dos funcionários da empresa. Assim, não é tido em conta o impacto da energia necessária na fase de instalação, sendo o mesmo suportado pelo cliente.

No que diz respeito à fase de uso, o fabricante pode fazer pequenas alterações ou mesmo manutenções ao produto, apesar de não ser contabilizado qualquer fator para o cálculo da pegada de carbono. A duração da fase de uso é considerada a vida comercial do produto e é determinada pela procura do produto.

Neste momento, o cliente é responsável pela desmontagem e descarte dos aparelhos, isto é, fica do lado do cliente a decisão de recuperar, reciclar, redesenhar, reduzir,

remanufaturar ou reutilizar os componentes. Assim, o tempo de trabalho e o consumo de energia durante a fase de desmontagem não foram levados em consideração, nem o impacto dos procedimentos de fim de vida das máquinas foi considerado.

### 3.2.2 Inventário de componentes adquiridos

Os materiais são recepcionados durante a fase de produção, em que a maioria dos componentes são adquiridos como produtos acabados, mas alguns requerem processamento adicional pela empresa. Tal como referido anteriormente, neste trabalho o foco são os componentes do quadro elétrico. Para alguns é fornecido os dados da sua pegada de carbono, enquanto noutros são calculados de acordo com uma metodologia descrita numa secção posterior.

Um inventário foi criado usando os dados de material e componentes fornecidos. Como tal, os componentes foram divididos em subsistemas, as chamadas famílias, que servem para identificar componentes com funções e propriedades semelhantes.

A Tabela 1 lista todas as famílias identificadas, o tipo de componentes contidos em cada uma e as suas quantidades.

**Tabela 1** Família de componentes

Familia family	Componentes Parts	Quantidade quantity
Armário	Quadro elétrico ventilador e filtro	3
Equipamentos de Proteção	Fusíveis disjuntores e contactores	47
Bornes	Bornes e tampas	164
Fontes	Fontes de alimentação	3
Relés	Relés	3
PLC	PLC e cartas	16
Cabos	Cabos	7
Calhas	Calha plástica e calha DIN	5
Botões	Botões e Porta etiquetas	4

Como se pode observar na tabela anterior, o quadro elétrico da máquina é composto por um grande número de componentes. Para simplificar a análise, cada componente individual é representado por um elemento específico do mesmo tipo, constituindo assim famílias de componentes.

### 3.2.3 Inventário de recursos necessários

Nesta secção será descrito o inventário, com as entradas e saídas essencialmente para a fase de produção e de transporte com os dados de trabalho, energia e transporte. Esse ciclo está representado na Figura 14, na qual expressa todas as fases do ciclo de vida do produto, com evidência para a fase de produção e de transporte.

**Figura 14** Ciclo de vida com recursos em análise.

Em relação à mão de obra, segue na Tabela 2 os valores projetados para as diferentes fases, com realce para o caso de um possível *retrofitting*.

**Tabela 2** Horas de trabalho por fase de ciclo de vida

Fase do ciclo de vida	Horas de trabalho - Cenário base	Horas de trabalho - Cenário retrofitting
Design e conceção	400	40
Produção	<b>600</b>	<b>200</b>
Transporte	<b>16</b>	<b>16</b>
Instalação	40	20
Uso	NC	NC
Fim de vida	NC	NC

Esta projeção tem reflexo neste projeto em causa, já que pode variar e muito, de projeto para projeto. Assim, a empresa estima que a fase de design e conceção requer 400 horas de mão de obra gastas, o que engloba projeto mecânico, projeto elétrico entre outros departamentos como as compras. Já no caso de um *retrofitting* esse tempo reduz-se drasticamente já que só é contabilizado o trabalho de *redesign* e compra de materiais necessários.

No caso da fase de Produção e montagem, num cenário base requer 600 horas de trabalho. Já no caso de *rework* da máquina, o número de horas é consideravelmente mais baixo, já que só partes da máquina sofrem alterações, isto é, pode acontecer o caso de haver uma intervenção só na base do produto.

Na fase de transporte será considerado o tempo necessário desde o embalamento pela CONTROLAR, transporte e expedição no cliente. O transporte será considerado como feito

pela empresa, já que se fosse por transportador teria outros impactos tais como o tipo de transporte, tamanho do transporte e tempo de viagem. Neste caso são consideradas 6 horas para todos os cenários.

Estima-se que o tempo e os recursos de instalação sejam semelhantes entre os diferentes cenários, apesar de no cenário inicial pode ser contabilizado mais tempo para testes no produto no cliente.

Nas restantes fases, a mão-de-obra não será considerada, uma vez que não é possível obter dados relativos a fases controladas pelo cliente.

Para além da mão-de-obra, outros recursos relevantes no ciclo de vida dos equipamentos incluem o consumo de energia e o tipo de transporte. O consumo de energia na fase de produção pode ser estimado tendo em conta o consumo de energia gasto pela empresa, por o número de máquinas produzido anualmente. Os meios de transporte englobam as deslocações da equipa logística para o transporte da máquina e a deslocação da equipa de engenharia para efetuar a instalação.

A Tabela 3 dispõe dos recursos relevantes à determinação da pegada de carbono para a fase de produção e transporte.

**Tabela 3** Outros recursos relevantes do ciclo de vida.

Recurso	Quantidade
Eletricidade	143445 Kwh
Deslocações	1450 Km

### 3.3. AVALIAÇÃO DE IMPACTO DO CICLO DE VIDA

A categoria de impacto considerada quantitativamente neste estudo é a mudança climática, o que significa que todos os resultados de LCI são expressos em termos de emissões de gases de efeito estufa geradas. Para isso, o modelo de linha de base do IPCC para 20 anos é usado onde todos os GHGs são convertidos em potencial de aquecimento global (GWP20) com unidade kg CO<sub>2</sub>eq via fatores de caracterização.

Quando possível e disponível, os dados de emissão são baseados em dados primários fornecidos por fornecedores *upstream* ou fabricantes de matéria-prima e componentes. Nos casos em que os fornecedores não conseguem fornecer dados suficientes, são usados dados de declarações ambientais de produtos (EPDs). Nesses casos, estão incluídas as fases de produção, uso e fim de vida, podendo variar conforme os protocolos como é o caso do *PEP Protocol*.

Para uma análise correta, os dados deveriam ser introduzidos nos modelos de avaliação de impacto económico e ambiental como o software *Simapro* ou *GaBi*, que usam as bases de dados como o IPCC e métodos de análise de impacto como o *ReCiPe* e *IMPACT 2002+*.

No caso em estudo, como os dados não foram analisados por nenhum software, com a exceção dos componentes que apresentam EPD, só são analisados na fase de produção e transporte. Na fase de produção, os dados são calculados tendo como base o fator de emissão de cada matéria-prima e a proporção de cada matéria-prima em relação ao peso total do componente. No caso da fase de transporte é considerado o transporte da máquina para o cliente, apesar de ser possível analisar o transporte de cada componente do fabricante para o fornecedor e até o cliente final através da aplicação *2030 Calculator*.

Numa fase inicial será abordado o fator de emissão da matéria-prima utilizada no processo de produção de cada componente, com o cálculo da pegada de carbono de cada componente apresentado no ponto seguinte. Após a conclusão dos pontos anteriores, já pode ser abordado o cálculo LCI para a fase produção e transporte de forma global.

### 3.3.1 Análise do fator de emissão das matérias-primas

A primeira abordagem é apresentar o fator de emissão por tipo de matéria-prima, de forma a calcular a pegada de carbono de cada componente. Para essa análise foram feitas algumas suposições quanto à percentagem de matéria-prima que compõe o produto, uma vez que esta informação não é apresentada por parte do fabricante de cada componente com grande rigor. A Tabela 4 contém o fator de emissão de cada matéria-prima presente nos componentes em estudo.

**Tabela 4** Fator de emissão por tipo de matéria-prima.

<b>Material material</b>	<b>Fator de Emissão (Kg CO<sub>2</sub>-eq/kg Material) Emission Factor</b>
ABS	2,73
Aluminium (Alumínio)	5,04
Brass (Latão)	6,69
Cardboard (Cartão)	0,94
Copper (Cobre)	4,1
Fiber (Fibra)	8,1
Glass (Vidro)	0,85
Iron (Ferro)	1,91
Lead (Chumbo)	1,64
Nickel (Níquel)	10,45
Polyamide (poliamida)	4,94
Polycarbonate (Policarbonato) PC	7,6
PVC	2,2
Silicon (Silício)	7,15
Silver (Prata)	10,72
Steel (Aço)	1,33
Steel Galvanized (Aço Galvanizado)	2,56
Thermoplastic (Termoplástico) PET	1,76
Tin (Estanho)	17,03
Wemid	4,94
Zinc (Zinco)	3,41

Os valores apresentados na tabela anterior representam a relação entre a quantidade de poluição gerada e a quantidade de matéria-prima transformada. Estes dados foram fornecidos por entidades relacionadas com o fabrico de matéria-prima como o alumínio ou o plástico e nos outros casos através de artigos científicos com *peer review* que fazem referência a essas matérias-primas em bases de dados como o *Ecoinvent* ou o IPCC.

### 3.3.2 Cálculo da pegada de carbono dos componentes

Após a análise do fator de emissão de cada matéria-prima, já se pode calcular o GHG para cada componente. Uma vez que só se vai calcular um indicador de impacto de ponto médio, isto é, só se vai calcular o indicador para a alteração climática, a fórmula de cálculo torna-se muito mais simples.

Com o auxílio de software específico os valores podem ser influenciados por variáveis que serão anuladas para efeito de cálculo, já que esta análise só é feita para a fase de fabrico. Assim [71]:

$$CO_2 = \sum m * FE \quad (1)$$

Em que CO<sub>2</sub> representa as emissões de CO<sub>2</sub> associadas ao componente (kg CO<sub>2</sub>), m é a quantidade de uma determinada matéria-prima presente no componente (kg), e FE é o fator de emissão de cada matéria-prima (kg CO<sub>2</sub>eq).

A Tabela 5 dispõe do cálculo da pegada de carbono dos componentes da família dos bornes.

**Tabela 5** Tabela com a pegada de carbono da família dos bornes.

Descrição Description	Peso (g) Weight	Material 1 / % material 1 / %		Material 2 / % material 2 / %		Material 3 / % material 3 / %		Fabrico (Kg CO <sub>2</sub> Eq) Manufacturing
		Wemid		Steel		Copper		
Borne 4con ZPE 2,5/4N, Terra	15,2	Wemid	70	Steel	10	Copper	20	0,076
Batente ZEW 35 (TS35) Beige	6,68	Wemid	65	Steel	35			0,028
Borne 2con ZDU6, 6 mm, Beige	17,19	Wemid	70	Steel	10	Copper	20	0,086
Borne 2con ZDU6, 6 mm, Azul	17,19	Wemid	70	Steel	10	Copper	20	0,086
Borne 2con ZPE6, 6 mm, Terra	21,63	Wemid	70	Steel	10	Copper	20	0,108
Tampa ZAP/TW 1 GN Para Borne 2con Terra ZPE 2,5mm	2,89	Wemid	100					0,017
Borne 2con ZDU 2,5, Beige	6,93	Wemid	70	Steel	10	Copper	20	0,035
Borne 3con ZDU 2,5 Azul	9,14	Wemid	70	Steel	10	Copper	20	0,046
Borne 3con ZPE 2,5/3N, Terra	12,84	Wemid	70	Steel	10	Copper	20	0,064
Tampa ZAP/TW 2 GN Para Borne 3con Terra ZPE 2,5mm	3	Wemid	100					0,017
Borne 4con ZDU 2.5/4N Laranja	11,56	Wemid	70	Steel	10	Copper	20	0,058
Borne 4con ZDU 2,5/4N, Beige	11,59	Wemid	70	Steel	10	Copper	20	0,058
Tampa ZAP/TW 3 GN Para Borne 4con Terra ZPE 2,5mm	3,74	Wemid	100					0,022
Borne Duplo ZDK 2,5mm Beige	9,612	Wemid	70	Steel	10	Copper	20	0,048
Tampa ZAP/TW ZDK 2,5mm Para Borne Duplo	4,365	Wemid	100					0,025
Borne Triplo Beige ZDL2.5-2N	16,8	Wemid	70	Steel	10	Copper	20	0,084
Tampa ZAP/TW ZDL2.5-2N Para Borne Triplo	6,95	Wemid	100					0,040
Tampa ZAP/TW 3 Para Borne 4con ZDU2,5/4AN Beige	3,7	Wemid	100					0,021
Tampa ZAP/TW1 Para Borne 2con ZDU2,5 Beige	2,86	Wemid	100					0,017

A análise é feita com base na identificação da matéria-prima e no seu peso em relação ao peso total do componente. De referir ainda, que estes valores são estimados, uma vez que não é dado por parte do fornecedor, os elementos concretos presentes em cada um dos componentes. A lista completa dos equipamentos está colocada no Anexo B.

Uma vez que se trata de uma lista de material extensa, os restantes valores estão representados por família de componentes na Tabela 6.

**Tabela 6** Valores da pegada de carbono por família de componentes.

Família family	Componentes Parts	Quantidade Quantity	Produção (Kg CO2 Eq) Manufacturing
Armário	Quadro elétrico ventilador e filtro	3	75,172
Equipamentos de Proteção	Fusíveis disjuntores e contactores	47	16,208
Bornes	Bornes e tampas	164	10,445
Fontes	Fontes de alimentação	3	6,715
Relés	Relés	3	1,780
PLC	PLC e cartas	16	9,707
Cabos	Cabos	7	1,023
Calhas	Calha plástica e calha DIN	5	7,678
Botões	Botões e Porta etiquetas	4	1,234

Perante os valores indicados na Tabela 6, a pegada de carbono gerada na produção do quadro elétrico e dos componentes analisados é de 129,962 Kg CO<sub>2</sub>eq.

### 3.3.3 Cálculo da pegada de carbono na produção da máquina

Na produção da máquina, a pegada de carbono está relacionada com o uso de energia na forma de eletricidade, que originam emissões de GHG. O consumo exato de eletricidade não é conhecido, mas uma estimativa é feita com base na eletricidade total consumida pela empresa durante um ano e o número de projetos desenvolvidos no mesmo ano, no qual se inclui o projeto da máquina deste caso de estudo. No entanto, esta é uma superestimação, uma vez que nem toda a energia consumida deriva da montagem das máquinas. Na Tabela 7 estão presentes os indicadores relativos á fase de produção.

**Tabela 7** Emissões GHG na fase de produção.

Consumo eletricidade (Kwh) Electricity consumer	Fator de emissão (tonCO2eq/MWh) Emission Factor	Emissões GHG (ton CO2eq) GHG emissions	Máquinas (Uni) Machines	Emissões GHG por Máquina (ton CO2eq) GHG emissions for machine
143455	0,175	25,105	120	0,209

De referir que o fator de emissão é indicado pela Agência Portuguesa do Ambiente [72], refere-se ao valor de 2020 para o continente, na abordagem de cálculo anual. Assim, as emissões GHG por máquina é de 209 kg CO<sub>2</sub>eq.

### 3.3.4 Cálculo da pegada de carbono no transporte da máquina

A fase de transporte analisa a pegada de carbono gerada no transporte da máquina desde a CONTROLAR até ao cliente, bem como o retorno do transportador, uma vez que esse transporte é efetuado por um camião da empresa. Os quilómetros contabilizados correspondem à deslocação até Palmela, localização da empresa do cliente.

São ainda calculadas as emissões GHG originadas pelo transporte dos colaboradores para a fase de instalação, isto é, contabilizada ainda a deslocação de uma carrinha com colaboradores da CONTROLAR, para proceder à instalação da máquina. Neste ponto é contabilizada apenas uma viagem Alfena – Palmela, como acontece no transporte da máquina. Na Tabela 8 estão dispostos os indicadores relativos á fase de transporte.

**Tabela 8** Emissões GHG na fase de transporte

Transporte Transport	Combustível Fuel	Fator de emissão (kg CO <sub>2</sub> e por uni) Emission Factor	Distancia (km) Distance	Emissões GHG (kg CO <sub>2</sub> eq) GHG emissions
Camião	Diesel	0,173	720	124,56
Carro	Diesel	0,166	720	119,52

Os fatores de emissão têm origem na base de dados GHG para o ano de 2022. Estes fatores variam por tipo de transporte, tamanho do transporte, combustível, entre outros fatores [73]. Para esta fase, estimam-se emissões GHG de 244,08 kg CO<sub>2</sub>eq.

### 3.3.5 Análise do tempo de vida dos equipamentos

Este último ponto, tem uma importância significativa uma vez que é um ponto a considerar para o caso de *retrofitting* da máquina, uma vez que estabelece os limites de uso de cada equipamento. Este estudo pode ser aprofundado na fase de uso da máquina, no caso de haver dados completos de consumos e tempo de uso do equipamento. Neste caso, a análise é superficial e superestimada, uma vez que não se sabe o tempo em que a máquina está em funcionamento, nem quantas peças a máquina testa por dia, porque há equipamentos com limite de ciclos de comutação. Assim, considera-se que o tempo em que a máquina está em funcionamento é de 24 horas por dia, 5 dias por semana. Estima-se a produção de 2500 peças por dia, e o número de ciclos é de 2 por peça. A Tabela 9 contempla os indicadores relativos ao uso da máquina.

**Tabela 9** Características relativas ao uso da máquina.

Tempo por dia (h) time per Day	Tempo por ano (h) time per year	Peças por dia (Uni) Parts per Day	Peças por ano (Uni) Parts per year	Ciclos por peça (Uni) Cycles per Part	Ciclos Anual (Uni) Cycles per Year
24	6240	2500	650000	2	1300000

Trata-se de dados estimados uma vez que não são contabilizados os tempos de possíveis paragens, nem se sabe de forma concreta o número de peças que a máquina testa.

Os dados relativos ao tempo em que a máquina funciona e o número de ciclos que faz anualmente são muito importantes, já que servem de referência para a determinação da vida útil dos equipamentos escolhidos. Através da consulta dos *datasheets* de cada equipamento, estima-se que a maior parte dos equipamentos instalados no quadro elétrico tenham um tempo de vida superior a 20 anos.

Na Tabela 10 estão listados os equipamentos com um tempo de vida estimado inferior a 20 anos, ainda assim apresentam um tempo de vida útil significativo.

**Tabela 10** Tempo de vida dos equipamentos do quadro elétrico.

Descrição Description	Família Femaly	Tempo de vida (Anos) Life time
Ventilador com filtro com sistema de fixação rápida 125x125mm	Armário	7
Relé EMR, Série 39, MasterBASIC, Push-In, 24Vdc/ac, 1C, 6A-250Vac, led	Relés	7
Fonte Alimentação 230Vac 240W 24V 10A Calha DIN	Fontes	7
Three-phase Asymmetry and Phase-sequence Phase-loss Relay	Relés	8
Fusível de Vidro de Fusão Rápida 3,5A 5x20mm	Equipamento Proteção	10

Estes equipamentos estão sujeitos a maior desgaste, uma vez que têm de estar sempre ligados e têm um número de horas de funcionamento limitado. No caso dos relés, acresce a limitação do número de ciclos ou comutações que exerce ao longo do tempo de funcionamento da máquina. Já o caso do ventilador, tem a condicionante de acumular pó, o que vai provocar sobreaquecimento do equipamento.

Como base de comparação, surge a Tabela 11 com os mesmos dados, só que referente aos equipamentos utilizados nos restante módulos da máquina.

**Tabela 11** Tempo de vida de equipamentos da máquina.

Equipamento Part	Tempo de vida (Anos) Life time	Equipamento Part	Tempo de vida (Anos) Life time
Base do produto	3	Monitor	7
BIM BR-R Box	5	Multímetro digital	10
Cabo de rede	7	PC - Fonte alimentação	5
Cabo de sensor	7	PC - Motherboard	7
Cabo USB	10	PPS	5
Conector do produto	3	Pressostato Digital	8
Conectores ODU	10	Scanner	7
Consola KVM	8	Sensor indutivo	5
Electric Actuator	5	Sensor Magnético	5
Fonte alimentação	5	Switch Box	5
Hub USB	7	Switch de rede	10
Kvaser PCican	7	Teclado	10
Mini PC	7	UPS	8

A base do produto e o conector do produto têm um tempo de vida de 3 anos, pelo facto do ciclo de vida durar entre 2 e 4 anos, e a análise a possíveis *retrofitings* ser feita de 3 em 3 anos. Isto é, apesar de serem componentes com tempo de vida superior, estes são alterados para um novo produto.

Os equipamentos *BIM BR-R box* e *Switch Box*, são equipamentos produzidos na CONTROLAR e têm como base *PCBs* que permitem fazer testes e medições ao produto. O tempo de vida destes equipamentos é de 5 anos, devido ao facto de serem compostos por componentes eletrónicos com um número de ciclos e comutações limitado, como é o caso de relés e fusíveis.

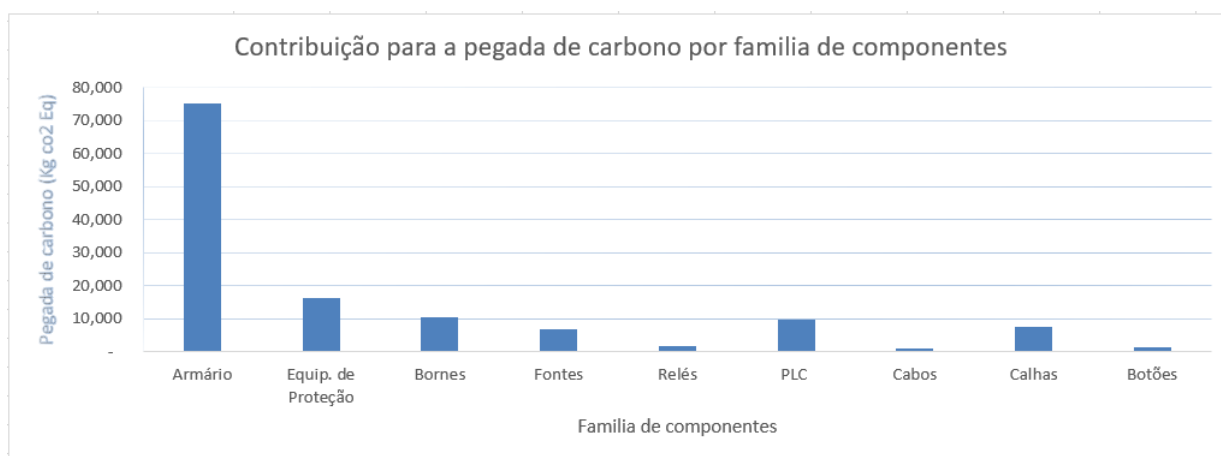
O eixo elétrico e os sensores estão em constante funcionamento, logo o desgaste destes equipamentos é superior aos restantes, além de que estão expostos a possíveis avarias ou até mesmo colisões com outros equipamentos.

Os perfis de alumínio, suportes metálicos e material pneumático não foi adicionado á lista por terem pouco desgaste. O mesmo acontece com os diversos conectores, por estes serem limitados por o número de conexões, fator que não é considerado já que as únicas peças móveis são as gavetas das bases do produto.

## 3.4. INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS LCA

### 3.4.1 Interpretação dos dados do LCA

Após a análise referente aos equipamentos adquiridos, a família de equipamentos que causa mais impacto de GWP é a família dos equipamentos referentes ao Armário. Esta família de componentes é composta pelo quadro elétrico, ventilador e filtro, apesar da contribuição substancial para a pegada de carbono ser do quadro elétrico. A Figura 15 demonstra a contribuição da pegada de carbono por família de componentes, com os componentes relativos à família do armário a ter grande foco.



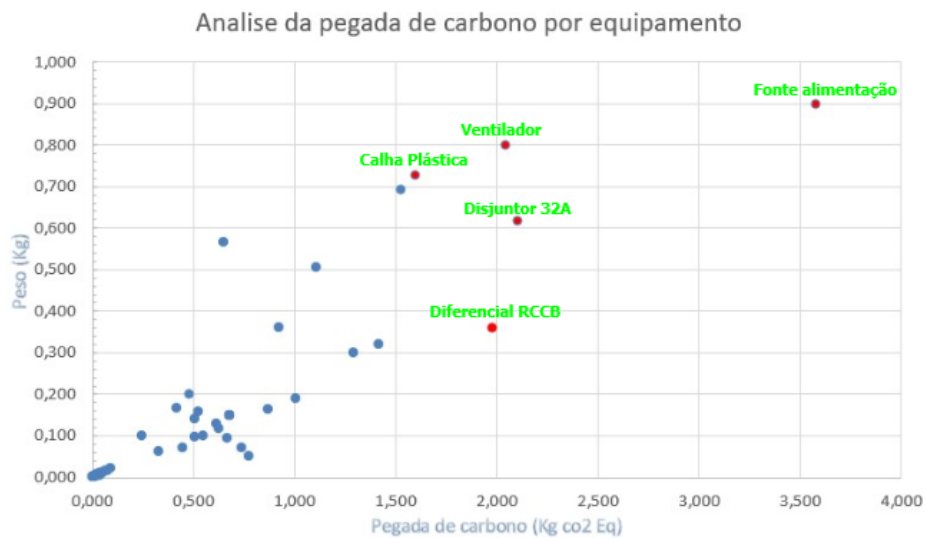
**Figura 15** Contribuição para a pegada de carbono por família de componentes.

Sendo o quadro elétrico um equipamento com um ciclo de vida muito alargado e que dificilmente é substituído, não será englobado na análise dos componentes introduzidos no quadro elétrico, embora seja o equipamento que mais contribui para a pegada de carbono na sua fase de fabrico com 72,254 Kg CO<sub>2</sub>eq.

No que toca às restantes famílias de componentes, a que causa mais impacto é a dos equipamentos de proteção. Uma das razões pode ser a sua relação peso e matéria-prima usada na sua produção.

A análise individual de cada componente é tratada como uma relação entre o peso do equipamento e a pegada de carbono originada na sua produção. De realçar que para alguns destes equipamentos o seu valor é estimado. A Figura 16 realça os equipamentos que

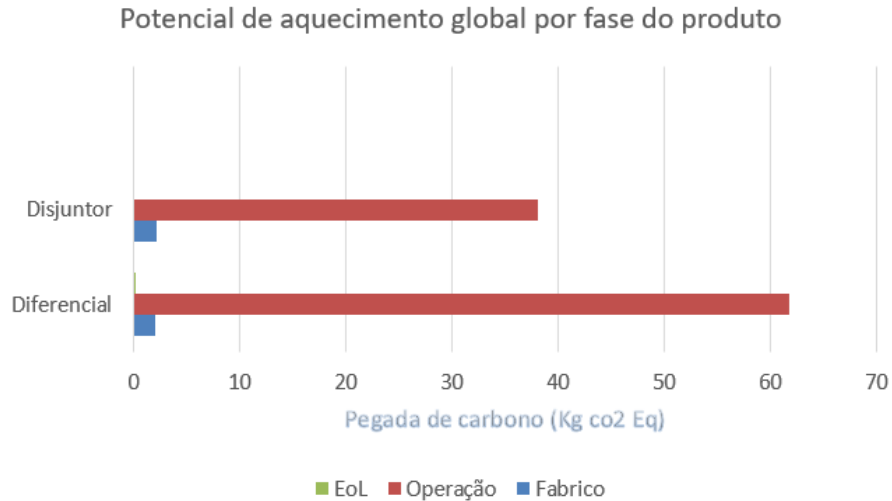
detêm uma pegada de carbono superior ao pretendido., como é o caso da calha plástica, ventilador, disjuntor 32A, diferencial e sobretudo a fonte de alimentação.



**Figura 16** Contribuição para a pegada de carbono por componente.

Após a representação da pegada de carbono gerada no fabrico dos equipamentos, existem 5 que passam o valor de 1,5 Kg CO<sub>2</sub>eq estipulado pela empresa, como um patamar preocupante para a utilização de equipamentos nas suas máquinas, o que pode levar ao estudo de possíveis alternativas a estes equipamentos, de forma a reduzir a pegada de carbono do conjunto de equipamentos selecionados em um projeto. Destes componentes, é de realçar que o disjuntor e o diferencial são fabricados por uma empresa que beneficia do *PEP passport*, logo dispõe da ficha EPD, isto é, os valores apresentados referentes a estes componentes são valores estimados pelo fabricante para todas as fases de vida do equipamento, por isso são dados mais concretos. Por outro lado, os dados referentes à fonte de alimentação e ao ventilador, são dados calculados tendo em conta o fator de emissão.

O gráfico da Figura 17 mostra o potencial global de aquecimento global do produto, sendo que a fase de operações é a fase do ciclo de vida com o maior impacto geral. Estes valores têm como base as fichas EPD do produto.



**Figura 17** Potencial de aquecimento global por fase do produto.

De realçar que a fase de EoL (*End of Line*), que pode ser considerada a fase de aplicação de um dos 6Rs, apresenta um impacto praticamente nulo para o ambiente, e por isso difícil de interpretar em qualquer tipo de gráfico.

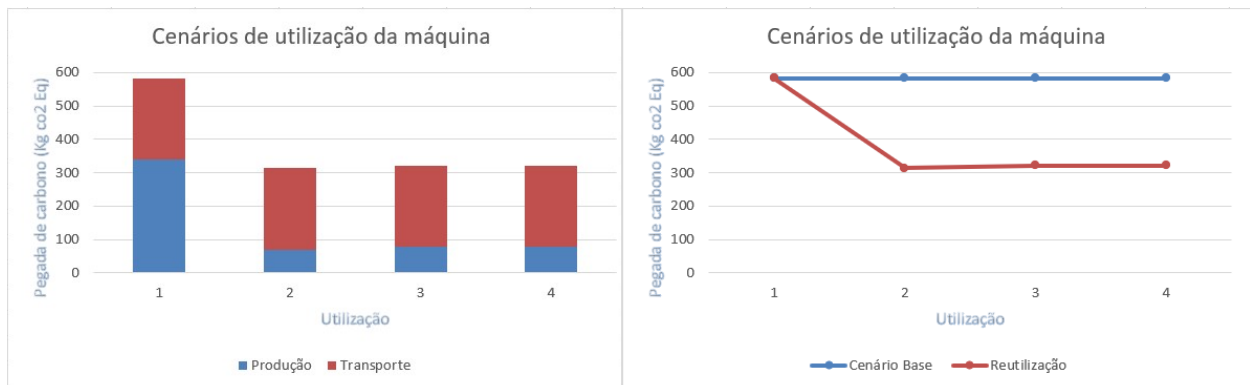
### 3.4.2 Análise de cenários de reutilização

Para fins de análise de reutilização, é importante destacar que a vida útil de uma máquina em condições reais varia de acordo com os requisitos do mercado e do cliente. Embora a decisão a ser tomada pela empresa não dependa apenas dos resultados, realizar uma análise de sensibilidade como esta pode ser muito útil, pois promove uma excelente indicação dos melhores cenários de desempenho. Os cenários de utilização estão marcados por períodos de 3 anos, conforme indicado na caracterização dos cenários.

Para efeitos de interpretação das fases do ciclo de vida da máquina, os indicadores de impacto ambiental do fabrico dos equipamentos vão ser agrupados na fase de produção da máquina, uma vez que para um cenário de *retrofitting* o ciclo de vida da máquina recomeça por esse ponto. De realçar que o transporte para a CONTROLAR no caso de *retrofitting* é a cargo do cliente.

Diferentes cenários de utilização da máquina estão dispostos na Figura 18. Esta avaliação tem como base as fases de produção e transporte para quatro cenários de utilização da máquina. Por outro lado, é feita uma análise à pegada de carbono com base nos cenários

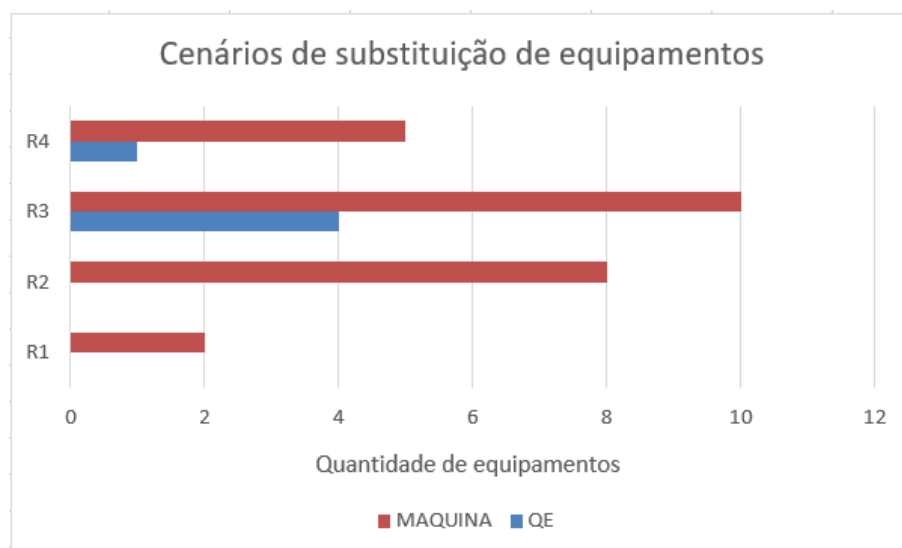
de reutilização da máquina em comparação à pegada de carbono emitida no fabrico de novas máquinas.



**Figura 18** Cenários de reutilização da máquina com base nos componentes do quadro elétrico, considerando 3 reutilizações.

Pela análise aos gráficos conseguem-se perceber as vantagens em fazer o *retrofitting* às máquinas, já que permite reduzir a pegada de carbono em cerca de 46% na primeira reutilização, bem como em cerca de 45% na segunda e terceira reutilização.

Por fim, na Figura 19 segue uma análise de *retrofitting* com os equipamentos da máquina, tendo em conta quatro possíveis reutilizações. Esta análise é feita para os equipamentos inseridos no quadro elétrico e para os componentes da máquina estudados.



**Figura 19** Cenários de substituição de equipamentos com base no ciclo de vida.

Essa análise tem em conta o ciclo de vida dos equipamentos introduzidos no quadro elétrico, tal como os equipamentos instalados na máquina. Uma vez que não foi possível obter os índices de impacto ambiental desses equipamentos, foi feita uma comparação com base no tempo de vida estimado de cada componente.

De realçar que na primeira e na segunda reutilização, não é necessário alterar nenhum equipamento do quadro elétrico, uma vez que só ao fim de 7 anos é necessário trocar equipamentos, isto é, o tempo de vida útil mínimo dos componentes do quadro elétrico é de 7 anos.

Em termos de pegada de carbono, há uma poupança significativa com base nos equipamentos analisados, uma vez que durante o período de análise de quatro reutilizações, só é necessário alterar quatro equipamentos que corresponde a uma pegada de carbono de 5,352 Kg CO<sub>2</sub>eq, ao invés dos 519,848 Kg CO<sub>2</sub>eq referentes a quatro máquinas novas.

### 3.5. SÍNTESE DO CASO DE ESTUDO

A abordagem à metodologia LCA, permitiu definir os objetivos e o âmbito do projeto. A análise foi feita com base em uma máquina de teste de um produto e foi definido que esta metodologia seria estudada nas fases de produção e de transporte.

Inicialmente houve uma recolha dos componentes necessários à eletrificação da máquina através do inventário LCA, mas logo houve um grande entrave, pois eram raros os componentes que detinham a ficha de declaração ambiental do produto (EDP). Então a análise incidu sobre os componentes do quadro elétrico, uma vez que para estes, a pegada de carbono podia ser estimada através do fator de emissão na fase de produção das várias matérias-primas presentes nos componentes.

Na fase de avaliação de impacto do ciclo de vida LCA, foi efetuado o cálculo da pegada de carbono de cada componente, tendo em conta o fator de emissão e o peso de cada matéria-prima em relação ao componente. Foi ainda calculada a pegada de carbono emitida na fase de produção da própria máquina, com base em pressupostos de consumos

de eletricidade da empresa por o número de máquinas produzidas em 2022. Já para a fase de transporte da máquina, a análise incidiu sobre os quilómetros percorridos e o tipo de transporte utilizado. Foi realizada ainda uma análise ao tempo de ciclo de vida dos componentes do quadro elétrico e alguns componentes da máquina, com menor tempo de vida.

Na fase de interpretação de resultados da metodologia LCA, foram expostos os componentes com maior pegada de carbono, tanto por família de componentes como de uma forma individual. Esta análise permitiu definir os componentes com pegada de carbono superior a 1,5 Kg CO<sub>2</sub>eq, um valor estipulado pela empresa como meta e sujeitos a uma avaliação posterior, de forma serem comparados com equipamentos equivalentes, com o intuito de serem substituídos por equipamentos com menor pegada de carbono. Por fim, foi realizada uma análise aos cenários de retrofitting da máquina, com base em quatro possíveis utilizações da máquina e dos seus componentes. De realçar que, o número de componentes inseridos na máquina sujeitos a desgaste e defeitos é largamente superior aos equipamentos colocados no quadro elétrico. Tal facto, deve-se às condições de utilização dos equipamentos, como: temperatura, isolamento, comutações, etc.

Face aos objetivos pretendidos, pode se concluir que as ferramentas de calculo da pegada de carbono contribuem para uma abordagem mais sustentável na escolha dos materiais a utilizar nas máquinas.

## 4. CONCLUSÕES

Esta dissertação teve como objetivo desenvolver uma abordagem dentro do projeto PRODUTECH4S&C para apoiar a tomada de decisão corporativa na implementação de uma estratégia de Economia Circular para estender o ciclo de vida do produto além do uso inicial. Isto foi feito com base nos princípios da metodologia LCA, que permite uma avaliação abrangente dos impactos ambientais.

De forma a abordar o tema, foi aplicada a metodologia a um caso de estudo. Este caso de estudo envolveu uma máquina de sistema de teste industrial fabricada pela CONTROLAR, que já fabricou diversas máquinas idênticas nos últimos anos. O objetivo da empresa é analisar os potenciais benefícios de adotar uma estratégia de modernização do seu modelo de negócio, de forma a manter a propriedade do produto em vários usos, em vez de fornecer novos equipamentos para uma nova aplicação.

Devido à complexidade desta máquina, e de não ter sido utilizado um software específico para análise da metodologia LCA, esta restringiu-se ao quadro elétrico da máquina e aos componentes que o compõem. Estes equipamentos foram estudados quanto à sua composição, peso e pegada de carbono na fase de fabrico, através do fator de emissão. No total estima-se que a sua pegada de carbono seja de 129,962 Kg CO<sub>2</sub>eq e que o equipamento que mais contribui é o próprio quadro elétrico com 72,654 Kg CO<sub>2</sub>eq, facto que se deve ao seu peso de cerca de 46Kg e de ser em aço galvanizado, que tem um fator de emissão de cerca de 2,56 Kg CO<sub>2</sub>eq/kg Material.

Na abordagem ao ciclo de vida do produto, quando restringida às fases de produção e transporte, estima-se que a máquina contribua com 583,042 Kg CO<sub>2</sub>eq na pegada de carbono. No caso de *retrofitting*, estima-se que na primeira reutilização, a pegada de carbono seja reduzida em 46%, e na segunda e terceira reutilização seja de 45% face ao valor estimado para o caso de ser fabricada uma nova máquina.

Para o cenário de reutilização da máquina e dos seus componentes foi analisado o tempo de vida de cada equipamento, considerando períodos de utilização de 3 anos. Dessa abordagem resultou que não era necessário alterar qualquer equipamento do quadro elétrico nas duas primeiras reutilizações, já que o tempo de vida útil mínimo dos componentes do quadro elétrico é de 7 anos. Assim, a pegada de carbono nas duas primeiras reutilizações para as fases LCA em estudo é nula e de 5,352 Kg CO<sub>2</sub>eq ao fim de 4 reutilizações, o que é insignificante comparado com os 519,848 Kg CO<sub>2</sub>eq emitidos na produção de 4 máquinas equivalentes.

## 4.1 TRABALHOS FUTUROS

No futuro, os objetivos são o desenvolvimento contínuo da metodologia proposta no âmbito do Projeto PRODUTECH4S&C, de forma a poder obter a pegada de carbono de todos os componentes e equipamentos utilizados pela CONTROLAR SA. Para isso, era essencial adquirir uma licença de um software LCA como é o caso do *Simapro*.

Outra ação necessária é a de adicionar à base de dados de artigos da CONTROLAR, o Primavera, uma coluna com a indicação da pegada de carbono de cada componente, por forma a facilitar a escolha do que causa menos impacto, entre componentes da mesma categoria.

Seria ainda útil criar uma plataforma gráfica que permita visualizar a pegada de carbono dos equipamentos, que seja alimentada com dados de forma dinâmica. Este teria o objetivo de realizar análise e previsão de dados, como é o caso do lançamento de mensagens aquando do fim de vida estimado de um equipamento.

O cruzamento de dados entre um software LCA e os softwares de desenho mecânico e elétrico permitiria explorar esse tipo de abordagem logo na fase de design e conceção, o que possibilitaria o apoio à tomada de decisão relativamente aos equipamentos a usar.

## Referências Documentais

- [1] I. I. CONTROLAR, "Carbon Footprint: Controlar obtains verification seal," CONTROLAR, 15 02 2023. [Online]. Available: <https://controlar.com/pegada-de-carbono-controlar-obtem-selo-de-verificacao-da-apcer/>. [Acedido em 28 Março 2023].
- [2] E. Macarthur, "What is the circular economy?," Media Centre, [Online]. Available: <https://ellenmacarthurfoundation.org/media-centre/overview>. [Accessed 20 março 2023].
- [3] M. Bjornbet, C. Skaar, A. Fet and C. Schulte, "Circular economy in manufacturing companies: A review of case study," *Journal of Cleaner Production*, no. 294, 2021.
- [4] E. Macarthur, "Circular economy introduction," Ellen MacArthur Foundation, [Online]. Available: <https://ellenmacarthurfoundation.org/topics/circular-economy-introduction/overview>. [Accessed 21 Março 2023].
- [5] M. B. Beitzel, *The business of a circular future, State of Green 2021*, 2021.
- [6] J. Arponen, L. Juvonen and V. P., *Circular economy business models, Finland: Sitra*, 2009.
- [7] P. Lacy, A. Gissler and M. Pearson, *Automotive's latest model: Redefining competitiveness through the circular economy, Accenture Strategy*, 2016.
- [8] S. Soh, S. K. Ong and A. Nee, "Design for Disassembly for Remanufacturing: Methodology and Technology," *Procedia CIRP*, vol. 15, pp. 407-412, 2014.
- [9] A. Jayal, F. Badurdeen, O. Dillon and I. Jawahir, "Sustainable manufacturing: modeling and optimization challenges at the product, process, and system levels," *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, pp. 144-152, 2010.
- [10] R. X. Gao and P. Wang, "Through Life Analysis for Machine Tools: From Design to Remanufacture," *Procedia CIRP*, vol. 59, pp. 2-7, 2017.

- [11] K. T. Szita, "THE APPLICATION OF LIFE CYCLE ASSESSMENT IN CIRCULAR ECONOMY," pp. 5-9, Janeiro 2017.
- [12] ICCA, "How to Know If and When it's Time to Commission a Life Cycle Assessment," 2018. [Online]. Available: <https://icca-chem.org/wp-content/uploads/2020/05/How-to-Know-If-and-When-Its-Time-to-Commission-a-Life-Cycle-Assessment.pdf>. [Accessed 20 Março 2023].
- [13] A. Carvalho, A. Mimoso, A. Mendes and H. Matos, "From a literature review to a framework for environmental process impact assessment index," *Journal of Cleaner Production*, no. 64, pp. 36-62, 2014.
- [14] ISO, "Environmental Management e Life Cycle Assessment Principles and Framework," ISO.org, 2022. [Online]. Available: <https://www.iso.org/standard/37456.html>. [Accessed 15 Março 2023].
- [15] S. Leitão, *Análise comparativa dos métodos de Avaliação do Impacto*, Lisboa: IST, 2016.
- [16] A. Mimoso, A. Carvalho, A. Mendes and H. Matos, "Roadmap for Environmental Impact Retrofit in chemical processes through the application of Life Cycle Assessment methods," *Journal of Cleaner Production*, no. 90, pp. 128-144, 2015.
- [17] N. Videira, I. Alves and R. Subtil, "Análise de Ciclo de Vida," in *Instrumentos de apoio à gestão do ambiente*, Universidade Aberta, 2014, pp. 31-71.
- [18] B. Matos, "Avaliação do desempenho ambiental da produção de mobiliário em Portugal," Faculdade de ciências e tecnologia Universidade Nova, Lisboa, 2012.
- [19] EPA, "US EPA Life Cycle Assessment: Principles and Practice," Maio 2006. [Online]. Available: <https://nepis.epa.gov/Exe>. [Accessed 27 Março 2023].
- [20] T. Mata and C. Costa, "Análise de Ciclo de vida, Gestão Ambiental – Norma ISO14040," *Cadernos de Ambiente AIP*, pp. 28-30, 2010.

- [21] J. Ferreira, "ANÁLISE DE CICLO DE VIDA DOS PRODUTOS," Instituto Potitecnico de Viseu, Viseu, 2004.
- [22] M. Goedkoop, "The Eco-indicator 99 Methodology," *Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 3, no. 1, 2007.
- [23] S. Goedkoop, "Eco-indicator 99. Manual for Designers," *A damage oriented method for Life Cycle Impact Assessment*, Outubro 2000.
- [24] M. Huijbregts, Z. Steinman and P. Helsout, "ReCiPe2016: a harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level," *The International Journal of Life Cycle Assessment*, pp. 138-147, 2017.
- [25] RIVM, "A harmonized life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level Report I: Characterization," Outubro 2017. [Online]. Available: [https://pre-sustainability.com/legacy/download/Report\\_ReCiPe\\_2017.pdf](https://pre-sustainability.com/legacy/download/Report_ReCiPe_2017.pdf). [Accessed 26 07 2023].
- [26] RIVM, "LCIA: the ReCiPe model," National Institute for Public Health and the Environment, 02 Novembro 2018. [Online]. Available: <https://www.rivm.nl/en/life-cycle-assessment-lca/recipe>. [Accessed 29 Março 2023].
- [27] M. Mori, R. Stropnik, A. Lotrič, B. Drobnič and M. Sekavčnik, "WP4 LCA for FCH technologies considering new strategies & technologies in the phase of recycling and dismantling," *Hy tech Cycling*, 26 Julho 2019.
- [28] O. Jolliet, M. Margni and R. Charles, "IMPACT 2002+: A New Life Cycle Impact Assessment Methodology," *The International Journal of Life Cycle Assessment*, no. 8, pp. 324-330, 2003.
- [29] L. Bragança and H. Koukarri, "Sustainability of Constructions Integrated Approach to Lifetime Structural Engineering," *Proceedings of the First Workshop*, Lisboa, 2007.
- [30] SIMAPRO, "Support.Simapro," SIMAPRO, [Online]. Available: <https://simapro.com/>. [Accessed 29 Março 2023].

- [31] M. J. Goedkoop and M. Oele, "Introduction to LCA with SimaPro," SIMAPRO, Janeiro 2016. [Online]. Available: <https://pre-sustainability.com/legacy/download/SimaPro8IntroductionToLCA.pdf>. [Accessed 30 Março 2023].
- [32] SIMAPRO, "Simapro Help Center," SIMAPRO, [Online]. Available: <https://support.simapro.com/s/article/Release-Notes>. [Accessed 30 Abril 2023].
- [33] B. Alcobia, *Desenvolvimento de um modelo conceptual para a Análise do Ciclo de Vida (ACV) de tecnologias de tratamento e valorização de óleos usados. Monte da Caparica: FCT-UNL. Tese de Mestrado em Engenharia do Ambiente.*, Monte da Caparica: FCT-UNL, 2019.
- [34] Sphera, "Product Sustainability Software & Data," Sphera, [Online]. Available: <https://sphera.com/product-sustainability-software/>. [Accessed 30 Abril 2023].
- [35] R. ARVIDSSON, M. CHORDIA, S. WICKERTS and A. NORDELÖF, "Implementation of the crustal scarcity indicator into life cycle assessment software," Março 2020. [Online]. Available: [https://research.chalmers.se/publication/519861/file/519861\\_Fulltext.pdf](https://research.chalmers.se/publication/519861/file/519861_Fulltext.pdf). [Accessed 20 Março 2023].
- [36] A. N. C. D. Ciroth, T. Lohse and M. Srocka, "openLCA 1.10. Comprehensive User Manual," Fevereiro 2020. [Online]. Available: [https://www.openlca.org/wp-content/uploads/2020/02/openLCA\\_1.10\\_User-Manual.pdf](https://www.openlca.org/wp-content/uploads/2020/02/openLCA_1.10_User-Manual.pdf). [Accessed 29 Março 2023].
- [37] OPENLCA, "Ask.OpenLCA," 2022. [Online]. Available: <https://www.openlca.org/download/>. [Accessed 24 Março 2023].
- [38] OpenLCA, "openLCA LCIA methods," openLCA Nexus, [Online]. Available: <https://nexus.openlca.org/database/openLCA%20LCIA%20methods>. [Accessed 24 Março 2023].

- [39] K. Allacker, N. Pelletier, K. Chomkhamisri and D. M. de Souza, "Product Environmental Footprint (PEF) Guide," *European Commission - Joint Research Centre*, 17 Julho 2012.
- [40] L. Zampori and R. Pant, "Suggestions for updating the Product Environmental Footprint (PEF) method," 2019. [Online]. Available: [https://eplca.jrc.ec.europa.eu/permalink/PEF\\_method.pdf](https://eplca.jrc.ec.europa.eu/permalink/PEF_method.pdf). [Accessed 24 Março 2024].
- [41] S. Manfredi, K. Allacker, N. Pelletier, E. Schau, K. Chomkhamisri, R. Pant and D. Pennington, "Manfredi S, Allacker K, Pelletier N, Schau E, Chomkhamisri K, Pant R, Pennington D," *The International Journal of Life Cycle Assessment*, no. 20, pp. 389-404, 2015.
- [42] E. C., "Understanding Product Environmental Footprint and Organisation Environmental Footprint methods," 04 Outubro 2022. [Online]. Available: <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC129907>. [Accessed 25 Março 2023].
- [43] V. Bach, A. Lehmann, M. Görmer and M. Finkbeiner, "Product environmental footprint (PEF) pilot phase: Comparability over flexibility? Sustainability," 15 Agosto 2018. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2071-1050/10/8/2898>. [Accessed 25 Março 2023].
- [44] N. Poolsawad, A. Jirajariyavech, J. Mungkalasiri, K. Datchaneekul, P. Suksatit, R. Wisansuwannakorn and W. Thanungkano, "Thai national life cycle inventory readiness for product environmental footprint," *The International Journal of Life Cycle Assessment*, no. 22, pp. 1731-1743, 2017.
- [45] S. Pyay, J. Mungkalasiri, C. Musikavong and W. Thanungkano, "A life cycle assessment of intermediate rubber products in Thailand from the product environmental footprint perspective," *Journal of Cleaner Production*, vol. 237, 2019.
- [46] L. Benini, M. L., S. S., M. S., S. E. and P. R., "Normalisation method and data for Environmental Footprints," *European commission JRC Publications Repository*, 05 Dezembro 2014.

- [47] S. Walker and R. Rothman, "Life cycle assessment of bio-based and fossil-based plastic," *Journal of Cleaner Production*, vol. 261, 2020.
- [48] I. Devaitkin, M. Kozlova and J. C. Yeomans, "Simulation decomposition for environmental sustainability: Enhanced decision-making in carbon footprint analysis," *Socio-Economic Planning Sciences*, vol. 75, no. 100837, 2021.
- [49] Eurostat, "Emissions of greenhouse gases and air pollutants," European Commission, [Online]. Available: <https://ec.europa.eu/eurostat/web/environment/information-data/emissions-greenhouse-gases-air-pollutants>. [Accessed 20 Março 2023].
- [50] Carbmee, "GHG Protocol: What are Scope 1, 2 & 3 Emissions? GHG Protocol: What Are Scope 1, 2, & 3 Emissions?," Carbmee, [Online]. Available: <https://www.carbmee.com/knowledge-insights>. [Accessed 26 Março 2023].
- [51] NZBCSD, "the "why" and "how" of accounting and reporting for GHG emissions," *The challenge of Greenhouse gas emissions*, Agosto 2002.
- [52] G. Radonjić and T. S. Saša, "Carbon footprint calculation in telecommunications companies – The importance and relevance of scope 3 greenhouse gases emissions," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, no. 98, pp. 361-375, 2018.
- [53] WBCSD, "Product Life Cycle Accounting & Reporting Standard," 22 Setembro 2011. [Online]. Available: <https://www.wbcsd.org/Programs/Climate-and-Energy/Climate/GHG-Management/Resources/Product-Life-Cycle-Accounting-Reporting-Standard>. [Accessed 29 Março 2023].
- [54] WBCSD, "The GHG Protocol: A corporate reporting and accounting standard," 30 03 2004. [Online]. Available: <https://www.wbcsd.org/Programs/Climate-and-Energy/Climate/Resources/A-corporate-reporting-and-accounting-standard-revised-edition>. [Accessed 28 03 2023].

- [55] CAPP, "Methodology for Calculating GHG Intensities," Junho 2021. [Online]. Available: <https://www.capp.ca/wp-content/uploads/2021/07/ESG-Emissions-Methodology.pdf>. [Accessed 29 Março 2023].
- [56] IEC, "Analysis of quantification methodologies of greenhouse gas emissions for electrical and electronic products and systems," 03 2013. [Online]. Available: <https://webstore.iec.ch/publication/7400>. [Accessed 30 03 2023].
- [57] S. Russel, "ESTIMATING AND REPORTING THE COMPARATIVE," 2019. [Online]. Available: [https://ghgprotocol.org/sites/default/files/2023-03/18\\_WP\\_Comparative-Emissions\\_final.pdf](https://ghgprotocol.org/sites/default/files/2023-03/18_WP_Comparative-Emissions_final.pdf). [Accessed 30 Março 2023].
- [58] IPCC, "IPCC FACTSHEET," Julho 2021. [Online]. Available: [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2021/07/AR6\\_FS\\_What\\_is\\_IPCC.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2021/07/AR6_FS_What_is_IPCC.pdf). [Accessed 30 Março 2023].
- [59] IPCC, "PROCEDURES FOR THE PREPARATION, REVIEW, ACCEPTANCE, ADOPTION,," 18 Outubro 2013. [Online]. Available: <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/09/ipcc-principles-appendix-a-final.pdf>. [Accessed 30 Março 2023].
- [60] ACOME, "Supporting our customers' low carbon strategy: PEP Passport," ACOME, [Online]. Available: <https://www.acome.com/en/publications/446-expert-opinions/3000-supporting-our-customers-low-carbon-strategy-pep-ecopassport>. [Accessed 30 Março 2023].
- [61] P. Association, "General Instructions of the PEP ecopassport® PROGRAM. Product Environmental Profile for Electrical, Electronic and HVAC-R equipment," 2017. [Online]. Available: [http://www.pep-ecopassport.org/fileadmin/webmaster-fichiers/version\\_anglaise/PEP-Instructions\\_generales-ed\\_4.1-\\_EN-2017\\_10\\_17.pdf](http://www.pep-ecopassport.org/fileadmin/webmaster-fichiers/version_anglaise/PEP-Instructions_generales-ed_4.1-_EN-2017_10_17.pdf). [Accessed 30 Março 2023].

- [62] T. Makinen and J. Alenius, "Methodology – The 2030 Calculator by Doconomy," Doconomy, 09 Julho 2020. [Online]. Available: <https://planetloyalty.com/>. [Accessed 26 Março 2023].
- [63] Doconomy, "The 2030 Calculator - A product carbon footprint calculation tool by Doconomy," Doconomy, 2021. [Online]. Available: <https://www.2030calculator.com/>. [Accessed 30 Março 2023].
- [64] B. Violino, "TI sustentável: Uma abordagem ambiental e social à tecnologia empresarial," COMPUTERWORLD, 25 Outubro 2022. [Online]. Available: <https://www.computerworld.com.pt/2022/10/25/ti-sustentavel-uma-abordagem-ambiental-e-social-a-tecnologia-empresarial/>. [Accessed 31 Março 2023].
- [65] DEVMEDIA, "TI Sustentável: conceito, soluções e consequências," DEVMEDIA, [Online]. Available: <https://www.devmedia.com.br/ti-sustentavel-conceito-solucoes-e-consequencias/29394>. [Accessed 31 Março 2023].
- [66] S. R. Nunes, *A CONTRIBUIÇÃO DOS PRINCÍPIOS DE PROGRAMAÇÃO NO DESENVOLVIMENTO DE SOFTWARE SUSTENTÁVEL*, São Paulo: USP Tecnologias Digitais e Inovação, 2020.
- [67] AWS, "Sustainability Pillar - AWS Well-Architected Framework," AWS, 15 Dezembro 2022. [Online]. Available: <https://docs.aws.amazon.com/wellarchitected/latest/sustainability-pillar/sustainability-pillar.html>. [Accessed 31 Março 2023].
- [68] E. Commission, "Digital Product Passport," European Health and Digital Executive Agency, 11 Maio 2023. [Online]. Available: [https://hadea.ec.europa.eu/calls-proposals/digital-product-passport\\_en#description](https://hadea.ec.europa.eu/calls-proposals/digital-product-passport_en#description). [Accessed 10 Março 2023].
- [69] Protokol, "Digital Product Passport (DPP): A Complete Guide," Protokol, 2023. [Online]. Available: <https://www.protokol.com/insights/digital-product-passport-complete-guide/>. [Accessed 20 Março 2023].

- [70] C. Stretton, "Digital product passports (DPP): what, how, and why?," Circularise, 20 Abril 2022. [Online]. Available: <https://www.circularise.com/blogs/digital-product-passports-dpp-what-how-and-why>. [Accessed 09 Junho 2023].
- [71] R. Frischknecht, R. Steiner and N. Jungbluth, *The Ecological Scarcity Method – Eco-Factors. A method for impact assessment in LCA*, Bern: Federal Office for the Environment (FOEN), 2006.
- [72] APA, "Fator de Emissão de Gases de Efeito de Estufa para a Eletricidade Produzida em Portugal," 2021. [Online]. Available: <https://apambiente.pt/clima/fator-de-emissao-de-gases-de-efeito-de-estufa-para-eletricidade-produzida-em-portugal>. [Accessed 30 Março 2023].
- [73] GOV.OK, "Greenhouse gas reporting: conversion factors 2022," 22 Setembro 2022. [Online]. Available: <https://www.gov.uk/government/publications/greenhouse-gas-reporting-conversion-factors-2022>. [Accessed 30 Março 2023].
- [74] U. Nations, "Global Warming Potentials (IPCC Second Assessment Report)," United Nations - Climatic Changes, 2022. [Online]. Available: <https://unfccc.int/process/transparency-and-reporting/greenhouse-gas-data/greenhouse-gas-data-unfccc/global-warming-potentials>. [Accessed 30 Março 2023].
- [75] EEAGRANTS, "Conversion Guidelines - Greenhouse gas emissions -," 2022. [Online]. Available: <https://www.eeagrants.gov.pt/media/2776/conversion-guidelines.pdf>. [Accessed 30 Março 2023].
- [76] S. Anders, R. Dag and J. Liu, "Significance of intermediate production processes in life cycle," *Journal of Cleaner Production*, no. 13, pp. 1269-1279, 2005.
- [77] GDA, *Blanks Aluminiumblech - UMWELT-PRODUKTDEKLARATION*, Germany: GDA - Gesamtverband der Aluminiumindustrie, 2020.

- [78] Winnipeg, "Emission factors in kg CO<sub>2</sub>-equivalent per unit," 2012. [Online]. Available: [https://legacy.winnipeg.ca/finance/findata/matmgt/documents/2012/682-2012/682-2012\\_appendix\\_h-wstp\\_south\\_end\\_plant\\_process\\_selection\\_report/appendix%207.pdf](https://legacy.winnipeg.ca/finance/findata/matmgt/documents/2012/682-2012/682-2012_appendix_h-wstp_south_end_plant_process_selection_report/appendix%207.pdf). [Accessed 25 Março 2023].
- [79] E. C., "Carbon Footprint of a Cardboard Box," Consumer Ecology, 2022. [Online]. Available: <https://consumerecology.com/carbon-footprint-of-a-cardboard-box/>. [Accessed 28 março 2023].
- [80] A. Vaccari and L. Tikana, *Copper Environmental Profile*, International Copper Association, 2022.
- [81] R. N., "HIGHPERFORMANCE POLYMERS," 15 Setembro 2020. [Online]. Available: <https://api.environdec.com/api/v1/EPDLibrary/Files/029796ea-3bc5-4960-82db-a73fce2c08e8/Data>. [Accessed 31 Março 2023].
- [82] A. Mittal, "Hot dip galvanized steel with pure Zinc coating," 25 Janeiro 2019. [Online]. Available: [https://industry.arcelormittal.com/repository/fce/transfer/Hotdipgalvanisedsteelwithpurezincoating\\_EPDPDF.pdf](https://industry.arcelormittal.com/repository/fce/transfer/Hotdipgalvanisedsteelwithpurezincoating_EPDPDF.pdf). [Accessed 31 Março 2023].
- [83] M. Goedkoop, R. Heijungs, M. Huijbregts, A. Schryver, J. Struijs and R. van Zelm, ReCiPe 2008. A Life Cycle Impact Assessment Method Which Comprises Harmonised Category Indicators at the Midpoint and the Endpoint Level, Países Baixos: PRé Consultants, CML, RUN, RIVM, 2013.

## Anexo A.

### A.1 Índice de Aquecimento Global Potencial

Neste anexo são descritas as substâncias que contribuem para o impacto ambiental. Apesar da análise ser feita apenas á pegada de carbono, os outros indicadores também podem ser calculados, através dos fatores de conversão GWP [74], como indicado na Tabela 12.

**Tabela 12** GWP por variável atmosférica

Nome	Formula	GWP (20 anos)
Dioxido de Carbono	CO <sub>2</sub>	1
Metano	CH <sub>4</sub>	56
Óxido nitroso	N <sub>2</sub> O	280
Tetrafluorometano	CF <sub>4</sub>	4400
Hexafluoreto de enxofre	SF <sub>6</sub>	16300

### A.2 Normas e regulamentos que fundamentaram o Estado de Arte

A Tabela 13 dispõe de normas e regulamentos analisados, de forma a fundamentar o estado de arte. Fazem parte desta lista normas internacionais ISO, relacionadas com a qualidade e segurança, bem como normas europeias e nacionais relativas a material elétrico e eletrônico.

**Tabela 13** Outras normas e regulamentos

Norma/Regulamento	Descrição
ISO 14021	Environmental labels and declarations — Self-declared environmental claims
EN 50693	Product category rules for life cycle assessments of electronic and electrical products and systems
IEC TS 63058:2021	Switchgear and controlgear and their assemblies for low voltage - Environmental aspects
IEC 62430:2019	Environmentally conscious design (ECD) — Principles, requirements, and guidance
EC 60898-1:2015/AMD1:2019	Amendment 1 - Circuit-breakers for overcurrent protection for household and similar installations
IEC 60947-5-1	Low-voltage switchgear and controlgear – Part 5-1: Control circuit devices and switching elements
EN 15804	Sustainability of construction works - Environmental product declarations
Despacho 17313/2008	SGCIE - Sistema de Gestão dos Consumos Intensivos de Energia

### A.3 Tipos de conversão e fatores de conversão para CO<sub>2</sub> [75]

Na Tabela 14 estão expostos alguns tipos de conversão como de produção de eletricidade, aquecimento e transporte para CO<sub>2</sub>. O fator de conversão depende do tipo de material ao qual está associado.

**Tabela 14** Tipos de conversão e fatores de conversão

<b>Tipos de emissão e fatores de conversão</b>
<b>Combustão (Burning):</b>
1 ton coal = 2,86 tons CO <sub>2</sub>
1 m3 natural gas = 1,9 kg CO <sub>2</sub>
1 ton waste incinerated = 0,445 tons CO <sub>2</sub>
<b>Produção de eletricidade (Electricity production):</b>
1 MWh from coal fired plant = 850 kg CO <sub>2</sub>
1 MWh from oil fired power plant = 590 kg CO <sub>2</sub>
1 MWh from gas fired power plant = 185 kg CO <sub>2</sub>
1 MWh Romania mix (2016) = 306 kg CO <sub>2</sub>
1 MWh EU28 mix (2016) = 295,8 kg CO <sub>2</sub>
<b>Aquecimento Urbano (District heating):</b>
1 MWh = 3.600 MJ from coal = 0,414 tons CO <sub>2</sub>
1 MWh = 3.600 MJ from natural gas = 0,227 tons CO <sub>2</sub>
1 MWh = 3.600 MJ from pellets (10% moisture) = 0,091 tons CO <sub>2</sub>
<b>Transporte (Transport):</b>
1 litre diesel = 2,640 kg CO <sub>2</sub>
1 litre gasoline = 2,392 kg CO <sub>2</sub>
1 personal car = 2,25 tons CO <sub>2</sub> /year (150 g CO <sub>2</sub> /km, 15.000 km/year)
<b>(Outros) Others</b>
1 ton plastic recycled = 2300 kg CO <sub>2</sub> saved
1 ton metal recycled = 1750 kg CO <sub>2</sub> saved
1 ton paper recycled = 795 kg CO <sub>2</sub> saved
1 ton glass recycled = 529 kg CO <sub>2</sub> saved
1 m3 water (supply) = 0,344 kg CO <sub>2</sub> saved
1 m3 water (treatment) = 0,708 kg CO <sub>2</sub> saved

# Anexo B.

## B.1 Lista de Material

Neste anexo são descritos, os factos relevantes para a determinação da pegada de carbono, como é o caso da lista de material completa e a lista dos fatores de emissão da matéria-prima com as suas referências, listada na Tabela 15 e na Tabela 16.

**Tabela 15** Lista de material analisado (Parte 1)

Quantidade Quantity	Descrição Description	Peso (g) Weight	Fabrico (Kg CO2 Eq) Manufacturing	Tempo de vida (Anos) Life time
2	Calha Plástica Perfurada 40*80mm (I*p)	727	3,199	20
1	Calha Plástica Perfurada 60*80mm (I*p)	693	1,525	20
1	Calha Plástica Perfurada 25*80mm (I*p)	505	1,111	20
16	Fusível de Vidro de Fusão Rápida 3,5A 5x20mm	1	0,065	10
1	Ventilador com filtro com sistema de fixação rápida 125x125mm	800	2,040	7
1	Filtro com sistema de fixação rápida 125x125mm	200	0,479	20
1	Quadro Eléctrico 1200*600*300 (com platine)	46100	72,654	20
2	Relé EMR, Série 39, MasterBASIC, Push-In, 24Vdc/ac, 1C	100	1,096	7
2	Calha DIN Perfurado tipo Omega	360	1,843	20
2	Fonte Alimentação 100-240Vac	300	2,582	20
1	SYSMAC CPU33 RS232C, Ethernet 10K Passos	190	1,008	20
3	6-channel input unit for K-type and J-type thermocouples	164	2,610	20
4	CJ1 - Carta 32 DI 24Vdc (ligação por Ficha MIL)	62	1,316	20
1	I/O Control Unit for the CPU Rack when connecting one or more Expansion Racks	70	0,449	20
1	I/O Interface Unit required on each Expansion Rack	96	0,509	20
2	Carta 8AO corrente	140	1,019	20
2	Carta 32 DO PNP (ligação por Ficha MIL)	70	1,486	20
1	Carta 16 DO Relé (Screwless)	118	0,626	20
1	Fonte Alimentação 230Vac 240W 24V 10A Calha DIN	900	3,576	7
1	Three-phase Asymmetry and Phase-sequence Phase-loss Relay	130	0,615	8
1	Expansion of CS1/CJ1 PLC connecting cable, 2m	100	0,249	20
6	Cabo conexão E/S, MIL40 a ponteiras, L = 100 cm	50	0,774	20
16	Borne porta fusível, fusível 5x20mm, parafuso	16	1,186	20
1	Botoneira de Emergência	159	0,526	20
1	Botao Lumi. Completo Bran. Metal 24V	93	0,670	20
1	Seccionador Fusível de Gaveta 3P 32A 10,3x38mm	165,8	0,417	20
2	Porta Etiquetas botão, 22mm, painel, 17.5 mm x 27 mm	2	0,011	20
1	RCCB, type A, 40A, 3P+N, 400Vac, 30mA	361	1,980	20
1	Disjuntor Modular, 6KA, 1P, Curva C, 6A	149,5	0,683	20
1	Disjuntor Modular, 6KA, 1P, Curva C, 1A	149,5	0,683	20
1	Disjuntor Modular, 6KA, 1P, Curva C, 16A	149,5	0,683	20

**Tabela 16** Lista de material analisado (Parte 2)

Quantidade Quantity	Descrição Description	Peso (g) Weight	Fabrico (Kg CO2 Eq) Manufacturing	Tempo de vida (Anos) Life time
2	Disjuntor Modular, 6KA, 1P, Curva C, 4A	149,5	1,366	20
2	Disjuntor Modular, 6KA, 1P, Curva C, 3A	149,5	1,366	20
1	Disjuntor Modular, 6KA, 1P, Curva C, 6A	149,5	0,683	20
1	Disjuntor Modular, 6KA, 1P, Curva C, 1A	149,5	0,683	20
1	Disjuntor Modular, 6KA, 1P, Curva C, 16A	149,5	0,683	20
2	Contactora, AC-3 32A, AC-1 50A, 15KW/400V, 1NO 1NC, DC 24V, 3P, SO, Screw	566	1,300	20
3	Contactora Tripolar 4kW 9A Paraf.	320	4,260	20
7	Borne 4con ZPE 2,5/4N, Terra	15,2	0,469	20
15	Batente ZEW 35 (TS35) Beige	6,68	0,368	20
3	Borne 2con ZDU6, 6 mm, Beige	17,19	0,227	20
1	Borne 2con ZDU6, 6 mm, Azul	17,19	0,076	20
1	Borne 2con ZPE6, 6 mm, Terra	21,63	0,095	20
1	Tampa ZAP/TW 1 GN Para Borne 2con Terra ZPE 2,5mm	2,89	0,014	20
6	Borne 2con ZDU 2,5, Beige	6,93	0,183	20
2	Borne 3con ZDU 2,5 Azul	9,14	0,081	20
2	Borne 3con ZPE 2,5/3N, Terra	12,84	0,113	20
1	Tampa ZAP/TW 2 GN Para Borne 3con Terra ZPE 2,5mm	3	0,015	20
14	Borne 4con ZDU 2.5/4N Laranja	11,56	0,714	20
13	Borne 4con ZDU 2,5/4N, Beige	11,59	0,665	20
2	Tampa ZAP/TW 3 GN Para Borne 4con Terra ZPE 2,5mm	3,74	0,037	20
19	Borne Duplo ZDK 2,5mm Beige	9,61	0,806	20
3	Tampa ZAP/TW ZDK 2,5mm Para Borne Duplo	4,37	0,065	20
70	Borne Triplo Beige ZDL2.5-2N	16,8	5,187	20
2	Tampa ZAP/TW ZDL2.5-2N Para Borne Triplo	6,95	0,069	20
1	Tampa ZAP/TW 3 Para Borne 4con ZDU2,5/4AN Beige	3,7	0,018	20
1	Tampa ZAP/TW1 Para Borne 2con ZDU2,5 Beige	2,86	0,014	20

## B.2 Lista dos fatores de emissão por matéria-prima

A Tabela 17 lista o tipo de matéria-prima e fator de emissão, presente nos componentes estudados. Apresenta ainda a fonte, onde foi retirada a informação necessária para a análise em causa.

**Tabela 17** Fator de emissão de matérias-primas

Material material	Fator de Emissão (Kg CO2 - eq/kg Material) Emission Factor	Fonte Source
ABS	2,732	Anders S.G. (2005) [76]
Aluminium	5,04	Gesamtverband der Aluminiumindustrie e.V. (2020) [77]
Brass	6,69	winnipeg.ca [78]
Cardboard	0,94	Consumer Ecology [79]
Copper	4,1	International Copper Institute (2018) [80]
Fiber	8,1	winnipeg.ca [78]
Glass	0,85	winnipeg.ca [78]
Iron	1,91	winnipeg.ca [78]
Lead	1,64	winnipeg.ca [78]
Nickel	10,45	Anders S.G. (2005) [76]
Polyamide	4,94	Radici Novacips SpA (2020) [81]
Polycarbonate PC	7,6	winnipeg.ca [78]
PVC	2,2	winnipeg.ca [78]
Silicon	7,153	Anders S.G. (2005) [76]
Silver	10,72	Anders S.G. (2005) [76]
Steel	1,33	Anders S.G. (2005) [76]
Steel Galvanized	2,56	ArcelorMittal Europe (2019) [82]
Thermoplastic PET	1,76	winnipeg.ca [78]
tin	17,03	Anders S.G. (2005) [76]
Wemid	4,94	Radici Novacips SpA (2020) [81]
Zinc	3,41	winnipeg.ca [78]