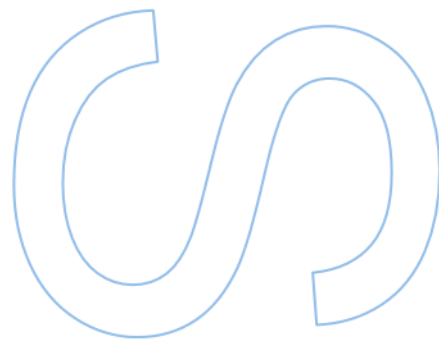
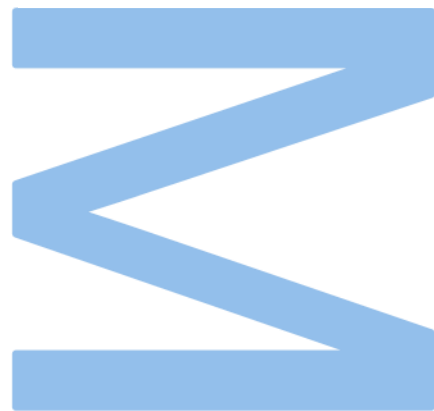
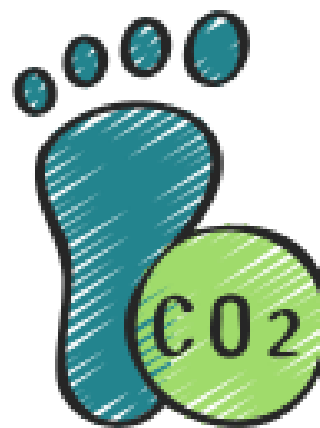


Cálculo de Pegada de Carbono de Produtos



Margarida Olinda Pemba Tati,
Mestrado em Ciências e Tecnologia do Ambiente,
Departamento de Geociências, Ambiente e Ordenamento de Território
Faculdade de Ciências da Universidade do Porto
2026

Cálculo de Pegada de Carbono de Produtos



Margarida Olinda Pemba Tati,

Relatório de Estágio realizado no âmbito do Mestrado em
Ciências e Tecnologia do Ambiente
Departamento de Geociências, Ambiente e Ordenamento de Território
2026

Orientador

Joaquim Carlos Gomes Esteves da Silva, Professor Catedrático,
FCUP

Coorientador

Luís Tiago da Costa Pinto da Silva, Professor Auxiliar, FCUP

Supervisor externo na Entidade de Acolhimento

Carla Gonçalves, Diretora Executiva, Centro do Clima da Póvoa
de Varzim



Agradecimentos

Gostaria de expressar o meu sincero agradecimento a todas as pessoas e entidades que contribuíram para a realização deste estágio e para a elaboração do presente relatório.

Em primeiro lugar, agradeço ao meu orientador, Professor Doutor Joaquim Carlos Gomes Esteves da Silva, e ao meu coorientador, Professor Doutor Luís Tiago da Costa Pinto da Silva, pelo acompanhamento, disponibilidade e orientação científica ao longo deste trabalho.

Agradeço também à minha supervisora externa, Carla Gonçalves, e ao Centro do Clima da Póvoa de Varzim, pela oportunidade de realizar este estágio em contexto real e pelo apoio prestado durante o desenvolvimento das atividades. Esta experiência permitiu-me estar em contacto direto com empresas de diferentes setores e compreender melhor os desafios associados à recolha de dados ambientais e ao cálculo da pegada de carbono de produtos.

Deixo igualmente o meu agradecimento às empresas que colaboraram nos casos de estudo, pela disponibilidade em fornecer informação sobre os seus processos produtivos e por tornarem possível a aplicação prática da metodologia desenvolvida. Por fim, agradeço à minha família e amigos pelo apoio, incentivo e compreensão ao longo deste percurso académico. A vossa presença e confiança foram fundamentais nos momentos mais exigentes, dando-me motivação para continuar e concluir esta etapa. Agradeço também aos meus amigos, pelo apoio e pelas palavras de incentivo durante este período.

Matondo!

Resumo

O presente relatório resulta do estágio realizado no Centro do Clima da Póvoa de Varzim e teve como principal objetivo calcular a pegada de carbono de produtos pertencentes a diferentes setores de atividade. Foram analisados quatro casos de estudo reais: a produção de couve penca, a produção de um rótulo autoadesivo, a confeção de uma calça chino e a produção de uma janela/caixilharia.

A metodologia adotada baseou-se numa abordagem simplificada de Avaliação do Ciclo de Vida, com fronteira cradle-to-gate. Assim, foram considerados os principais materiais, componentes, consumos e processos associados aos produtos analisados até à sua saída da empresa ou exploração agrícola. Os dados foram recolhidos junto das empresas, organizados em Microsoft Excel e convertidos em emissões de gases com efeito de estufa através da aplicação de fatores de emissão, sendo os resultados expressos em dióxido de carbono equivalente.

Os resultados obtidos mostraram diferenças significativas entre os casos analisados, devido à natureza dos produtos, às unidades funcionais, aos materiais utilizados e à qualidade dos dados disponíveis. No caso da couve penca, a pegada bruta foi de 48,14 g CO₂eq/kg, reduzindo para 31,2 g CO₂eq/kg após a consideração do sequestro de carbono associado à biomassa residual. Na RCM Etiquetas, a pegada do rótulo foi de 21,99 kg CO₂eq por milheiro, com maior contributo dos resíduos industriais e do substrato. Na Pinha Mansa, a calça chino apresentou uma pegada de 2,83 kg CO₂eq/peça, sendo o tecido principal, sobretudo o algodão, o componente mais relevante. No caso da Oficina de Janelas, a pegada estimada situou-se entre 1982,46 e 2132,17 kg CO₂eq por janela, dependendo do fator de emissão considerado para o vidro, destacando-se o alumínio e o vidro como principais contributos.

O estudo permitiu identificar os principais pontos críticos em cada produto e propor oportunidades de melhoria para cada caso. Apesar das limitações associadas à disponibilidade de dados e à utilização de fatores de emissão médios em alguns materiais, os resultados demonstram a utilidade da pegada de carbono como ferramenta de apoio à gestão ambiental e à identificação de medidas de redução de emissões.

Palavras-chave: pegada de carbono, cradle-to-gate, avaliação do ciclo de vida, gases com efeito de estufa, fatores de emissão.

Abstract

This report results from the internship carried out at the Centro do Clima da Póvoa de Varzim and aimed to calculate the carbon footprint of products from different activity sectors. Four real case studies were analysed: the production of couve penca, the production of a self-adhesive label, the manufacture of chino trousers and the production aluminum window.

The methodology was based on a simplified Life Cycle Assessment approach, using a cradle-to-gate system boundary. Therefore, the main materials, components, consumptions and processes associated with the analysed products were considered up to the point at which the product leaves the company or agricultural holding. Data were collected from the companies, organized in Microsoft Excel and converted into greenhouse gas emissions through the application of emission factors. The results were expressed in carbon dioxide equivalent.

The results showed significant differences between the case studies, due to the nature of the products, the functional units, the materials used and the quality of the available data. For couve penca, the gross carbon footprint was 48.14 g CO₂eq/kg, decreasing to 31.2 g CO₂eq/kg after considering the carbon sequestration associated with residual biomass. For RCM Etiquetas, the label presented a carbon footprint of 21.99 kg CO₂eq per thousand labels, mainly influenced by industrial waste and the substrate. For Pinha Mansa, the chino trousers presented a footprint of 2.83 kg CO₂eq per piece, with the main fabric, especially cotton, being the most relevant component. In the case of the aluminium window frame system, the estimated footprint ranged between 1982.46 and 2132.17 kg CO₂eq per window, depending on the emission factor considered for glass, with aluminium and glass being the main contributors.

The study made it possible to identify the main hot spots in each product and suggest improvement opportunities adapted to each case. Despite limitations related to data availability and the use of average emission factors for some materials, the results show the usefulness of carbon footprint assessment as a tool to support environmental management and identify possible emission reduction measures.

Keywords: carbon footprint, cradle-to-gate, life cycle assessment, greenhouse gases, emission factors.

Índice

Lista de Tabelas	vii
Lista de Figuras	viii
Lista de Abreviaturas	ix
1. Introdução.....	1
1.1 Enquadramento Geral	1
1.2 Entidade de Acolhimento: Centro do Clima da Póvoa de Varzim	1
1.3 Objetivos do Estágio	2
1.4 Estrutura do relatório	2
2. Revisão da Literatura e Enquadramento Teórico.....	4
2.1 Alterações Climáticas e Gases Com Efeito Estufa	4
2.2 Enquadramento Político e Industrial da Descarbonização	4
2.3 Conceito de Pegada de Carbono e Pegada de Carbono de Produtos	6
2.4 Avaliação do Ciclo de Vida	8
2.5 Limites do Sistema.....	9
2.6 Fatores de Emissão	11
2.7 Metodologias de Avaliação da Pegada de Carbono	12
2.8 Importância da Pegada de Carbono nas Empresas	13
3. Metodologia Geral do Estudo	16
3.1 Abordagem metodológica	16
3.2 Recolha e Tratamento de Dados	17
3.3 Pressupostos e Limitações	18
4. Casos de Estudo	20
4.1 Caso de Estudo I: Oliveira & Fontes (Couve Penca).....	20
4.1.1 Caracterização do sistema Produtivo	20
4.1.2 Inventário de Dados do Produto	21
4.1.3 Metodologia de Cálculo da Pegada de Carbono	22
4.1.4 Análise Laboratorial da Biomassa e Sequestro de Carbono	23

4.1.5 Resultados	24
4.1.6 Discussão.....	26
4.2. Caso de Estudo II: RCM – Etiquetas	28
4.2.1. Descrição da Empresa e do Produto	28
4.2.2. Inventário de Dados do Produto	29
4.2.3. Metodologia de Cálculo.....	31
4.2.4. Resultados	32
4.2.5. Discussão.....	33
4.2.6. Análise de Sensibilidade e Incerteza	34
4.3 Caso de Estudo III: Pinha Mansa	35
4.3.1 Descrição da empresa e do Produto.....	35
4.3.2 Inventário de Dados do Produto	36
4.3.3 Metodologia de Cálculo.....	37
4.3.4 Resultados	38
4.3.5 Discussão.....	39
4.4 Caso de Estudo IV: Oficina de Janelas	42
4.4.1 Descrição da Empresa e do Produto	42
4.4.2 Inventário de Dados do Produto	42
4.4.3 Metodologia de Cálculo.....	44
4.4.4 Resultados	44
4.4.5 Discussão.....	47
5. Análise Comparativa e Discussão Global	49
5.1. Análise comparativa dos resultados obtidos.....	49
5.2. Fatores Influenciadores.....	50
5.3 Oportunidades de Melhoria.....	51
6. Conclusão.....	53
6.1. Principais Conclusões.....	53
6.2. Contribuições do Estágio	54
6.3. Limitações do Estudo.....	55

7. Referências Bibliográficas	57
Anexos.....	62
Anexo 1 – Fatores de emissão utilizados nos casos de Estudo.....	62

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Potencial de Aquecimento Global (GWP) de alguns Gases com Efeito de Estufa (Horizonte de 100 anos). Adaptado de IPCC (2021).....	7
Tabela 2 - Principais fluxos considerados no inventário do ciclo de vida	22
Tabela 3 - Resultados da análise laboratorial da biomassa seca das pencas	24
Tabela 4 - Comparação entre a pegada de carbono bruta e a pegada líquida da couve penca após consideração do sequestro de carbono.	26
Tabela 5 - Principais categorias consideradas no inventário do rótulo Silk & Spice White Rt.	30
Tabela 6 - Principais fluxos considerados no inventário da calça chino.....	37
Tabela 7 - Principais categorias consideradas no inventário da janela de alumínio.	43
Tabela 8 - Pegada de carbono do sistema de janela de alumínio 3 × 3 m.	45
Tabela 9 - Fatores de emissão utilizados no caso Oliveira & Fontes	62
Tabela 10 - Parâmetros metodológicos utilizados no caso Oliveira & Fontes.....	62
Tabela 11 - Fatores de emissão utilizados no caso RCM Etiquetas	63
Tabela 12 - Fatores de emissão utilizados no caso Pinha Mansa	63
Tabela 13 - Fatores de emissão utilizados no caso Oficina de Janelas	65

Lista de Figuras

Figura 1 - Fases da Metodologia LCA (ACV) (adaptado de ISO 14040, 2006).....	8
Figura 2 - Tipos de fronteira do sistema (Pinheiro, 2014).	10
Figura 3 Representação das emissões Scope 1, Scope 2 e Scope 3 ao longo da cadeia de valor. (Adaptado do GHG Protocol (WRI & WBCSD, 2004)).....	14
Figura 4 - Imagem ilustrativo de couve penca analisada no caso de estudo. (Fonte: Greenhouse.pt).....	21
Figura 5 - Distribuição das emissões de gases com efeito de estufa por categoria na produção de couve penca	25
Figura 6 - Rótulo Silk & Spice White Rt. analisado no caso de estudo da RCM Etiquetas. Fonte: RCM Etiquetas.	29
Figura 7 - Contributo das diferentes categorias para a pegada de carbono total do rótulo Silk & Spice White Rt.	33
Figura 8 – Imagem ilustrativo de uma calça chino. Fonte: adaptado de Zalando (s.d.).	35
Figura 9 - Contributo das categorias e componentes para a pegada de carbono da calça chino	39
Figura 10 - Contribuição dos principais grupos de materiais para a pegada de carbono da janela de alumínio 3 × 3 m no cenário baixo.	46
Figura 11 - Contribuição dos principais grupos de materiais para a pegada de carbono da janela de alumínio 3 × 3 m no cenário alto.	46

Lista de Abreviaturas

ACV — Avaliação do Ciclo de Vida

AD — Dados de Atividade

AFOLU — Agriculture, Forestry and Other Land Use

APA — Agência Portuguesa do Ambiente

AR6 — Sixth Assessment Report

CH₄ — Metano

CNC — Controlo Numérico Computorizado

CO₂ — Dióxido de Carbono

CO₂eq — Dióxido de Carbono Equivalente

CQNUAC — Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Alterações Climáticas

CSRD — Corporate Sustainability Reporting Directive

DGES — Direção-Geral do Ensino Superior

EPI — Equipamento de Proteção Individual

ESRS — European Sustainability Reporting Standards

FAO — Food and Agriculture Organization of the United Nations

FCUP — Faculdade de Ciências da Universidade do Porto

FCT — Fundação para a Ciência e a Tecnologia

FE — Fator de Emissão

GEE — Gases com Efeito de Estufa

GHG Protocol — Greenhouse Gas Protocol

GWP — Global Warming Potential

ha — Hectare

HFCs — Hidrofluorcarbonetos

ICV — Inventário do Ciclo de Vida

INE — Instituto Nacional de Estatística

IPCC — Intergovernmental Panel on Climate Change

ISO — International Organization for Standardization

LCA — Life Cycle Assessment

LCI — Life Cycle Inventory

LCIA — Life Cycle Impact Assessment

N₂O — Óxido Nitroso

N₂O-N — Azoto sob a forma de óxido nitroso

NDCs — Nationally Determined Contributions

NF₃ — Trifluoreto de azoto

NIR — National Inventory Report

NPK — Azoto, Fósforo e Potássio

PC — Pegada de Carbono

PCP — Pegada de Carbono de Produto

PFCs — Perfluorocarbonetos

PME — Pequena e Média Empresa

PNUMA — Programa das Nações Unidas para o Ambiente

POM — Polioximetileno

PVC — Policloreto de Vinilo

RCM — Rodrigo Castro Moça Impressão de Etiquetas, Lda.

RNC 2050 — Roteiro para a Neutralidade Carbónica 2050

SF₆ — Hexafluoreto de Enxofre

UNFCCC — United Nations Framework Convention on Climate Change

UP — Universidade do Porto

1. Introdução

1.1 Enquadramento Geral

As alterações climáticas constituem um dos maiores desafios ambientais, económicos e sociais da atualidade. O aumento da concentração de gases com efeito de estufa (GEE) na atmosfera, resultante sobretudo de atividades antropogénicas, tem provocado impactos significativos nos ecossistemas, na economia e na sociedade (IPCC, 2021; IPCC, 2023). Neste contexto, torna-se fundamental quantificar e compreender as emissões associadas às diferentes atividades produtivas, de forma a identificar oportunidades de mitigação e promover práticas mais sustentáveis.

A pegada de carbono é uma das ferramentas mais utilizadas para quantificar o impacto climático de produtos, serviços ou atividades, permitindo expressar as emissões de GEE em termos de dióxido de carbono equivalente (CO_2eq) (Wiedmann & Minx, 2007; ISO, 2018). A sua aplicação tem vindo a crescer em diversos setores, incluindo a agricultura, a indústria e o setor têxtil, sendo cada vez mais relevante para a tomada de decisão e a definição de estratégias de redução de emissões.

O presente relatório resulta do estágio realizado no Centro do Clima da Póvoa de Varzim e tem como principal objetivo a aplicação prática do cálculo da pegada de carbono a diferentes realidades produtivas, através de casos de estudo reais. Para isso, foram recolhidos e organizados dados de atividade, selecionados fatores de emissão e calculadas as emissões associadas aos fluxos considerados em cada caso de estudo.

A relevância do trabalho está também na experiência prática de lidar com dados reais, muitas vezes incompletos ou disponíveis apenas de forma agregada. Apesar das limitações associadas à disponibilidade de dados, os resultados obtidos permitem identificar os principais contributos para as emissões em cada caso de estudo e apontar possíveis oportunidades de melhoria.

1.2 Entidade de Acolhimento: Centro do Clima da Póvoa de Varzim

O estágio curricular foi desenvolvido no Centro do Clima da Póvoa de Varzim, uma iniciativa dedicada à promoção da sustentabilidade, ação climática e sensibilização ambiental. Fundada em 2023, o Centro do Clima resulta de uma parceria entre a

Câmara Municipal da Póvoa de Varzim, a BIOPOLIS/Universidade do Porto, a Junta de Freguesia de Rates e a Casa Comum da Humanidade.

As atividades do Centro do Clima organizam-se em torno de quatro pilares principais Ar, Água, Terra e Fogo associados a diferentes áreas da sustentabilidade e da ação climática. O presente estágio enquadrou-se sobretudo no pilar Ar, relacionado com a monitorização e redução de emissões de gases com efeito de estufa e cálculo de pegada de carbono.

O Centro do Clima desenvolve iniciativas nas áreas da educação ambiental, sensibilização climática, sustentabilidade e apoio a projetos ambientais, promovendo igualmente a ligação entre entidades académicas, empresas e comunidade.

1.3 Objetivos do Estágio

O presente estágio teve como principal objetivo calcular a pegada de carbono de produtos de diferentes setores de atividade.

Para o desenvolvimento do trabalho foram analisados quatro casos de estudo distintos, correspondentes aos setores hortícola, gráfico, têxtil e metalomecânico. Em cada caso de estudo procurou-se quantificar as emissões de gases com efeito de estufa associadas ao processo produtivo, identificar os principais contributos para a pegada de carbono e analisar os fatores com maior influência nos resultados obtidos.

Com base nos resultados obtidos, foram ainda identificadas oportunidades de melhoria e possíveis medidas de mitigação com potencial para reduzir as emissões associadas aos sistemas produtivos analisados.

1.4 Estrutura do relatório

O presente relatório está organizado em 7 capítulos, que se desenvolvem de forma lógica para abordar os objetivos propostos:

- Capítulo 1: Introdução - Apresenta o contexto do estágio, a entidade de acolhimento (Centro do Clima), os objetivos do relatório e a sua estrutura.

- Capítulo 2: Revisão da Literatura e Enquadramento Teórico - Aborda os conceitos fundamentais de pegada de carbono, as metodologias de avaliação (GHG Protocol, ISO 14067), o limite de sistema com destaque para a abordagem cradle-to-gate e a importância dos fatores de emissão.
- Capítulo 3: Metodologia Geral do Estudo - Detalha a abordagem metodológica comum aplicada a todos os casos de estudo, incluindo as fases do trabalho, os métodos de recolha e tratamento de dados, e os pressupostos e limitações gerais.
- Capítulo 4: Casos de Estudo: Cálculo da Pegada de Carbono - Apresenta a análise individual de cada um dos quatro casos de estudo (horticultor, empresa gráfica, empresa têxtil e empresa de janelas), detalhando a descrição da empresa e do produto, o inventário de dados, os resultados da pegada de carbono, a discussão e as recomendações específicas.
- Capítulo 5: Análise Comparativa e Discussão Global - Realiza uma comparação transversal dos resultados obtidos nos diferentes setores, discute os fatores influenciadores e as lições aprendidas.
- Capítulo 6: Conclusões e Recomendações Finais - Sintetiza as principais conclusões do estudo, destaca as contribuições do estágio, reconhece as limitações e sugere futuros trabalhos.
- Capítulo 7: Referências bibliográficas

2. Revisão da Literatura e Enquadramento Teórico

2.1 Alterações Climáticas e Gases Com Efeito Estufa

As alterações climáticas atualmente constituem um dos principais desafios ambientais, sociais e económicos. O aumento da concentração de gases com efeito de estufa na atmosfera está associado sobretudo a atividades humanas, como a queima de combustíveis fósseis, a desflorestação, a agricultura e diversos processos industriais (IPCC, 2021; IPCC, 2023). Os impactos destas alterações manifestam-se através de eventos climáticos extremos mais frequentes e intensos (ondas de calor, secas, inundações), subida do nível do mar, acidificação dos oceanos, perda de biodiversidade e alterações nos padrões de produção agrícola, exigindo assim respostas coordenadas e urgentes a nível nacional e internacional (IPCC, 2021).

Os principais (GEE) responsáveis por este fenómeno são o dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), óxido nitroso (N_2O) e alguns gases fluorados como HFCs, PFCs, SF_6 , NF_3 . O CO_2 é o GEE mais abundante e o principal contribuinte para o aquecimento global, resultante da queima de combustíveis fósseis, desflorestação e processos industriais. O metano, embora menos abundante, possui um potencial de aquecimento global significativamente superior ao CO_2 num horizonte de 100 anos, sendo emitido principalmente pela agricultura (pecuária, arrozais), gestão de resíduos e produção de energia. O óxido nitroso, com um GWP ainda mais elevado, provém sobretudo de atividades agrícolas e processos industriais. A monitorização e quantificação destes gases são cruciais para a compreensão e mitigação das alterações climáticas, sendo a base para o cálculo da pegada de carbono (Wiedmann & Minx, 2007; IPCC, 2021).

2.2 Enquadramento Político e Industrial da Descarbonização

O Acordo de Paris, adotado em 2015 no âmbito da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Alterações Climáticas (CQNUAC), estabeleceu um compromisso para limitar o aumento da temperatura média global abaixo de 2°C acima dos níveis pré-industriais, com esforços para não ultrapassar $1,5^\circ\text{C}$. Este acordo sublinha a necessidade de os países apresentarem as suas Contribuições Nacionalmente

Determinadas (NDCs) para a redução de emissões, refletindo a sua ambição climática e promovendo a cooperação internacional. A implementação do Acordo de Paris reforça a necessidade de medir emissões de forma mais sistemática, uma vez que a definição de metas de redução depende da identificação das principais fontes emissoras (UNFCCC, 2015; IPCC, 2023).

A União Europeia (UE) em resposta a este desafio, lançou o Pacto Ecológico Europeu (European Green Deal), uma estratégia que visa transformar a UE na primeira economia neutra em carbono até 2050. Este pacto não é apenas uma política ambiental, mas uma estratégia de crescimento que promove uma transição justa para uma economia sustentável, circular e de baixo carbono, com implicações profundas para todos os setores económicos, desde a energia e transportes até à agricultura e indústria. Dentre as iniciativas do Green Deal, destaca-se o pacote "FIT for 55", que visa reduzir as emissões líquidas de GEE em pelo menos 55% até 2030, em comparação com os níveis de 1990 (European Commission, 2021).

Este enquadramento político e regulatório tem implicações diretas para as empresas, que são cada vez mais incentivadas a monitorizar, reportar e reduzir as suas emissões de GEE. Para além das exigências legais, existe também pressão por parte de clientes, investidores e cadeias de fornecimento para que as organizações disponibilizem informação ambiental mais transparente (Wulf & Schaltegger, 2016). A busca pela neutralidade carbónica, ou *net-zero*, implica não apenas a redução drástica das emissões diretas e indiretas (Scopes 1, 2 e 3), mas também a compensação das emissões residuais através de sumidouros de carbono (como por exemplo, florestação, tecnologias de captura de carbono) ou créditos de carbono verificados (WRI & WBCSD, 2011). A neutralidade carbónica é um conceito que se interliga diretamente com a pegada de carbono, uma vez que a quantificação rigorosa das emissões (através da pegada de carbono) é o primeiro passo para se definir as metas de redução e, subsequentemente, alcançar a neutralidade (ISO, 2018b).

A descarbonização também pode ser vista uma oportunidade para rever os processos produtivos e melhorar a eficiência no uso de recursos. No entanto, em muitas pequenas e médias empresas, este processo começa por etapas simples, como organizar dados de consumo, identificar materiais mais relevantes e perceber onde se concentram as emissões. Autores como Porter e Kramer (2011) argumentam que a sustentabilidade pode ser uma fonte de vantagem competitiva, criando valor partilhado para a empresa e para a sociedade, ao integrar as preocupações sociais e ambientais na sua estratégia central. A adoção de práticas de sustentabilidade, incluindo a gestão da pegada de

carbono, é cada vez mais um fator de diferenciação e de acesso a mercados e financiamento.

Em Portugal, o compromisso com a sustentabilidade e a neutralidade carbónica é reforçado por legislação e estratégias nacionais. A Lei de Bases do Clima (Lei n.º 98/2021) define os princípios e as metas para a ação climática em Portugal, alinhando-se com os objetivos do Acordo de Paris e do Pacto Ecológico Europeu. Entre os seus objetivos encontra-se a promoção da neutralidade carbónica até 2050, através de medidas de mitigação, adaptação, planeamento setorial e sensibilização para a ação climática (Lei n.º 98/2021).

O Roteiro para a Neutralidade Carbónica 2050 (RNC 2050), aprovado pela Resolução do Conselho de Ministros n.º 107/2019, define a visão e as trajetórias para que Portugal atinja a neutralidade carbónica até 2050. Este documento prevê uma redução de emissões de GEE entre 85% e 90% até 2050, face a 2005, com a compensação das restantes emissões através do sumidouro proporcionado pelas florestas e outros usos do solo. Este roteiro destaca também a importância da descarbonização de alguns setores da economia nacional, como a energia, a indústria, os transportes e a agricultura (Ministros, 2019).

Neste contexto, a quantificação da pegada de carbono assume um papel importante para apoiar as empresas na identificação das suas principais fontes de emissão e na definição de possíveis medidas de redução.

2.3 Conceito de Pegada de Carbono e Pegada de Carbono de Produtos

A Pegada de Carbono (PC) é atualmente uma das ferramentas mais utilizadas para quantificar as emissões de gases com efeito estufa associadas a uma atividade, produto, processo, organização ou serviço. Estas emissões são expressas normalmente em dióxido de carbono equivalente (CO_2eq), o que permite comparar gases diferentes numa unidade em comum. Embora o termo tenha ganhado popularidade e sido amplamente adotado, a sua definição tem sido objeto de debate e evolução, abrangendo desde as emissões diretas de CO_2 até à totalidade das emissões de GEE ao longo do ciclo de vida de um produto, processo, organização ou até mesmo de um indivíduo (Wiedmann & Minx, 2007).

A Pegada de Carbono de Produto (PCP) corresponde à quantificação das emissões de GEE associadas ao ciclo de vida de um determinado produto. De acordo com a ISO 14067, esta avaliação deve seguir princípios de Avaliação do Ciclo de Vida, incluindo a definição da unidade funcional, dos limites do sistema, dos dados de inventário e dos critérios de interpretação dos resultados (ISO 14067, 2018b). A conversão das emissões para CO₂eq é realizada através do Potencial de Aquecimento Global, ou Global Warming Potential (GWP), que compara a capacidade de aquecimento de cada gás relativamente ao CO₂ num determinado horizonte temporal. O horizonte de 100 anos é o mais utilizado em estudos de pegada de carbono, embora possam ser considerados outros períodos, como 20 anos, dependendo do objetivo da avaliação (IPCC, 2021; ISO 14067, 2018). Esta conversão é importante porque gases como o CH₄ e o N₂O têm efeitos climáticos diferentes do CO₂. A Tabela 1 apresenta os valores de GWP de alguns dos GEE mais relevantes, considerando um horizonte temporal de 100 anos, com base no IPCC (2021).

Gás	Fórmula Química	GWP (100 anos)
Dióxido de Carbono	CO ₂	1
Metano	CH ₄	27-30
Óxido Nitroso	N ₂ O	273
Hexafluoreto de Enxofre	SF ₆	23500

Tabela 1 - Potencial de Aquecimento Global (GWP) de alguns Gases com Efeito de Estufa (Horizonte de 100 anos). Adaptado de IPCC (2021).

A Pegada de Carbono de Produto (PCP) não se limita apenas à quantificação das emissões de gases com efeito de estufa associadas a um produto. A PCP permite também identificar os principais pontos críticos ou hotspots de emissão ao longo do ciclo de vida do produto, contribuindo para a implementação de estratégias de mitigação mais eficazes (Matthews et al., 2008; Finkbeiner et al., 2011).

2.4 Avaliação do Ciclo de Vida

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é uma metodologia utilizada para avaliar os impactes ambientais associados a um produto, processo ou serviço ao longo de todas as fases do seu ciclo de vida, desde a extração das matérias-primas (berço) até ao seu fim de vida (túmulo), incluindo todas as etapas intermédias de produção, transporte, utilização e fim de vida (ISO 14040, 2006). Esta abordagem permite analisar os impactes ambientais associados às diferentes etapas do sistema e evitar a transferência de impactes entre diferentes fases do ciclo de vida ou entre diferentes categorias de impacto ambiental (ALESSANDRA ZAMAGNI & BUONAMICI, 2011). A metodologia ACV é regulamentada pelas normas internacionais ISO 14040 e ISO 14044 que definem os seus princípios, estrutura, requisitos e orientações (ISO 14040, 2006; ISO 14044, 2006).

Segundo as normas ISO 14040 e ISO 14044, um estudo de ACV desenvolve-se em quatro fases principais, conforme representado na Figura 1:

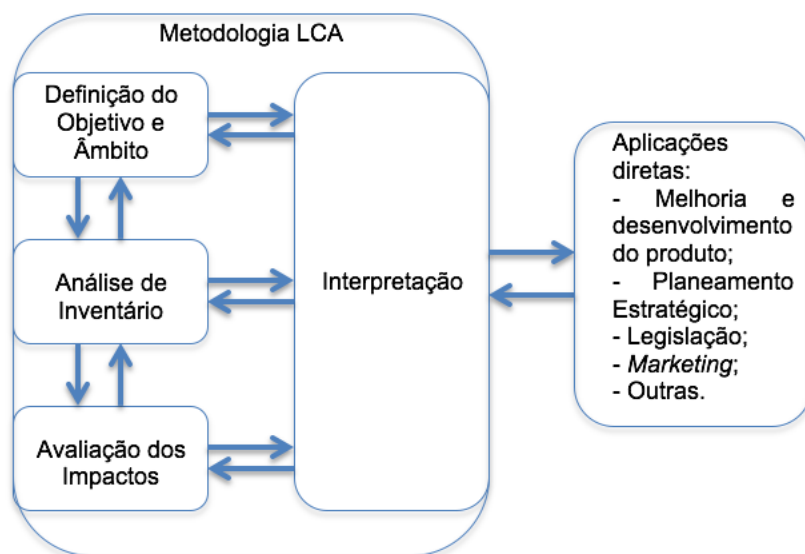


Figura 1 - Fases da Metodologia LCA (ACV) (adaptado de ISO 14040, 2006).

- a) **Definição do objetivo e âmbito** - corresponde à definição dos objetivos do estudo, unidade funcional, limites do sistema, pressupostos metodológicos e público-alvo dos resultados;
- b) **Análise de Inventário do Ciclo de Vida (LCI - Life Cycle Inventory)** - consiste na recolha e quantificação de todos os fluxos de entrada e saída associados ao

sistema em estudo, incluindo consumos de energia, matérias-primas, emissões atmosféricas, resíduos e efluentes;

- c) **Avaliação de Impactes do Ciclo de Vida (LCIA - Life Cycle Impact Assessment)** - fase onde os dados do inventário são convertidos em categorias de impacto ambiental, permitindo avaliar os efeitos potenciais associados ao sistema analisado, incluindo alterações climáticas, acidificação, eutrofização, entre outros;
- d) **Interpretação** - corresponde à análise crítica e interpretação dos resultados obtidos, permitindo identificar limitações, fontes de incerteza, hotspots ambientais e oportunidades de melhoria. Esta fase pode igualmente conduzir à reformulação ou aperfeiçoamento das etapas anteriores (ISO 14040, 2006; ISO 14044, 2006).

Apesar de se apoiar nos princípios da ACV, o presente relatório não corresponde a uma ACV completa com várias categorias de impacto ambiental. A análise foi direcionada para a categoria das alterações climáticas, expressa em kg CO₂eq, por estar diretamente relacionada com o objetivo do estágio: calcular e interpretar a pegada de carbono dos produtos analisados.

2.5 Limites do Sistema

A Definição dos limites do sistema é uma etapa central em estudos de ACV e de pegada de carbono. Esta delimitação determina quais etapas ou fases do ciclo de vida, processos, materiais e consumos que serão incluídos ou excluídos na análise. A escolha do limite do sistema influencia diretamente os resultados da ACV, e, conseqüentemente, interpretação da pegada de carbono do produto (ISO 14044, 2006). Existem diferentes abordagens para a delimitação do sistema, cada uma com as suas particularidades e adequação a diferentes objetivos de estudo, que podem ser visualizadas na Figura 2 e são detalhadas a seguir:

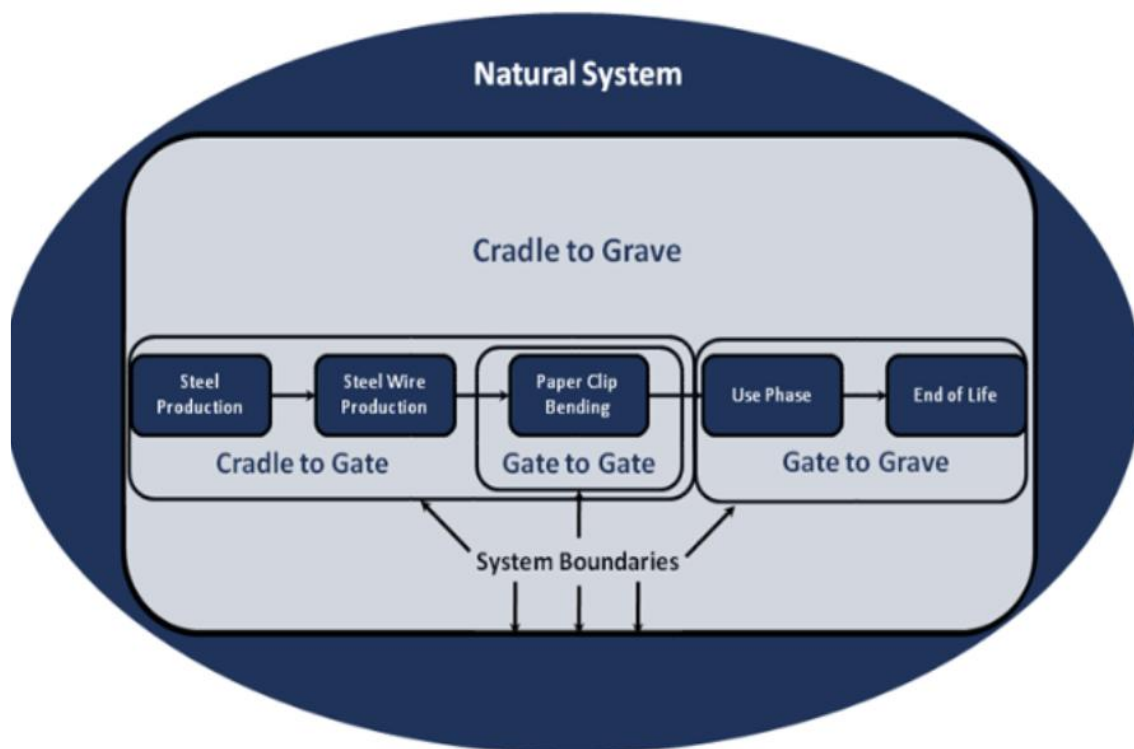


Figura 2 - Tipos de fronteira do sistema (Pinheiro, 2014).

- **Cradle-to-grave** (do berço ao túmulo): Esta é a abordagem mais abrangente, cobrindo todo o ciclo de vida do produto, desde a extração das matérias-primas, passando pela produção, transporte, fase de uso, até ao seu fim de vida (reciclagem, incineração ou aterro) (Blonk et al., 2008). Esta fronteira é ideal para uma avaliação mais completa dos impactes ambientais, mas exige uma vasta quantidade de dados e pode ser complexa de implementar, especialmente para produtos com ciclos de vida longos e complexos (Clift & Wright, 2011).
- **Cradle-to-gate** (do berço ao portão): Esta abordagem considera as etapas desde a extração das matérias-primas até à saída do produto da fábrica (*gate*) da unidade produtiva. Exclui, portanto, as fases de distribuição, uso e fim de vida (Blonk et al., 2008). Esta abordagem é frequentemente utilizada na avaliação de produtos intermédios e em estudos onde não existe disponibilidade de dados para as etapas posteriores do ciclo de vida (Schaltegger & Wagner, 2006).
- **Gate-to-gate** (do portão ao portão): Esta abordagem considera apenas as emissões de GEE associadas aos processos que ocorrem dentro de uma unidade de produção analisada, desde a entrada das matérias-primas na fábrica até à saída do produto (Jiménez-González et al., 2000). Segundo Karim et al. (2017), esta abordagem é particularmente útil para empresas que pretendem identificar os principais hotspots de emissão e implementar medidas de melhoria nos seus processos produtivos.

No presente estudo foi adotada uma abordagem cradle-to-gate, tendo em conta os objetivos do trabalho e a informação disponível para os diferentes casos de estudo. Esta abordagem é adequada quando se pretende estimar a pegada de carbono de um produto até à saída da fábrica, incluindo os impactos associados à produção dos principais materiais e inputs utilizados, mas excluindo as etapas posteriores, como distribuição, utilização e fim de vida (Blonk et al., 2008).

Desta forma, foram incluídos os materiais incorporados nos produtos, os consumos de energia, água, resíduos, fertilizantes, tintas, tecidos, vidro, alumínio, embalagens e outros componentes relevantes para cada caso de estudo. Esta opção permitiu calcular a pegada de carbono dos produtos até à saída da empresa.

Importa referir que esta abordagem não representa a pegada de carbono total dos produtos ao longo de todo o seu ciclo de vida, uma vez que exclui as fases de distribuição até ao consumidor, utilização, manutenção, lavagem, reparação e fim de vida. Esta limitação foi considerada na interpretação dos resultados do estudo (ISO 14044, 2006; ISO 14067, 2018).

2.6 Fatores de Emissão

Os fatores de emissão (FE) são coeficientes utilizados para converter dados de atividade como consumo de energia elétrica, consumo de água ou quantidade de material utilizado em GEE emitidas. De forma simplificada, o cálculo resulta da multiplicação entre o dado de atividade e o respetivo fator de emissão. A escolha destes fatores influencia diretamente o resultado final, uma vez que fatores demasiado genéricos ou pouco representativos podem aumentar a incerteza da pegada de carbono calculada (Pihkola et al., 2010).

Os fatores de emissão podem ter diferentes origens, incluindo bases de dados internacionais, relatórios governamentais, literatura científica ou medições experimentais (Pihkola et al., 2010). No presente estudo, os fatores de emissão foram obtidos principalmente através da base de dados Ecoinvent, complementada por dados provenientes de relatórios governamentais e da literatura científica. O Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) é uma das principais referências internacionais para o desenvolvimento de metodologias para inventários nacionais de GEE, e as suas diretrizes são a base para muitos fatores de emissão utilizados em estudos de pegada de carbono (IPCC, 2006).

A escolha dos fatores de emissão deve considerar o contexto geográfico, tecnológico e operacional do sistema analisado, de forma a garantir maior representatividade dos resultados obtidos. Silva (2024) destaca que a seleção das bases de dados e fatores de emissão pode influenciar significativamente os resultados da avaliação da pegada carbónica de produtos, sobretudo em estudos desenvolvidos com fronteiras simplificadas ou com elevada dependência de dados secundários.

2.7 Metodologias de Avaliação da Pegada de Carbono

A quantificação da pegada de carbono pode apoiar-se em diferentes metodologias, normas internacionais e protocolos. Entre as metodologias mais utilizadas destacam-se a ISO 14067 direcionada para a pegada de carbono de produtos, Greenhouse Gas (GHG) Protocol utilizado maioritariamente para contabilização e reporte das emissões e as diretrizes do Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) aplicadas sobretudo no desenvolvimento de inventários de GEE e fatores de emissão.

A norma ISO 14067:2018 (Greenhouse gases - Carbon footprint of products - Requirements and guidelines for quantification) estabelece os princípios, requisitos e orientações para a quantificação da pegada de carbono de produtos (PCP), expressa em CO₂eq. Esta norma baseia-se nos princípios da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) definidos nas normas ISO 14040 e ISO 14044, garantindo uma abordagem sistemática para a avaliação das emissões associadas ao ciclo de vida dos produtos (ISO 14067, 2018; ISO 14040, 2006; ISO 14044, 2006).

O GHG Protocol, desenvolvido pelo World Resources Institute (WRI) e pelo World Business Council for Sustainable Development (WBCSD), oferece um conjunto de padrões para a contabilidade e relato de emissões de GEE, tanto a nível corporativo como de produto. O Product Life Cycle Accounting and Reporting Standard do GHG Protocol é particularmente relevante para a avaliação da pegada de carbono de produtos, fornecendo orientações detalhadas para a definição de limites do sistema, recolha de dados e cálculo de emissões. (Protocol, n.d.)

O IPCC foi criado em 1988 pela Organização Meteorológica Mundial (OMM) e pelo Programa das Nações Unidas para o Ambiente (PNUMA), com o objetivo de fornecer informação científica que apoie o desenvolvimento de políticas relacionadas com as alterações climáticas (IPCC, 2023). O trabalho do IPCC encontra-se organizado em três grupos principais: o Grupo I, relacionado com as bases físicas das alterações climáticas;

o Grupo II, focado nos impactos, adaptação e vulnerabilidade; e o Grupo III, dedicado às estratégias de mitigação das emissões de gases com efeito de estufa (IPCC, 2023).

As diretrizes do IPCC constituem uma referência fundamental para o desenvolvimento de inventários de emissões de gases com efeito de estufa, sendo amplamente utilizadas na determinação de fatores de emissão e na avaliação da pegada de carbono em diferentes setores de atividade (IPCC, 2006).

A escolha entre estas metodologias pode influenciar os resultados, apesar todas terem como objetivo apoiar a quantificação as emissões de GEE. Um estudo de Garcia e Freire (2014) comparou a aplicação da ISO/TS 14067 (versão anterior da ISO 14067), do GHG Protocol e de outras metodologias para avaliação da pegada de carbono de painéis de partículas em Portugal. Os autores concluíram que diferenças metodológicas, nomeadamente ao nível dos limites do sistema, critérios de alocação e tratamento do carbono biogénico, podem influenciar os resultados da pegada de carbono.

2.8 Importância da Pegada de Carbono nas Empresas

O enquadramento regulatório europeu tem vindo a reforçar a necessidade de as empresas quantificarem e divulgarem as suas emissões de GEE. A Corporate Sustainability Reporting Directive (CSRD) introduziu requisitos mais exigentes de reporte de sustentabilidade, procurando aumentar a transparência da informação ambiental, social e de governação divulgada pelas empresas. Contudo, o seu âmbito de aplicação foi posteriormente objeto de alterações no âmbito do Pacote Omnibus, que simplificou alguns requisitos e reduziu o número de empresas diretamente abrangidas (European Commission, 2022).

Para complementar a diretiva CSRD, foram desenvolvidas as European Sustainability Reporting Standards (ESRS), que definem os critérios técnicos e indicadores específicos a utilizar no reporte de sustentabilidade. No domínio climático destaca-se a norma ESRS E1 - Climate Change, que estabelece requisitos específicos para divulgação de emissões Scope 1, Scope 2 e Scope 3, estratégias de mitigação climática e metas de redução de emissões (EFRAG, 2023).

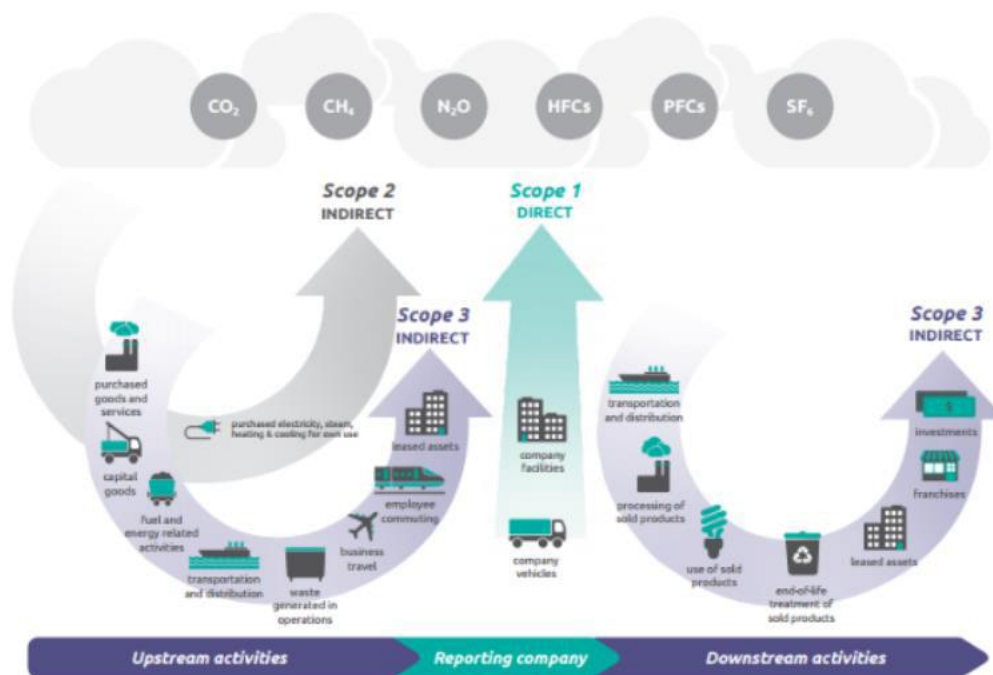


Figura 3 Representação das emissões Scope 1, Scope 2 e Scope 3 ao longo da cadeia de valor. (Adaptado do GHG Protocol (WRI & WBCSD, 2004))

Assim, o cálculo da pegada de carbono tem vindo a ganhar importância nas empresas, não apenas devido às exigências legais, mas também porque permite identificar quais os processos, produtos ou serviços mais intensivos em carbono, apoiar estratégias de descarbonização e melhorar a gestão ambiental das organizações.

Contudo, a implementação destas metodologias em pequenas e médias empresas (PMEs) pode ser limitada pela dificuldade de acesso aos dados completos da empresa e pela reduzida disponibilidade recursos técnicos e financeiros. Esta limitação foi observada durante o desenvolvimento dos casos de estudo, uma vez que nem sempre existiam dados separados por produto, informação detalhada sobre o destino dos resíduos ou fatores de emissão específicos para todos os materiais. Nestes casos, foi necessário recorrer a pressupostos, alocações e fatores médios.

Recentemente a União Europeia publicou o Pacote Omnibus, introduzindo alterações ao enquadramento regulamentar associado à sustentabilidade, nomeadamente à CSRD, ao Regulamento da Taxonomia e à Diretiva de Due Diligence de Sustentabilidade Corporativa. Segundo a PwC Portugal (2026), estas alterações têm como objetivo reduzir a complexidade e os custos de reporte para as empresas, alinhar os requisitos existentes e proteger as PME de exigências desproporcionais. No caso da CSRD, o âmbito de aplicação passou a abranger sobretudo entidades com mais de

1.000 trabalhadores e volume de negócios líquido superior a 450 milhões de euros. Apesar desta simplificação, a divulgação de informação de sustentabilidade continua a ser relevante, uma vez que muitas empresas poderão continuar a receber pedidos de informação ambiental por parte de clientes, fornecedores ou parceiros inseridos em cadeias de valor mais exigentes.

Assim, abordagens simplificadas, como cradle-to-gate, tornam-se alternativas mais viáveis para o cálculo da pegada de carbono em contexto empresarial, uma vez que permite estimar a pegada de carbono dos produtos até à saída da empresa, de acordo com os dados disponíveis.

3. Metodologia Geral do Estudo

3.1 Abordagem metodológica

O presente estudo baseou-se numa abordagem de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) simplificada, utilizando uma fronteira cradle-to-gate para a quantificação da pegada de carbono dos produtos analisados. Esta abordagem permitiu considerar não só as emissões associadas aos materiais e entradas utilizados, mas também as emissões resultantes dos consumos e processos realizados dentro das empresas estudadas, até à saída do produto.

Para cada caso de estudo, foram definidos a fronteira do sistema, a unidade funcional e elaborado um inventário das entradas e saídas. Esta organização permitiu adaptar a mesma lógica metodológica as realidades produtivas diferentes, nomeadamente na horticultura, indústria gráfica, setor têxtil e caixilharia. Apesar de a estrutura de cálculo ser comum, os fluxos considerados variaram consoante o produto e a informação disponibilizada por cada empresa.

A quantificação das emissões de gases com efeito de estufa foi realizada através da relação entre os dados de atividade e os respetivos fatores de emissão. A fórmula geral utilizada para o cálculo das emissões foi a seguinte:

$$E_i = DA_i \times FE_i$$

Onde:

- E_i – corresponde às emissões de gases com efeito de estufa expressas em kg CO₂eq;
- DA_i – representa os dados de atividade;
- FE_i – corresponde ao fator de emissão associado à atividade considerada.

A Pegada de Carbono do Produto (PCP) foi determinada através da soma das emissões associadas aos diferentes fluxos ou etapas consideradas dentro da fronteira do sistema definida para cada caso de estudo.

$$PCP = \sum_{i=1}^n E_i = \sum_{i=1}^n (DA_i \times FE_i)$$

Onde:

- PCP – representa a Pegada de Carbono do Produto, em kg CO₂eq;

- DA_i – corresponde ao dado de atividade associado ao processo i ;
- FE_i – representa o fator de emissão associado ao processo i ;
- n – corresponde ao número total de processos ou fontes de emissão consideradas no estudo.

As emissões quantificadas individualmente por gás foram convertidas em dióxido de carbono equivalente através da aplicação dos Potenciais de Aquecimento Global para um horizonte temporal de 100 anos (GWP_{100}), conforme recomendado pelo WRI e WBCSD (2011, pp. 86 e 89). A metodologia específica aplicada às emissões de N_2O é apresentada no caso de estudo Oliveira & Fontes.

Os cálculos foram realizados em Microsoft Excel, o que permitiu organizar os dados recolhidos, aplicar os fatores de emissão e calcular a pegada de carbono dos produtos analisados. Os cálculos seguiram os princípios metodológicos definidos pelas normas ISO 14040, ISO 14044 e ISO 14067.

3.2 Recolha e Tratamento de Dados

A recolha de dados foi uma etapa fundamental e foi realizada diretamente junto das empresas envolvidas em cada caso de estudo, através de entrevistas com os responsáveis pela gestão, consulta de registos de produção, faturas de consumo (eletricidade, água, combustíveis) e fichas técnicas de matérias-primas e informação disponibilizada pelos fornecedores. A informação recolhida variou entre os casos, porque cada empresa tinha níveis diferentes de detalhe e organização dos dados. Por esse motivo, foi necessário adaptar o tratamento da informação a cada produto analisado. As informações recolhidas incluiu:

- Dados de Atividade: Consumo anual de eletricidade (kWh), consumo de combustíveis (litros/m³), quantidade de matérias-primas utilizadas (kg, litros), produção anual de produtos (kg, unidades, m²), geração de resíduos (kg).
- Dados Específicos do Processo: Informações sobre os equipamentos utilizados, tempos de operação, eficiências de processo e tecnologias empregadas.

Os dados foram organizados e tratados em Microsoft Excel, sendo posteriormente convertidos para a unidade funcional definida em cada caso de estudo. Os dados em falta ou inconsistentes foram estimados com base em valores médios da indústria, literatura científica e informação disponibilizada pelos fornecedores.

Os fatores de emissão utilizados para converter os dados de atividade em emissões de gases com efeito de estufa (GEE) foram obtidos a partir de bases de dados e referências técnicas reconhecidas internacionalmente, nomeadamente Ecoinvent, SimaPro e IPCC, bem como de entidades nacionais, como a Agência Portuguesa do Ambiente (APA). Foram utilizados fatores específicos para cada tipo de consumo ou matéria-prima analisada, incluindo eletricidade, alumínio, papel, fertilizantes e combustíveis.

Para as emissões de N_2O do solo foram consideradas as orientações do IPCC (2006; AR6), enquanto o fator de emissão da eletricidade da rede nacional foi obtido através de dados disponibilizados pela Agência Portuguesa do Ambiente. Sempre que não existiam dados específicos disponíveis, recorreu-se à literatura científica e outras fontes técnicas complementares como teses académicas.

Todos os cálculos foram realizados em Microsoft Excel, utilizado para organizar os dados de atividade, aplicar os fatores de emissão e calcular a pegada de carbono dos diferentes produtos analisados e analisar os principais contributos para as emissões de gases com efeito de estufa.

3.3 Pressupostos e Limitações

A quantificação da pegada de carbono envolve um conjunto de pressupostos e limitações associados à disponibilidade de dados, aos fatores de emissão utilizados e à delimitação do estudo. Para a correta interpretação dos resultados, é importante identificar estes aspetos (Corda, 2021).

Os principais pressupostos gerais adotados neste estudo incluem:

- Limite do sistema cradle-to-gate: O estudo considera apenas os impactos associados à produção das principais matérias-primas e inputs utilizados, as emissões associadas aos consumos e os processos realizados dentro das empresas estudadas.
- Fatores de Emissão: Assumiu-se que os fatores de emissão utilizados são representativos das tecnologias e condições de produção relevantes para cada input e output no contexto português ou europeu.
- Dados de Atividade: considerou-se que os dados de consumo e produção fornecidos pelas empresas são representativos do período de estudo.

- Alocação: nos casos em que os dados disponíveis correspondiam ao consumo total da instalação e não ao produto específico analisado, foi aplicada uma alocação proporcional com base na produção.

As limitações inerentes à metodologia e aos dados incluem:

- Disponibilidade de dados específicos em algumas empresas;
Complexidade dos processos: Em alguns casos foi necessário simplificar determinados processos devido à falta de informação disponível.
- Período analisado: Os dados utilizados correspondem apenas ao período em estudo, podendo existir variações noutros anos.
- Limites do sistema: O sistema definido não inclui as fases de distribuição, utilização, manutenção, lavagem, reparação e fim de vida dos produtos. Por este motivo, os resultados obtidos não representam a pegada de carbono total do ciclo de vida.

Assim, os resultados obtidos no cálculo, representam apenas uma estimativa parcial da pegada de carbono dos produtos até à saída da empresa e não corresponde à pegada de carbono total ao longo de todo o ciclo de vida.

4. Casos de Estudo

4.1 Caso de Estudo I: Oliveira & Fontes (Couve Penca)

4.1.1 Caracterização do sistema Produtivo

O primeiro caso de estudo incide sobre a empresa Oliveira & Fontes, Lda., uma exploração hortícola localizada no concelho da Póvoa de Varzim, com produção na zona da Estela, em Portugal. A empresa desenvolve atividade no setor da horticultura e conta com cerca de 10 colaboradores. O produto analisado foi a couve Penca (*Brassica oleracea var. costata*), produzida em sistema agrícola convencional. A produção analisada corresponde a um ciclo produtivo típico desta cultura, incluindo operações de preparação do solo, fertilização, aplicação de pesticidas, rega e operações mecanizadas associadas à produção.

A unidade funcional principal considerada foi 1 hectare de couve penca produzida, considerando o conjunto das duas culturas realizadas ao longo do ano, verão e inverno. A produção total considerada foi de 30 toneladas por hectare, valor fornecido pelo horticultor. A fronteira do sistema foi definida segundo uma abordagem cradle-to-gate, considerando as principais entradas na horticultura e as operações realizadas na exploração agrícola até obtenção do couve penca. Foram considerados fertilizantes, produtos fitofarmacêuticos, consumo de energia, combustível e emissões diretas de N_2O do solo. Não foram incluídas etapas posteriores, como armazenamento, distribuição, comercialização, consumo e fim de vida do produto.

Foram utilizados fatores de emissão provenientes de fontes reconhecidas, nomeadamente IPCC para as emissões de N_2O do solo, APA para eletricidade, literatura científica para fertilizantes, pesticidas e combustíveis, e teses académicas como fontes complementares.



Figura 4 - Imagem ilustrativo de couve penca analisada no caso de estudo. (Fonte: Greenhouse.pt)

4.1.2 Inventário de Dados do Produto

O inventário do ciclo de vida (ICV) foi construído com base em dados primários da exploração, fornecidos pelo produtor e complementado com dados secundários provenientes da literatura. As principais entradas consideradas na fronteira cradle-to-gate encontram-se apresentadas na tabela 2.

Categoria	Dados considerados	Quantidade	Unidade	Observação
Fertilizantes orgânicos	estrume/composto orgânico	25	t/ha	Aplicação ao solo
Fertilizantes mineral	NPK 20-5-10	500	kg/ha	-
Produtos fitofarmacêuticos	Butisan	1,2	L/ha	Herbicida
	Benevia	1	L/ha	Inseticida
	Costar	500	g/ha	Inseticida biológico
	Septum	3	L/ha	Fungicida biológico
	Fungisei	3	L/ha	Fungicida biológico
Energia	Eletricidade associada à rega	640	kWh/ha	4 × 5 × 32

Combustível	Gasóleo utilizado nas operações mecanizadas	8	L/ha	-
Produção	Couve penca	30	t/ha	-

Tabela 2 - Principais fluxos considerados no inventário do ciclo de vida

4.1.3 Metodologia de Cálculo da Pegada de Carbono

Para o presente caso de estudo agrícola, foram consideradas metodologias específicas associadas às emissões provenientes da fertilização do solo e utilização de produtos agrícolas, de acordo com as orientações do IPCC para o setor AFOLU (Agriculture, Forestry and Other Land Use).

As emissões associadas aos fertilizantes azotados incluem emissões diretas de óxido nitroso (N_2O) provenientes do solo, foram calculadas conforme as diretrizes do IPCC para o setor Agriculture, Forestry and Other Land Use (AFOLU).

Foi utilizada a metodologia Tier 1 do IPCC para estimar as emissões de N_2O associado à aplicação de fertilizantes azotados no solo. Esta metodologia utiliza um fator de emissão padrão internacional, assumindo que aproximadamente 1% do azoto aplicado é emitido sob a forma de N_2O -N devido aos processos microbiológicos naturais do solo, nomeadamente nitrificação e desnitrificação.

A utilização desta abordagem foi considerada adequada para este caso de estudo, uma vez que não existiam dados específicos da exploração agrícola que permitissem utilizar métodos mais detalhados de cálculo das emissões como o Tier 2 e Tier 3 exigem dados detalhados sobre características do solo, temperatura, humidade, práticas de gestão agrícola e medições locais de emissões.

Segundo o IPCC (2006), as emissões diretas de N_2O podem ser estimadas através da seguinte expressão:

$$E_{N_2O} = N_{\text{aplicado}} \times FE_1 \times \frac{44}{28}$$

onde:

- N_2O — Corresponde à massa de óxido nitroso emitida;

- N_{aplicado} — corresponde à quantidade de azoto aplicada ao solo;
- FE_1 — corresponde ao fator de emissão Tier 1 do IPCC (1%), igual a 0,01 kg de N_2O -N por kg de N aplicado;
- $\frac{44}{28}$ — corresponde ao fator de conversão de N_2O -N para N_2O .

Posteriormente, as emissões de N_2O foram convertidas em dióxido de carbono equivalente (CO_2eq) segundo o procedimento apresentado pelo WRI e WBCSD (2011, p. 89), utilizando o Potencial de Aquecimento Global (GWP_{100}) do N_2O definido pelo IPCC AR6 (IPCC, 2021):

$$E_{CO_2eq,N_2O} = E_{N_2O} \times GWP_{100,N_2O}$$

No presente estudo, foi utilizado um valor de GWP_{100} igual a 273 para o N_2O .

Assim, a metodologia Tier 1 permitiu estimar as emissões de forma consistente com as recomendações do IPCC, garantindo simultaneamente comparabilidade com outros estudos de pegada de carbono aplicados ao setor agrícola.

No caso dos pesticidas, as doses dos produtos comerciais foram convertidas em quilogramas de substância ativa por hectare (kg a.i./ha) com base nas declaradas em rótulos ou fichas técnicas do produto, uma vez que as emissões associadas à produção dos pesticidas estão diretamente relacionado da quantidade de substância ativa utilizada e não com o volume do produto formulado (FAO, 2019).

Na ausência de fatores de emissão específicos para cada substância ativa, foi utilizado um fator médio de 25,5 kg CO_2eq /kg de substância ativa, conforme recomendado por Audsley et al. (2009) em estudos de Avaliação do Ciclo de Vida aplicados à agricultura.

4.1.4 Análise Laboratorial da Biomassa e Sequestro de Carbono

Foi realizada uma análise laboratorial da composição das Pencas Poveiras para determinar a fração de biomassa seca e estimar o potencial de sequestro de carbono associado a biomassa residual. Os resultados da análise encontram-se na seguinte tabela 3.

Amostra	Massa Fresca (g)	Massa Seca (g)	% Massa Seca
Penca 1	661,27	39,60	5,988 %

Penca 2	725,09	37,32	5,147 %
Penca 3	854,36	48,20	5,642 %
Penca 4	467,73	25,34	5,418 %
Média	677,11	37,62	5,55 %

Tabela 3 - Resultados da análise laboratorial da biomassa seca das pencas

Os resultados da análise das pencas demonstram que a biomassa real representa apenas 5,55% da massa total da planta, sendo os restantes 94,45% constituídos por água. Este dado é fundamental para o ajuste do cálculo da pegada carbónica, uma vez que o sequestro de carbono ocorre apenas na fração seca (biomassa).

Segundo Larcher (2003), a matéria seca das plantas é constituída maioritariamente por compostos orgânicos ricos em carbono, como celulose, hemicelulose e lignina. Assim, é comum assumir que aproximadamente 50% da biomassa seca vegetal corresponde a carbono fixado através da fotossíntese.

Contudo, nem todo o carbono presente na biomassa permanece armazenado no solo após a decomposição dos resíduos vegetais. Parte significativa deste carbono regressa à atmosfera sob a forma de CO₂ devido aos processos microbiológicos de decomposição da matéria orgânica.

Desta forma, foi considerado que aproximadamente 33% do carbono presente na biomassa residual permanece estabilizado no solo após os processos de decomposição e humificação, com base nos coeficientes utilizados por Smith et al. (2004) em estudos relacionados com o sequestro de carbono em solos agrícolas.

Smith et al. (2004) demonstram que apenas uma fração do carbono incorporado nos resíduos das culturas contribui para o aumento do carbono orgânico estável no solo, dependendo de fatores como clima, tipo de solo, práticas agrícolas e características da biomassa vegetal. Os autores reportaram valores médios de taxa de estabilização de carbono próximos de 30–35% em sistemas agrícolas temperados.

4.1.5 Resultados

O cálculo das emissões permitiu estimar a pegada de carbono total da produção da cultura analisada. A pegada de carbono total da couve penca foi de aproximadamente 1444,26 kg CO₂eq/ha.

Considerando a produção total indicada pelo produtor, correspondente a 30 000 kg/ha, este valor equivale a aproximadamente 0,048 kg CO₂eq/kg, ou 48,14 g CO₂eq/kg de couve penca produzida. A análise dos contributos individuais mostrou que a principal fonte de emissão foi a libertação de N₂O associado à aplicação de fertilizantes azotados, responsável por cerca de 48% da pegada total. A utilização de fertilizantes minerais representou cerca de 16%, enquanto o uso de composto/estrume e o consumo de combustível nas operações mecanizadas contribuíram com cerca de 14% cada.

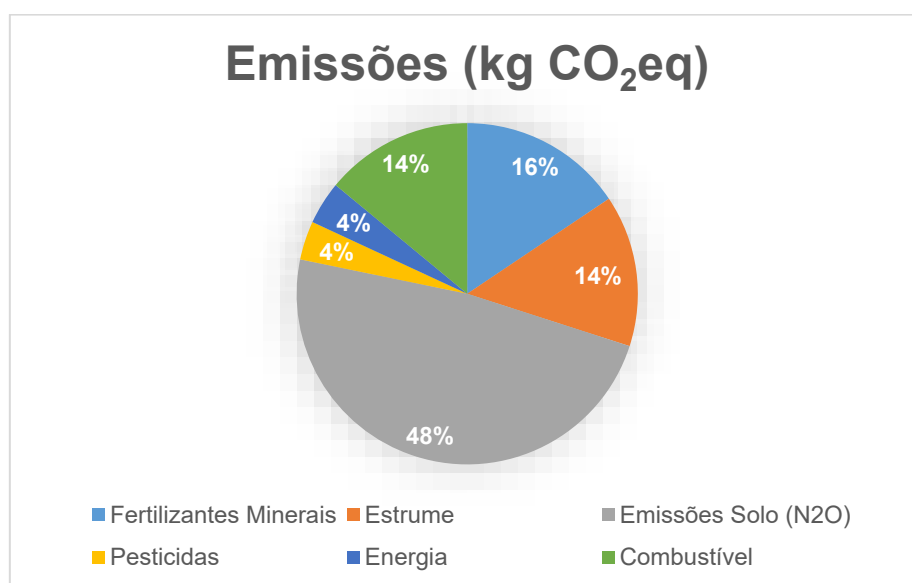


Figura 5 - Distribuição das emissões de gases com efeito de estufa por categoria na produção de couve penca

Os resultados demonstram que quase metade das emissões totais está associada às emissões de N₂O, provenientes da aplicação de fertilizantes azotados no solo.

Por outro lado, os consumos energéticos associados à eletricidade e restantes operações mecanizadas apresentaram contributos relativamente reduzidos no contexto global do sistema produtivo.

A análise laboratorial da biomassa permitiu estimar o potencial de sequestro de carbono associado à incorporação da biomassa residual no solo.

Os cálculos efetuados indicam um sequestro total de aproximadamente 507,8 kg CO₂eq/há, e este valor corresponde a 16,9 g CO₂eq/kg de couve penca.

A inclusão do sequestro de carbono permitiu reduzir a pegada de carbono do sistema de:

- 48,1 g CO₂eq/kg (pegada bruta) para 31,2 g CO₂eq/kg (pegada líquida)

A tabela 4 apresenta a comparação entre a pegada bruta e a pegada líquida após consideração do sequestro de carbono.

Indicador	Valor
Pegada bruta	48,1 g CO ₂ eq/kg
Carbono sequestrado	16,9 g CO ₂ eq/kg
Pegada líquida	31,2 g CO ₂ eq/kg

Tabela 4 - Comparação entre a pegada de carbono bruta e a pegada líquida da couve penca após consideração do sequestro de carbono.

Os resultados demonstram que o sequestro de carbono associado à biomassa residual permitiu compensar aproximadamente 35% das emissões totais do sistema agrícola.

4.1.6 Discussão

A pegada de carbono estimada no presente estudo para a produção de couve penca foi de aproximadamente 0,048 kg CO₂eq por kg de couve penca, correspondente a cerca de 48,14 g CO₂eq/kg de couve penca produzida. Após a consideração do sequestro de carbono associado à biomassa residual incorporada no solo, a pegada líquida estimada reduziu para 31,2 g CO₂eq/kg. Estes valores devem ser interpretados tendo em conta a fronteira cradle-to-gate adotada, que considera os principais as entradas da produção agrícola e as operações realizadas na mesma, mas não inclui etapas posteriores como distribuição, comercialização, consumo ou fim de vida.

Em comparação com estudos disponíveis na literatura, os valores de pegada de carbono para a produção de couve ou hortícolas semelhantes são geralmente superiores aos valores obtidos neste trabalho. Jensen et al. (2024), num estudo realizado na Dinamarca sobre sistemas hortícolas em campo aberto, estimaram uma pegada de carbono próxima de 0,196 kg CO₂eq/kg para produção de couve (*cabbage*). O estudo incluiu a produção de fertilizantes, transporte de insumos e emissões agrícolas, identificando a fertilização azotada como um dos principais contributos para o impacto climático.

Em um outro estudo realizado na Malásia sobre sistemas agrícolas certificados segundo o referencial MyGAP, Jumat et al. (2024) reportaram valores próximos de 0,38 kg CO₂eq/kg de couve. Os autores incluíram em seu estudo operações pós-colheita, armazenamento, transporte e utilização de fertilizantes químicos, concluindo que os combustíveis fósseis e a fertilização constituíam os principais hotspots ambientais do sistema.

A variação entre os resultados pode estar relacionada com vários fatores, nomeadamente a produtividade considerada, as práticas de fertilização, os fatores de emissão utilizados, as condições climáticas, os dados de atividade disponíveis e as etapas efetivamente incluídas em cada análise.

O valor reduzido obtido neste estudo pode estar relacionado com vários fatores, incluindo a produção considerada de 30 t/ha, os fatores de emissão utilizados e as etapas incluídas na análise. Como a pegada foi expressa por quilograma de couve penca, uma produção elevada faz com que as emissões totais sejam divididas por uma maior quantidade de produto. Além disso, o estudo não incluiu etapas posteriores, como distribuição, comercialização, consumo e fim de vida.

Os resultados demonstraram também que a principal contribuição do sistema corresponde às emissões de N₂O associado à fertilização azotada, responsáveis por aproximadamente 48% da pegada total.

Menegat, Ledo e Tirado (2022) estimaram que a produção e utilização global de fertilizantes sintéticos azotados geraram aproximadamente 1,13 Gt CO₂eq por ano, correspondendo a cerca de 2,1% das emissões globais de gases com efeito de estufa. Os autores demonstram ainda que cerca de 63% destas emissões resultam diretamente da aplicação do azoto no solo, sobretudo devido à libertação de N₂O durante os processos microbiológicos de nitrificação e desnitrificação.

De igual modo, Brentrup et al. (2004), num estudo de Avaliação do Ciclo de Vida aplicado à produção de trigo de inverno na Alemanha, verificaram que os fertilizantes azotados foram responsáveis por mais de 50% do impacto associado à categoria de alterações climáticas no sistema agrícola analisado. Os autores concluíram ainda que as emissões relacionadas com o azoto apresentaram contributos significativos para outras categorias ambientais, nomeadamente acidificação e eutrofização, reforçando assim o papel crítico da gestão do azoto na sustentabilidade agrícola.

Embora o presente estudo incida sobre uma cultura hortícola e o trabalho de Brentrup et al. (2004) tenha sido desenvolvido em sistemas cerealíferos, ambos evidenciam o

papel central do azoto como principal fator de emissão em sistemas agrícolas convencionais.

O resultado mais relevante do presente estudo correspondeu ao impacto do sequestro de carbono associado à biomassa residual. O cálculo realizado demonstrou que a incorporação da biomassa no solo permitiu compensar aproximadamente 16,9 g CO₂eq/kg de couve penca, reduzindo a pegada líquida da couve penca em cerca de 35%.

A análise laboratorial da biomassa revelou igualmente um aspeto importante do estudo. Verificou-se que apenas cerca de 5,55% da massa total da couve corresponde à biomassa seca, sendo a restante fração constituída maioritariamente por água. Este resultado demonstra que a utilização de valores genéricos da literatura poderia conduzir a uma sobrestimação significativa do potencial de sequestro de carbono.

Desta forma, a realização da análise laboratorial permitiu aumentar a representatividade e a qualidade do cálculo efetuado.

4.2. Caso de Estudo II: RCM — Etiquetas

4.2.1. Descrição da Empresa e do Produto

A RCM Etiquetas — Rodrigo Castro Moça Impressão de Etiquetas, Lda, é uma empresa portuguesa especializada na produção de rótulos e etiquetas autoadesivas para diferentes setores industriais, nomeadamente vitivinícola, alimentar, cosmético e químico. Fundada em 1989 e sediada na Zona Industrial de Amorim, na Póvoa de Varzim, a empresa destaca-se pela aposta na inovação tecnológica, qualidade de impressão e flexibilidade produtiva. A empresa possui certificações associadas à gestão da qualidade e à cadeia de responsabilidade florestal, nomeadamente ISO 9001 e FSC, o que demonstra preocupação com a organização dos processos e com a rastreabilidade de alguns materiais utilizados.

O produto analisado corresponde ao rótulo Silk & Spice White Rt, sendo definida como unidade funcional 1 milheiro de rótulos produzidos.



Figura 6 - Rótulo Silk & Spice White Rt. analisado no caso de estudo da RCM Etiquetas. Fonte: RCM Etiquetas.

Mantendo a abordagem metodológica definida no Capítulo 3, este caso de estudo seguiu uma abordagem cradle-to-gate, considerando os principais materiais utilizados na produção do rótulo, os consumos associados ao processo produtivo e os resíduos gerados até à saída do produto da empresa. A quantificação das emissões de gases com efeito de estufa (GEE) baseia-se nos referenciais metodológicos do IPCC (2006) e do GHG Protocol (2004), que estabelecem a relação entre dados de atividade e fatores de emissão.

4.2.2. Inventário de Dados do Produto

As principais entradas consideradas no inventário correspondem aos materiais utilizados na produção do rótulo e aos consumos associados ao processo produtivo, nomeadamente substrato, tintas, energia elétrica e água. As principais saídas incluem o produto final e os resíduos gerados durante o processo, sobretudo resíduos industriais associados à impressão e ao tratamento de materiais contaminados. As principais categorias consideradas no inventário encontram-se apresentadas na Tabela 5.

Categoria	Dados considerados	Quantidade	Unidade	Observação
Unidade Funcional	Rótulo Silk & Spice White Rt	1000	rótulos	Unidade funcional
Produção	Rótulos Silk & Spice White Rt. impressos	335	rótulos	Dados fornecidos pela empresa

	no período analisado			
Matéria-prima principal	Substrato	14,022	m ² /milheiro	Área do substrato por milheiro
Materiais auxiliares	Tinta amarela	0,0075	Kg/milheiro	Consumo por milheiro
	Tinta ciano	0,00325	Kg/milheiro	Consumo por milheiro
	Tinta magenta	0,00325	Kg/milheiro	Consumo por milheiro
	Tinta preta	0,002	Kg/milheiro	Consumo por milheiro
	Tinta vermelha	0,001	Kg/milheiro	Consumo por milheiro
	Tinta castanha	0,001	Kg/milheiro	Consumo por milheiro
Energia	Eletricidade consumida durante a produção do rótulo	18	KWh/milheiro	Energia alocado ao produto
Água	Consumo indireto ao processo produtivo	45,42	m ³ /mês	Valor mensal posteriormente alocado ao produto
Resíduos industriais	Resíduos de tintas, banhos de revelação, embalagens contaminadas, absorventes e EPIs contaminados	0,01065	t/milheiro	-

Tabela 5 - Principais categorias consideradas no inventário do rótulo Silk & Spice White Rt.

A ausência de informação sobre o destino final destes resíduos implicou a utilização de fatores de emissão médios nacionais, conforme recomendado pelo IPCC (2006). Os

consumos que não estavam disponíveis diretamente por milheiro foram alocados ao produto analisado com base na produção considerada.

4.2.3. Metodologia de Cálculo

A quantificação das emissões de gases com efeito de estufa (GEE) foi realizada com base na relação entre dados de atividade e fatores de emissão, de acordo com os princípios metodológicos definidos pelo IPCC (2006) e pelo GHG Protocol (2004).

Os dados de atividade incluíram consumos de eletricidade, água, substrato, tintas e produção de resíduos associados ao fabrico dos rótulos. Os fatores de emissão utilizados foram obtidos a partir de fontes nacionais e literatura técnica reconhecida.

O fator de emissão da eletricidade foi obtido a partir de dados disponibilizados pela Agência Portuguesa do Ambiente (APA, 2024), sendo utilizado o valor de 0,092 kg CO₂e/kWh. Para o consumo de água, o fator de emissão foi determinado com base nas emissões associadas ao tratamento de águas residuais em Portugal, através da relação entre emissões totais do setor e volume total de águas tratadas reportado pelo Instituto Nacional de Estatística (INE, 2023), obtendo-se o valor de 1,906 kg CO₂e/m³.

Relativamente aos resíduos, a empresa não dispunha de informação detalhada sobre o destino final dos resíduos gerados pela empresa. Assim, foi utilizado um fator de emissão médio nacional, representativo das diferentes formas de tratamento existentes em Portugal, incluindo a deposição em aterro, incineração e reciclagem. Os dados utilizados foram obtidos a partir do Inventário Nacional de Emissões e do Relatório do Estado do Ambiente (APA, 2024).

A utilização destes fatores permitiu estimar as emissões associadas ao sistema produtivo analisado, apesar das limitações relacionadas com a disponibilidade de informação específica. Embora esta abordagem permitiu estimar as emissões associadas aos resíduos, constitui também uma das principais fontes de incerteza do estudo, uma vez que diferentes destinos de tratamento podem apresentar emissões muito distintas.

Em alguns fluxos do sistema, como água e resíduos, não foi possível obter dados específicos para o produto analisado. Nestes casos, foi necessário proceder à alocação dos consumos totais da instalação ao produto em estudo. A alocação foi realizada com

base na produção, seguindo as recomendações da ISO 14044 (2006), que privilegia critérios físicos sempre que não seja possível a separação direta dos fluxos.

O fator de alocação foi calculado através da seguinte relação:

$$\text{Fator de Alocação} = \frac{\text{Produção Específica}}{\text{Produção Total}}$$

Posteriormente, os fluxos atribuídos ao produto foram determinados por:

$$\text{Fluxo Alocado} = \text{Fluxo Total} \times \text{Fator de Alocação}$$

4.2.4. Resultados

A pegada de carbono total obtida para o rótulo analisado foi de 21,99 kg CO₂eq por milheiro de rótulos, o que corresponde a aproximadamente 21,99 g CO₂eq por rótulo.

Os resíduos sólidos apresentam o maior contributo para as emissões, com 11,81 kg CO₂eq/milheiro, correspondendo a cerca de 54% da pegada total. O segundo maior contributo está associado ao substrato Fedrigoni, com 6,73 kg CO₂eq/milheiro, representando aproximadamente 30,6% do total.

A água e a energia elétrica apresentam contribuições semelhantes na pegada total, com 1,71 kg CO₂eq/milheiro e 1,66 kg CO₂eq/milheiro, respetivamente. Estes valores correspondem a cerca de 7% e 8% da pegada total. As tintas apresentam um contributo reduzido, totalizando 0,081 kg CO₂eq/milheiro, ou seja, aproximadamente 0,4% do valor total.

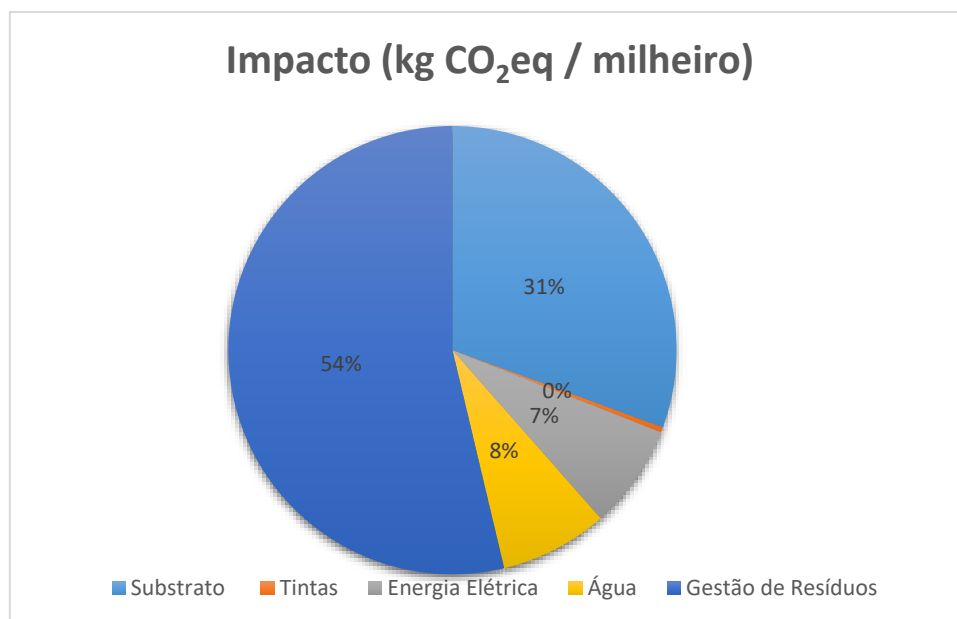


Figura 7 - Contributo das diferentes categorias para a pegada de carbono total do rótulo Silk & Spice White Rt.

4.2.5. Discussão

A pegada de carbono obtida para o rótulo analisado foi de aproximadamente 21,99 g CO₂eq por rótulo. Ao analisar os resultados, verifica-se que os maiores contributos estão associados aos resíduos sólidos e ao substrato, que juntos representam a parte mais significativa da pegada calculada.

O elevado contributo dos resíduos sólidos está associado à utilização de fatores de emissão médios nacionais, aplicados devido à ausência de informação específica sobre o destino final dos resíduos gerados pela empresa. Esta abordagem permitiu estimar o impacto desta categoria, mas introduziu incerteza no cálculo, uma vez que diferentes tratamentos apresentam emissões significativamente distintas.

Medeiros et al., (2019), em seu estudo aplicado a melhorias ambientais na produção de etiquetas autoadesivas, concluíram que o consumo de matérias-primas, a geração de resíduos e o consumo energético são os maiores contributos ambientais neste tipo de produto. Os autores referem igualmente que a otimização dos materiais e a melhoria da gestão de resíduos constituem algumas das medidas mais eficazes para redução dos impactos ambientais.

Esta conclusão é relevante para o presente caso de estudo, uma vez que o substrato representou o segundo maior contributo para a pegada de carbono obtida. Apesar de

existirem outros consumos associados ao processo produtivo, como tintas, energia elétrica e água, o impacto associado ao substrato foi superior ao das tintas utilizadas.

Os contributos da energia elétrica e da água apresentaram valores semelhantes e relativamente inferiores quando comparados com os resíduos e o substrato. No caso da água, importa salientar que o respetivo impacto resulta de um processo de alocação proporcional à produção, devendo os resultados ser interpretados com alguma cautela.

Por outro lado, as tintas apresentaram um contributo residual na pegada total, inferior a 1%, indicando que medidas focadas apenas na redução do consumo de tintas teriam pouca influência na diminuição global da pegada de carbono do rótulo analisado.

Contudo, importa referir que os valores apresentados correspondem apenas às emissões associadas aos principais materiais, consumos e processos considerados na produção do rótulo até à saída da RCM Etiquetas, devido à abordagem cradle-to-gate adotada no estudo. Assim, os resultados não representam a pegada de carbono total do rótulo ao longo de todo o seu ciclo de vida, mas permitem identificar os principais pontos críticos dentro do processo analisado.

4.2.6. Análise de Sensibilidade e Incerteza

Os resultados mostram que os resíduos sólidos possui uma elevada contribuição na pegada de carbono do rótulo analisado. Como a empresa não dispunha de informação específica sobre o destino final destes resíduos, foi realizada uma análise de sensibilidade para perceber até que ponto esta variável poderia alterar o resultado.

Para tal, foram considerados dois cenários alternativos para o tratamento dos resíduos sólidos: deposição em aterro e incineração. Os restantes parâmetros do sistema foram mantidos, alterou-se apenas o fator de emissão associado ao tratamento dos resíduos.

No cenário de incineração, a pegada de carbono total obtida foi de aproximadamente 16,21 kg CO₂eq/milheiro. Por outro lado, no cenário de deposição em aterro, a pegada aumentou para cerca de 25,33 kg CO₂eq/milheiro.

A diferença observada entre os dois cenários mostra que o destino final dos resíduos influencia significativamente o resultado da pegada de carbono. Os valores mais elevados associados ao aterro estão relacionados sobretudo com as emissões de metano resultantes da decomposição dos resíduos.

A variação entre os dois cenários foi de aproximadamente 9,12 kg CO₂eq/milheiro, o que corresponde a uma incerteza de 41,5% relativamente ao valor base calculado.

Estes resultados destacam que os resíduos sólidos constituem a principal fonte de incerteza do estudo. Apesar dos diferentes cenários, foi possível confirmar que esta categoria continua a ser um dos principais pontos críticos da pegada de carbono do rótulo Silk & Spice White Rt. Por esse motivo, estes resultados devem ser interpretados tendo em conta esta limitação, especialmente pela ausência de informação específica sobre o tratamento real dos resíduos gerados pela empresa.

4.3 Caso de Estudo III: Pinha Mansa

4.3.1 Descrição da empresa e do Produto

O terceiro caso de estudo incide sobre a empresa Pinha Mansa, uma empresa portuguesa do setor têxtil e vestuário localizada na Póvoa de Varzim. Fundada em 2002, a Pinha Mansa dedica-se à confeção de peças de vestuário para marcas nacionais e internacionais, incluindo calças, outerwear e vestuário premium. O produto analisado neste estudo corresponde a uma calça chino produzida com um tecido misto, composto por linho, algodão e elastano.



Figura 8 – Imagem ilustrativo de uma calça chino. Fonte: adaptado de Zalando (s.d.).

A unidade funcional considerada foi uma calça chino produzida. As calças chino caracterizam-se por serem peças de vestuário casual de corte estruturado, normalmente constituídas por tecidos leves ou de gramagem intermédia, envolvendo operações de corte, costura, montagem, engomadoria e acabamento têxtil.

A análise seguiu a abordagem metodológica definida no Capítulo 3, considerando os materiais incorporados na peça, os aviamentos, os materiais de embalagem e a energia elétrica consumida durante a confeção do produto, até à obtenção da calça final.

4.3.2 Inventário de Dados do Produto

As principais entradas consideradas correspondem aos materiais incorporados na peça e aos consumos associados às etapas de produção, nomeadamente o corte, a confeção, o acabamento e o controlo de qualidade. As principais saídas incluem o produto final e os resíduos gerados durante o processo produtivo, sobretudo resíduos têxteis resultantes do corte e confeção.

As principais categorias consideradas no inventário encontram-se apresentadas na Tabela 6.

Categoria	Dados considerados	Quantidades	Unidades	Observações
Matéria-prima principal	Tecido utilizado	0,396	Kg/peça	Incluindo 3% de desperdício de corte
Produção	Calça chino produzida	1	peça	Unidade funcional
Composição do tecido	Linho	0,194	Kg/peça	49% da massa do tecido
	Algodão	0,194	Kg/peça	49% da massa do tecido
	Elastano	0,0079	Kg/peça	2% da massa do tecido
Materiais auxiliares	Linha de costura	0,003	Kg/peça	Estimativa para 30 m de linha
	Botões	0,016	Kg/peça	4 botões de 4 g
	Fecho	0,005	Kg/peça	Nylon
	Gancho	0,0035	Kg/peça	Massa média indicada pela empresa
	Fita cós	0,0032	Kg/peça	0,04 m ² × 80 g/m ²

Energia	Eletricidade consumida para produção	0,893	KWh/peça	67 kWh/h ÷ 75 peças/h
Resíduos têxteis	Desperdício após o corte	3	%	Incluído no cálculo da massa total
Embalagens	Saco plástico	0,0028	kg/peça	Embalagem individual
	Papel sulfito/papel seda	0,0025	Kg/peça	Embalagem
	Etiquetas	0,015	Kg/peça	Etiqueta interna, hangtag e etiqueta da marca
	Caixa de cartão	0,0333	Kg/peça	600 g/caixa para 18 calças

Tabela 6 - Principais fluxos considerados no inventário da calça chino

Desta forma, o inventário permitiu organizar os principais fluxos associados à produção da calça chino, servindo de base à aplicação dos fatores de emissão e ao cálculo da pegada de carbono do produto.

4.3.3 Metodologia de Cálculo

O cálculo da pegada de carbono da calça Chino da empresa Pinha Mansa foi desenvolvido com base na abordagem de inventário de ciclo de vida definida no capítulo 3. O cálculo baseou-se na relação entre os dados de atividade e nos respetivos fatores de emissão.

Numa primeira fase, procedeu-se à organização do inventário de ciclo de vida, com base na informação disponibilizada pela empresa. Foram identificados os principais fluxos de entrada associados ao produto, incluindo o tecido principal, composto por 49% linho, 49% algodão e 2% elastano, bem como linha de costura, botões, fecho, gancho, fita cócs, materiais de embalagem e energia elétrica consumida no processo produtivo.

A massa do tecido principal por peça foi determinada a partir do consumo de tecido e do respetivo peso. Considerou-se um consumo de 1,20 m² por calça e um peso linear de 320 g/m², resultando numa massa líquida de 0,384 kg por peça. De forma a incluir o

desperdício de corte, foi considerado que 97% do tecido adquirido é incorporado no produto final, obtendo-se uma massa de tecido de aproximadamente 0,396 kg por peça.

Os fatores de emissão foram obtidos através da base de dados Ecoinvent, utilizando datasets do tipo “market for”, sempre que disponíveis, por representarem o fornecimento médio do produto na geografia considerada e incluírem processos associados à disponibilização dos materiais.

Para efeitos de análise, os contributos foram organizados por componente, destacando de forma separada cada fibra que constituem o tecido principal, nomeadamente algodão, linho e elastano, de modo a evidenciar quais os materiais com maior contribuição para a pegada de carbono da calça.

A metodologia aplicada permitiu estimar a pegada de carbono da calça Chino com base nos materiais incorporados no produto, nos aviamentos, na energia elétrica consumida durante a produção e nos materiais de embalagem. Os resultados foram expressos em kg CO₂eq por unidade de calça.

4.3.4 Resultados

A análise por categoria demonstra que a matéria-prima é a principal responsável pela pegada de carbono da calça Chino, representando cerca de 78% do impacto total. Esta contribuição está sobretudo associada ao tecido principal, nomeadamente ao algodão. Os aviamentos representam aproximadamente 7,8%, enquanto a energia elétrica e a embalagem apresentam contribuições inferiores, correspondendo a cerca de 2,9% e 2,3%, respetivamente.

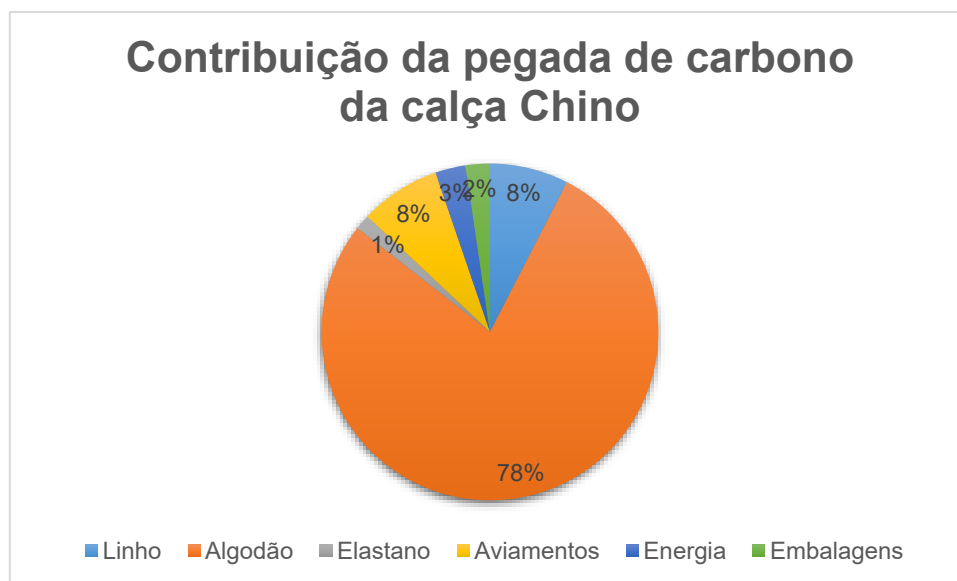


Figura 9 - Contributo das categorias e componentes para a pegada de carbono da calça chino

A análise por componente evidencia que o algodão é a principal fonte de emissões da calça Chino, apresentando a maior contribuição individual para a pegada de carbono do produto. Esta contribuição está associada ao fator de emissão do tecido de algodão utilizado. Os restantes componentes do tecido, como o linho e o elastano, apresentam uma contribuição inferior, enquanto os aviamentos, a energia elétrica e a embalagem têm menor peso relativo no resultado.

4.3.5 Discussão

A pegada de carbono obtida para a calça Chino da Pinha Mansa foi de aproximadamente 2,82 kg CO₂eq por peça. Este resultado corresponde aos materiais incorporados na peça, aos aviamentos, à energia elétrica consumida na produção e aos materiais de embalagem. Como a análise não inclui a fase de uso da peça, o transporte até ao consumidor nem o fim de vida, o valor obtido deve ser interpretado como uma pegada parcial do produto.

Quando se compara este resultado com estudos de ciclo de vida de outras peças de vestuário, verifica-se que os valores da literatura são superiores. Por exemplo, no estudo desenvolvido pela Levi Strauss & Co (2015) para um par de jeans Levi's 501, foi estimada uma pegada de carbono de 33,4 kg CO₂eq por par de jeans, considerando todo o ciclo de vida do produto. Nesse estudo, a fase de cuidado pelo consumidor

representou 37% das emissões e a produção do tecido representou 27%. A diferença entre o valor obtido neste estudo e o valor apresentado no estudo da Levi's era esperada, uma vez que os dois estudos não consideram os mesmos limites do sistema. O estudo da Levi's inclui várias etapas do ciclo de vida da peça, como lavagens, secagem, transporte e fim de vida, enquanto o presente caso de estudo considera apenas os principais materiais incorporados na calça chino, os aviamentos, a embalagem que envolve o produto e o consumo de eletricidade associado a confecção do produto, até à saída do produto da empresa ou unidade fabril. Ainda assim, esta comparação é útil porque ambos os estudos apontam para a importância do tecido como uma das principais fontes de emissão. No caso da calça chino analisada, o tecido foi o principal contributo para a pegada de carbono obtida.

Hedman (2018) numa análise comparativa sobre jeans, refere que diferentes estudos apresentam valores de pegada de carbono entre cerca de 11,5 kg CO₂eq e 33,4 kg CO₂eq por par de jeans, dependendo das fronteiras do sistema e dos pressupostos utilizados. Esta variação mostra que os resultados em produtos têxteis não são diretamente comparáveis sem considerar o que foi ou não incluído no cálculo. No caso da Pinha Mansa, o valor de 2,82 kg CO₂eq por peça é inferior, mas a análise tem uma fronteira mais limitada e a peça analisada apresenta uma massa de tecido relativamente baixa, cerca de 0,396 kg por calça.

No presente caso de estudo, o algodão foi o componente com maior contribuição individual para as emissões. Apesar do algodão representar 49% da composição do tecido, o fator de emissão utilizado para este material foi superior ao do linho. Assim, mesmo tendo a mesma percentagem no tecido que o linho, o algodão acabou por ter maior peso no resultado. Chen et al. (2021), numa revisão sobre Avaliação do Ciclo de Vida de têxteis de algodão, referem que os impactes ambientais deste tipo de produto dependem bastante da produção da fibra, dos processos de transformação têxtil, da energia utilizada e da fronteira do sistema adotada.

O relatório encomendado pela Cotton Incorporated (2012), também permite contextualizar o resultado obtido. Nesse estudo, foi analisada a produção de fibra e tecido de algodão, incluindo produtos como calças casuais de tecido plano. O relatório indica que 1.000 kg de tecido plano permitem produzir cerca de 1.764 pares de calças casuais, o que corresponde a aproximadamente 0,57 kg de tecido por peça. No presente caso, a massa de tecido considerada foi de cerca de 0,396 kg por calça, ou seja, inferior à referência apresentada nesse estudo. Esta diferença pode ajudar a explicar o valor mais baixo obtido para a calça Chino.

Os aviamentos apresentaram uma contribuição inferior à do tecido principal. Este resultado era esperado, porque a massa destes componentes é bastante menor quando comparada com a massa do tecido. No entanto, a sua inclusão foi importante para tornar o cálculo mais completo. A linha de costura, os botões, o fecho, o gancho e a fita cós são materiais diferentes entre si e, por isso, podem ter fatores de emissão distintos. Mesmo não sendo os principais responsáveis pelo resultado, estes componentes ajudam a representar melhor a composição real da calça.

A energia elétrica também teve uma contribuição reduzida no total. Isto deve-se ao consumo específico por peça, que foi calculado a partir da produção média da fábrica. No entanto, este resultado não significa que a energia seja irrelevante em todos os produtos têxteis. Nos estudos com fronteiras mais alargadas, a energia pode ter maior importância, principalmente quando são incluídas etapas como fiação, tecelagem, tingimento, acabamento, lavagem e secagem. No caso da Levi's, por exemplo, a fase de uso pelo consumidor foi a maior responsável pelas emissões, devido sobretudo ao consumo de energia associado à lavagem e secagem da peça (Co, 2015).

A embalagem foi uma das categorias com menor contribuição para a pegada de carbono. Este resultado está relacionado com a menor massa dos materiais de embalagem por peça, nomeadamente saco plástico, papel, etiquetas e caixa de cartão. Apesar disso, estes materiais foram considerados no inventário, uma vez que fazem parte do produto entregue e contribuem, ainda que de forma limitada, para o resultado.

De forma geral, o resultado obtido parece coerente com os estudos consultados. A pegada calculada para a calça Chino é inferior à apresentada em estudos de jeans ou de outras peças avaliadas num ciclo de vida completo. O ponto comum entre o presente caso e a literatura é a importância do tecido principal na pegada de carbono do vestuário. No caso da Pinha Mansa, a separação dos componentes do tecido no gráfico permitiu identificar o algodão como o principal hotspot, sendo por isso o material que deverá merecer maior atenção em futuras medidas de redução.

4.4 Caso de Estudo IV: Oficina de Janelas

4.4.1 Descrição da Empresa e do Produto

O quarto caso de estudo incide sobre uma empresa portuguesa do setor da caixilharia em alumínio, designada neste relatório como Oficina de Janelas, por motivos de confidencialidade. A empresa trabalha no desenvolvimento e fabrico de sistemas de janelas em alumínio, utilizados sobretudo em edifícios residenciais e comerciais.

O produto analisado corresponde a uma janela de alumínio de grandes dimensões, com 3×3 m. Este sistema é constituído por perfis de alumínio lacado, vidro duplo, acessórios metálicos e plásticos, vedantes, elementos de fixação e outros componentes necessários à montagem da janela.

A unidade funcional considerada foi uma janela de alumínio 3×3 m. Esta unidade foi adotada porque o cálculo não considera apenas a caixilharia em alumínio, mas sim o conjunto da janela, incluindo o vidro, a lacagem, os acessórios, os vedantes e os restantes materiais incorporados. Mantendo a abordagem metodológica definida no Capítulo 3, este caso considerou os principais materiais, componentes e processos associados à produção da janela de alumínio até à sua saída da empresa, excluindo as etapas posteriores de transporte, instalação, utilização, manutenção e fim de vida.

4.4.2 Inventário de Dados do Produto

As principais entradas consideradas no inventário correspondem aos materiais incorporados na janela e aos consumos associados ao processo produtivo da caixilharia. Foram considerados, sempre que existiam dados disponíveis, os materiais principais, os materiais auxiliares, os componentes metálicos e os elementos de vidro. As principais saídas incluem o produto final e os resíduos gerados durante o processo produtivo.

As principais categorias consideradas no inventário encontram-se apresentadas na Tabela 7.

Categoria	Dados considerados	Quantidade	Unidade	Observação
-----------	--------------------	------------	---------	------------

Produção	Janela/caixilharia de alumínio	1	-	-
Matéria-prima	Perfis de alumínio e latão utilizados na caixilharia da janela 3 × 3 m	105,09	Kg	Massa dos perfis, sem o latão
Vidro	Painéis de vidro duplo incorporados na janela	2	Painéis	Vidro duplo
	Dimensão de cada painel	1,438 × 2,892	m	Dados do plano de corte
	Área por painel	4,159	m²	1,438 × 2,892
	Área total de vidro	8,317	m²	Dois painéis
Materiais auxiliares	Pó de lacagem RAL 9005	3,0	kg	Lacagem da caixilharia
Componentes metálicos	Latão	1,135	kg	Componente LT01_001
	Inox, parafusos, rebites, pinos, molas e outros acessórios metálicos	0,0732	kg	MO04, PER02_A2_020, PER02_A2_044, PINO_PUXFO, PRF01_A2_007, PRF7981_A2_024 e REBITES_001
	Acessórios em alumínio	0,188	kg	ES01, ES03, TP16dir e TP16esq
Componentes plásticos	Peças em POM e outros acessórios plásticos	0,0424	kg	BF1-L, BF1-R, BF2-L, BF2-R, BUCHA_PLAS_004, GT01 e TV01P
Materiais auxiliares	PVC	4,272	kg	L20115
	Borrachas/EPDM/vedantes	0,168	kg	VD04 e VD32
	Fibra sintética/pelúcias	0,450	kg	PL_02, PL_04 e PL_10

Tabela 7 - Principais categorias consideradas no inventário da janela de alumínio.

4.4.3 Metodologia de Cálculo

A metodologia de cálculo aplicada a este caso de estudo seguiu a abordagem geral definida no Capítulo 3, que se baseia na relação entre dados de atividade dos materiais e nos seus fatores de emissão. Neste caso de estudo, os dados de atividade correspondem sobretudo às quantidades de materiais incorporados na janela analisada.

A informação disponibilizada pela empresa incluía a massa dos principais materiais, a área dos painéis de vidro, a quantidade de pó de lacagem, as quantidades dos acessórios, as massas unitárias de alguns componentes e os comprimentos dos materiais lineares.

Os componentes indicados em número de peças foram convertidos para massa. No caso dos materiais lineares, como PVC, pelúcias e vedantes, a massa foi determinada a partir do comprimento total e do peso por metro disponibilizado. Os materiais que já se encontravam expressos em kg foram utilizados diretamente no cálculo.

Após a organização do inventário, cada material foi associado ao fator de emissão mais adequado disponível na base de dados Ecoinvent e a seleção dos datasets foi feita com base no material predominante de cada componente.

O vidro foi tratado de forma diferente dos restantes materiais uma vez que os fatores emissão disponíveis já estavam expressos em $\text{kg CO}_2\text{eq/m}^2$. Como a informação disponível apresentava um intervalo de valores, foram considerados dois níveis de emissão: um nível baixo, correspondente a $53 \text{ kg CO}_2\text{eq/m}^2$, e um nível alto, correspondente a $71 \text{ kg CO}_2\text{eq/m}^2$.

Assim, a metodologia aplicada permitiu estimar a pegada de carbono da janela com base nos materiais presentes no produto e nos fatores de emissão selecionados.

4.4.4 Resultados

A pegada de carbono do sistema de janelas de alumínio $3 \times 3 \text{ m}$ foi calculada com base nos materiais incorporados no produto e nos respetivos fatores de emissão. O resultado foi apresentado em dois cenários, devido ao intervalo de fatores de emissão considerado para o vidro.

O subtotal das emissões associadas aos materiais, excluindo o vidro, foi de 1541,64 kg CO₂eq. Este valor é dominado pelo alumínio dos perfis da caixilharia, que representa 1497,38 kg CO₂eq. Os restantes materiais, como latão, pó de lacagem, PVC, nylon/plástico, inox, pelúcias e vedantes, apresentaram uma contribuição conjunta bastante inferior.

Estavam disponíveis dois valores de referência para o fator de emissão do vidro, foram calculados dois cenários. No cenário baixo, foi utilizado o fator de 53 kg CO₂eq/m², resultando em 440,82 kg CO₂eq. No cenário alto, foi utilizado o fator de 71 kg CO₂eq/m², resultando em 590,53 kg CO₂eq.

A Tabela 8 apresenta a síntese dos resultados obtidos para os dois cenários considerados.

Componente	Cenário baixo (kg CO₂eq)	Cenário alto (kg CO₂eq)
<i>Caixilharia sem vidro</i>	1541,64	1541,64
<i>Vidro</i>	440,82	590,53
<i>Pegada total</i>	1982,46	2132,17

Tabela 8 - Pegada de carbono do sistema de janela de alumínio 3 × 3 m.

Assim, a pegada de carbono estimada varia entre 1982,46 kg CO₂eq e 2132,17 kg CO₂eq por sistema de janela de alumínio 3 × 3 m.

No cenário baixo, as emissões associadas ao vidro foram de 440,82 kg CO₂eq. Somando este valor ao subtotal dos restantes materiais, a pegada de carbono total da janela foi de 1982,46 kg CO₂eq. O alumínio representa cerca de 75,5% da pegada total, enquanto o vidro representa cerca de 22,2%. Os restantes materiais apresentaram uma contribuição reduzida, correspondente a cerca de 2,2% do total.

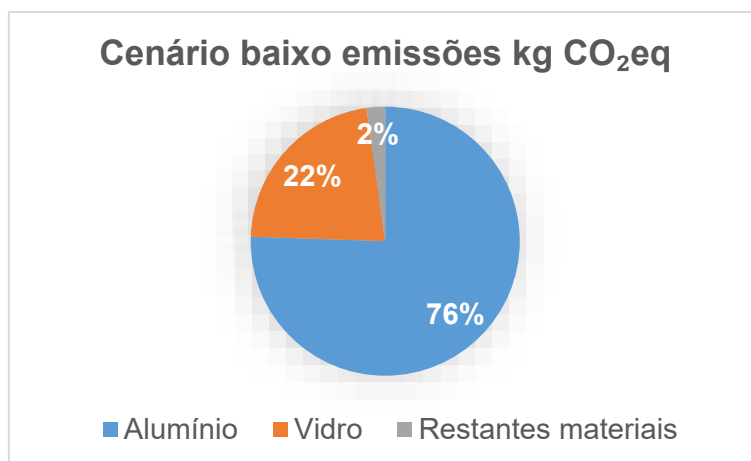


Figura 10 - Contribuição dos principais grupos de materiais para a pegada de carbono da janela de alumínio 3 × 3 m no cenário baixo.

No cenário alto, as emissões associadas ao vidro foram de 590,53 kg CO₂eq. Com a inclusão deste valor, a pegada de carbono total da janela aumentou para 2132,17 kg CO₂eq. A contribuição relativa do alumínio diminuiu para cerca de 70,2%, enquanto a do vidro aumenta para aproximadamente 27,7%. Os restantes materiais mantiveram uma contribuição reduzida, correspondente a cerca de 2,1% do total como podemos observar na figura abaixo.

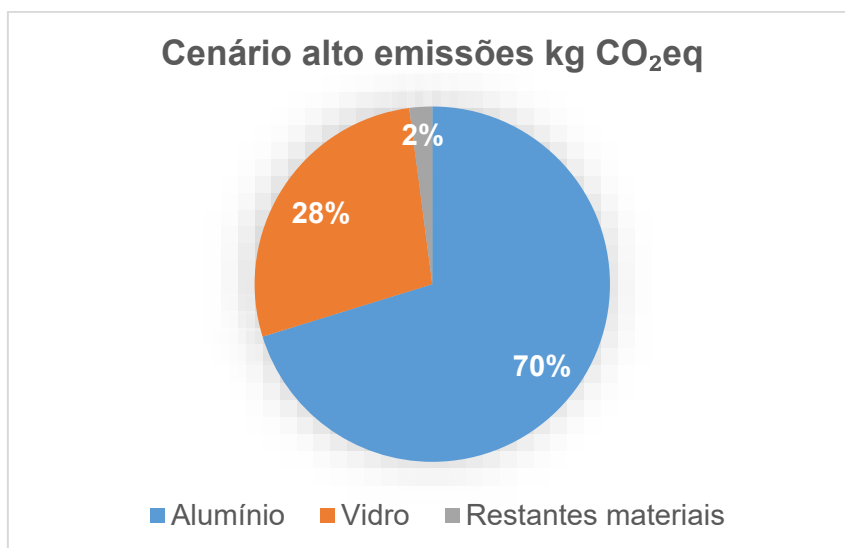


Figura 11 - Contribuição dos principais grupos de materiais para a pegada de carbono da janela de alumínio 3 × 3 m no cenário alto.

Os resultados mostram que o alumínio e o vidro são os principais responsáveis pela pegada de carbono do sistema analisado. Os restantes materiais apresentam uma contribuição reduzida, representando pouco mais de 2% do total em ambos os cenários.

4.4.5 Discussão

A pegada de carbono estimada para o sistema de janelas de alumínio 3×3 m situa-se entre 1982,46 kg CO₂eq e 2132,17 kg CO₂eq, considerando os dois níveis de emissão aplicados ao vidro. O valor inferior corresponde ao cenário baixo, no qual foi utilizado o fator de 53 kg CO₂eq/m², enquanto o valor superior corresponde ao cenário alto, com o fator de 71 kg CO₂eq/m².

O produto analisado não corresponde a uma janela convencional de pequenas dimensões, mas sim a um sistema de janelas de grandes dimensões, com 3×3 m, constituído por caixilharia de alumínio, vidro duplo, lacagem, acessórios, vedantes e restantes componentes incorporados. E quando analisado de forma individual, o valor da pegada de carbono pode parecer elevado.

O alumínio foi o material com maior contribuição para a pegada. A massa de alumínio que compõe a caixilharia é de 105,09 kg, originando uma emissão de 1497,38 kg CO₂eq. Este valor representa aproximadamente 75,5% da pegada total no cenário baixo e 70,2% no cenário alto. Assim, grande parte do resultado obtido está relacionada com a quantidade de alumínio incorporada no produto e com o fator de emissão aplicado a este material.

Sinha e Kutnar (2012), numa análise cradle-to-gate de caixilhos de madeira, PVC e alumínio, também identificaram o alumínio como material com maior pegada de carbono. Nesse estudo, o caixilho de alumínio apresentou 486 kg CO₂eq, enquanto os caixilhos de PVC e madeira apresentaram 258 kg CO₂eq e 130 kg CO₂eq, respetivamente. Os autores referem ainda que, no caixilho de alumínio, a produção do alumínio representou 69,8% da pegada de carbono total. No presente caso, a contribuição do alumínio é ligeiramente superior, variando entre 70,2% e 75,5% dependendo do cenário considerado para o vidro. E este resultado mostra que quando o alumínio é usado como principal material em janelas ou caixilharias, faz com que o produto tenha um grande impacto climático.

Asif et al (2005), também em seu estudo observaram que as janelas com caixilhos de alumínio apresentavam maior energia incorporada quando comparadas com alternativas em PVC, madeira revestida a alumínio e madeira. Embora este estudo apresente os resultados em energia incorporada e não diretamente em kg CO₂eq, os resultados vão de encontro com o padrão observado neste caso de estudo: os sistemas

com maior presença de alumínio tendem a apresentar impactes superiores na fase de produção dos materiais.

Em outro estudo, Saadatian e Freire (2021) que combinaram quatro materiais de caixilho como alumínio, fibra de vidro, PVC e madeira com oito soluções de vidro verificaram que, nas janelas com caixilho de alumínio, o caixilho representou cerca de 60% a 80% dos impactes incorporados totais. Este intervalo é próximo do resultado obtido no presente estudo, em que o alumínio representou 70,2% a 75,5% da pegada total. Assim, é possível dizer que os resultados obtidos estão alinhados com a literatura, uma vez que a caixilharia de alumínio também surge como o principal hotspot da janela analisada.

O vidro foi o segundo material com maior contribuição. No cenário baixo, o vidro representou 440,82 kg CO₂eq, correspondendo a cerca de 22,2% do resultado total. No cenário alto, a sua contribuição aumentou para 590,53 kg CO₂eq, ou seja, cerca de 27,7% do total. Esta diferença resulta apenas do fator de emissão considerado para o vidro, uma vez que a área de vidro utilizada no cálculo foi a mesma nos dois cenários. A elevada pegada do vidro também pode ser relacionado com o estudo de Saadatian e Freire (2021), uma vez que o estudo mostrou que não é apenas o material do caixilho que influencia os impactes incorporados de uma janela, mas também o tipo de vidro utilizado. No presente caso, a janela incorpora vidro duplo, que representou entre 22,2% e 27,7% da pegada total, confirmando que este componente ou material tem um peso importante no resultado, embora inferior ao do alumínio.

Os restantes materiais apresentaram uma contribuição muito reduzida quando comparados com o alumínio e o vidro. Em conjunto, latão, pó de lacagem, PVC, nylon/plástico, inox, pelúcias e vedantes representam cerca de 44,26 kg CO₂eq, o que corresponde aproximadamente 2% da pegada total. A baixa contribuição destes componentes está relacionada com as pequenas quantidades utilizadas no produto final.

No geral, o valor elevado da pegada de carbono parece estar relacionado com três aspetos principais: a dimensão da janela, a elevada quantidade de alumínio considerada e o fator de emissão aplicado ao alumínio. Estes aspetos explicam porque o resultado é superior ao de várias referências disponíveis para janelas de menor dimensão ou com menor massa metálica.

5. Análise Comparativa e Discussão Global

5.1. Análise comparativa dos resultados obtidos

Os produtos analisados pertencem a setores diferentes e apresentam unidades funcionais distintas, por isso, a análise comparativa destes casos de estudo deve ser feita com alguma cautela. Assim, os resultados não devem ser interpretados como uma comparação direta entre produtos equivalentes, mas sim como uma leitura geral dos principais contributos identificados em cada sistema. Assim, esta análise conjunta permitiu identificar os principais contributos para a pegada de carbono em cada sistema e compreender quais os fatores que mais influenciaram os resultados obtidos.

No caso de estudo da Oliveira & Fontes Lda, a pegada de carbono da couve penca foi influenciada pelos fertilizantes azotados e pelas emissões de N_2O , provenientes do solo. Embora a quantidade de N_2O emitida seja reduzida, este gás tem um elevado potencial de aquecimento global, o que explica o seu peso na pegada. Além disso, a incorporação da biomassa residual no solo permitiu reduzir a pegada de carbono líquida da couve penca devido ao sequestro parcial de carbono.

No caso da RCM Etiquetas, os principais contributos estiveram associados aos resíduos industriais e ao substrato utilizado na produção do rótulo. A elevada contribuição dos resíduos deve ser interpretada com cuidado, uma vez que resultou da utilização de fatores médios devido à ausência de informação específica sobre o destino final dos resíduos. Ainda assim, este resultado mostra a importância da gestão de resíduos e da escolha dos materiais de base em produtos gráficos.

Na Pinha Mansa, o principal contributo esteve associado ao tecido da calça chino, em especial ao algodão. Este resultado mostra que, em produtos têxteis, a matéria-prima pode ter maior influência do que a energia consumida na confeção. Apesar de o algodão e o linho apresentarem a mesma percentagem no tecido, o algodão destacou-se devido ao fator de emissão utilizado.

No caso da Oficina de Janelas, os materiais com maior peso como o vidro e o alumínio, foram os principais responsáveis pela pegada de carbono. Este resultado era esperado, uma vez que ambos apresentam massas elevadas no produto final e os processos de produção dos mesmos apresentam maiores intensidade carbónica.

De forma geral, a análise dos quatro casos mostra que os principais contributos para a pegada de carbono dependem da combinação entre quantidade de material utilizada,

tipo de material, fator de emissão aplicado e processos considerados. Em alguns casos, como na Pinha Mansa e na Oficina de Janelas, os materiais incorporados no produto tiveram maior influência. Noutros, como no caso agrícola e na RCM Etiquetas, destacaram-se processos mais específicos, como a fertilização azotada e a gestão de resíduos.

Assim, esta comparação não tem como objetivo classificar os produtos do mais para o menos emissor, mas sim compreender os fatores que mais influenciaram os resultados em cada caso de estudo. Esta leitura é importante para apoiar a definição de oportunidades de melhoria mais adequadas a cada empresa e a cada produto analisado.

5.2. Fatores Influenciadores

É importante referir que a pegada de carbono obtida nos diferentes casos de estudo pode ter sido influenciada por vários fatores, como a natureza dos produtos analisados, o limite do sistema, a quantidade de inputs utilizada, os fatores de emissão selecionados e a qualidade dos dados disponibilizados pelas empresas.

Um dos principais fatores que influenciaram os resultados foi a composição dos produtos analisados. Nos casos em que os produtos são compostos por materiais com fatores de emissão mais elevados a pegada de carbono tendeu a ser superior. Exemplo deste fator é o caso da Pinha Mansa onde o algodão, que representa uma parte significativa no tecido da calça apresentou maior contribuição porque o seu fator de emissão é superior ao de outros componentes.

O sistema do sistema definido também foi um fator a se ter em conta. Como os estudos foram desenvolvidos numa abordagem cradle-to-gate, os resultados refletem apenas os processos e inputs incluídos dentro desse limite e não incluem outras fases do ciclo de vida dos produtos.

A seleção dos fatores de emissão teve uma influência direta nos resultados das pegadas. Priorizou-se sempre utilizar fatores de emissão provenientes da base de dados Ecoinvent ou de fontes reconhecidas. Em certos casos de estudo, quando não existia um fator específico para determinado componente, foi necessário selecionar o material mais próximo ou representativo.

A disponibilidade e qualidade dos dados fornecidos pelas empresas também influenciaram os resultados. Em alguns casos, foi possível utilizar dados específicos,

como massas de materiais, consumos energéticos ou quantidades por unidade funcional. Noutros casos, foi necessário recorrer a estimativas, a valores médios ou aproximações com base no material predominante.

5.3 Oportunidades de Melhoria

Após a identificação dos principais contributos para a pegada de carbono em cada caso de estudo, foram propostas algumas oportunidades de melhoria.

Caso de Estudo I — Oliveira & Fontes Lda.

No caso da couve penca, as principais oportunidades de melhoria estão principalmente associados à fertilização e às emissões de N_2O do solo.

Uma primeira medida seria melhorar a gestão dos fertilizantes, ajustando as quantidades de fertilizantes aplicados tendo em conta às necessidades reais da cultura. A realização de análises regulares ao solo e o planeamento das aplicações poderiam ajudar a evitar excesso de fertilizante azotado e consequentemente, reduzir as emissões de N_2O .

Caso de Estudo II — RCM Etiquetas

No caso da RCM Etiquetas, as oportunidades de melhoria estão ligadas principalmente ao substrato utilizado, e à gestão dos resíduos gerados.

Uma das medidas que poderia ser avaliada é a escolha de substratos com menor impacte ambiental, como por exemplo a utilização de papéis com maior conteúdo reciclado ou fornecedores mais regionais. A alteração do substrato pode ter influência direta na pegada de carbono dos rótulos.

Relativamente aos resíduos industriais, seria importante obter informação mais detalhada sobre o seu destino final, distinguindo, por exemplo, resíduos encaminhados para reciclagem, valorização, tratamento especializado, incineração ou aterro. Esta informação permitiria reduzir a incerteza associada ao cálculo e identificar alternativas de gestão com menor impacte ambiental.

Caso de Estudo III — Pinha Mansa

No caso da Pinha Mansa, a principal oportunidade de melhoria está relacionada com o tecido utilizado na calça Chino, em particular com o algodão, que apresentou a maior

contribuição individual para a pegada de carbono da calça. Mesmo que parte desta contribuição se deva ao fator de emissão usado, a verdade é que a escolha da matéria-prima é um ponto chave. empresa poderia avaliar alternativas como algodão reciclado. Outra opção seria explorar a utilização de algodão orgânico ou misturas com outras fibras de menor pegada, sempre que a qualidade e o custo do tecido o permitam.

Caso de Estudo IV – Oficina de Janelas

Para o caso da Oficina de Janelas, as principais oportunidades de melhoria focam-se nos materiais com maior contribuição para pegada: o alumínio e o vidro.

Para o alumínio que compõe a caixilharia da janela, a medida mais eficaz seria aumentar a percentagem de alumínio reciclado nos perfis utilizados. O alumínio reciclado tem uma pegada de carbono muito inferior. A empresa se possível, pode negociar com os seus fornecedores para priorizar perfis com maior teor de reciclado. Relativamente ao vidro, a empresa se for viável e possível pode explorar a possibilidade de utilizar vidro reciclado.

6. Conclusão

6.1. Principais Conclusões

O presente trabalho permitiu aplicar uma metodologia de cálculo da pegada de carbono a quatro produtos pertencentes a setores de atividade distintos, nomeadamente horticultura, indústria gráfica, indústria têxtil e caixilharia de alumínio. A utilização de uma abordagem cradle-to-gate permitiu considerar os principais materiais, componentes, consumos e processos associados aos produtos analisados até à sua saída da empresa ou exploração agrícola.

Os resultados obtidos demonstraram que a pegada de carbono de um produto não depende apenas da quantidade total de material utilizada, mas também do tipo de material, do fator de emissão selecionado, dos processos considerados e da qualidade dos dados disponíveis. Esta situação foi evidente nos quatro casos de estudo, uma vez que cada produto apresentou hotspots diferentes.

No caso da couve penca, os principais contributos estiveram associados aos fertilizantes azotados e às emissões de N_2O , provenientes do solo. A inclusão do sequestro de carbono associado à biomassa residual incorporada no solo permitiu redução da pegada líquida do produto, passando de 48,14 g CO_2eq/kg para 31,2 g CO_2eq/kg .

No caso da RCM Etiquetas, a pegada de carbono do rótulo foi de 21,99 kg CO_2eq por milheiro. Os principais contributos estiveram associados aos resíduos industriais e ao substrato utilizado. A elevada contribuição dos resíduos deve-se à ausência de informação específica sobre o seu destino final e à utilização de fatores médios nacionais. Ainda assim, este caso mostrou a importância da gestão de resíduos e da escolha dos materiais de base em produtos gráficos.

Na Pinha Mansa, a calça chino apresentou uma pegada de carbono de 2,82 kg CO_2eq por peça. O principal contributo esteve associado ao tecido, sobretudo ao algodão, demonstrando que, em produtos têxteis, a escolha da matéria-prima pode ter maior influência do que a energia consumida durante a confeção do produto. Os aviamentos, a energia elétrica e a embalagem apresentaram contributos inferiores.

No caso da Oficina de Janelas, a pegada de carbono estimada para a janela de alumínio 3 × 3 m variou entre 1982,46 e 2132,17 kg CO_2eq , de acordo com fator de emissão considerado para o vidro. O alumínio e o vidro foram os principais responsáveis pelo resultado obtido, devido à sua elevada massa no produto final e aos impactes

associados à sua produção. Os restantes materiais apresentaram uma contribuição bastante reduzida em ambos os cenários.

A análise comparativa dos quatro casos de estudo permitiu concluir que os resultados não devem ser interpretados como uma comparação direta entre produtos, pois as unidades funcionais, massas, funções e setores são diferentes. No entanto, a análise conjunta foi útil para identificar padrões comuns, nomeadamente a importância dos materiais incorporados, da seleção dos fatores de emissão, da disponibilidade de dados e da definição coerente do limite do sistema.

Apesar das limitações encontradas, sobretudo relacionadas com a ausência de dados específicos em alguns casos e com a necessidade de recorrer a estimativas ou fatores médios, o estudo permitiu identificar os principais pontos críticos em cada produto. Desta forma, o cálculo da pegada de carbono é de facto uma ferramenta útil para apoiar a gestão ambiental das empresas e orientar oportunidades de melhoria com potencial de redução de emissões.

6.2. Contribuições do Estágio

A realização deste estágio permitiu aplicar, em contexto real, conhecimentos relacionados com o cálculo da pegada de carbono e análise de emissões de gases com efeito de estufa em diferentes setores de atividade.

Ao longo do trabalho foram analisados vários casos de estudo pertencentes a áreas distintas, nomeadamente horticultura, indústria gráfica, indústria têxtil e indústria metalomecânica. Esta diversidade permitiu perceber como diferentes processos produtivos, consumos energéticos, matérias-primas e sistemas de gestão influenciam nas emissões associadas dos produtos.

Um dos principais contributos do estágio foi a aplicação prática de metodologias de cálculo da pegada de carbono adaptadas à realidade das empresas. Para isso, foi necessário recolher, organizar e interpretar diferentes tipos de dados ambientais, como consumos de energia, utilização de materiais, produção de resíduos e informação relacionada com os processos produtivos.

O estágio permitiu também desenvolver competências técnicas na utilização de ferramentas de cálculo em Excel, construção de inventários ambientais e aplicação de fatores de emissão. Paralelamente, foi possível aprofundar conhecimentos relacionados

com Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), ISO 14067, GHG Protocol e outras metodologias utilizadas na quantificação das emissões de gases com efeito de estufa.

Outro aspeto importante foi o contacto direto com algumas dificuldades frequentemente encontradas nas pequenas e médias empresas relativamente à recolha de dados ambientais. Em vários casos verificou-se ausência de registos detalhados sobre consumos específicos, resíduos produzidos ou fatores de emissão associados às matérias-primas utilizadas. Esta realidade permitiu compreender a importância de melhorar os sistemas internos de monitorização e gestão ambiental nas organizações.

O estágio contribuiu igualmente para compreender melhor a crescente importância da sustentabilidade e da descarbonização no contexto empresarial atual. Atualmente, muitas empresas enfrentam exigências relacionadas com reporte ambiental, redução de emissões e cumprimento de metas de sustentabilidade, tornando a pegada de carbono uma ferramenta cada vez mais relevante para apoio à gestão ambiental e à tomada de decisão.

Por fim, este estágio permitiu consolidar conhecimentos adquiridos ao longo da formação académica e desenvolver competências de autonomia, organização, análise crítica e adaptação metodológica perante limitações reais de dados e contexto empresarial.

6.3. Limitações do Estudo

Apesar dos resultados obtidos, o presente estudo apresenta algumas limitações que devem ser consideradas na interpretação dos resultados.

Uma das principais dificuldades encontradas ao longo do trabalho esteve relacionada com a disponibilidade e qualidade dos dados fornecidos pelas empresas analisadas. Em alguns casos verificou-se ausência de informação detalhada relativamente a determinados consumos, resíduos produzidos, águas residuais ou fatores de emissão específicos associados às matérias-primas utilizadas. Sempre que não foi possível obter informação direta, recorreu-se a dados secundários provenientes de literatura científica, bases de dados e fatores médios nacionais.

Outra limitação importante prende-se com a abordagem metodológica adotada. O estudo adotou uma abordagem cradle-to-gate, considerando os principais materiais, componentes, consumos e operações associados aos produtos analisados até à sua

saída da empresa. Assim, não foram incluídas etapas posteriores do ciclo de vida, como distribuição, utilização, manutenção, lavagem, reparação e fim de vida, quando aplicáveis. Desta forma, os resultados obtidos representam uma estimativa parcial da pegada de carbono dos produtos, não correspondendo à pegada carbónica total ao longo de todo o ciclo de vida.

Verificaram-se igualmente limitações relacionadas com a inexistência de fatores de emissão específicos para alguns materiais e processos produtivos. Em determinadas situações foi necessário utilizar fatores mais genéricos disponíveis em literatura ou bases de dados internacionais, que podem ser diferentes das condições reais de produção.

Importa ainda referir que os diferentes casos de estudo analisados pertencem a setores produtivos muito distintos entre si, dificultando comparações diretas entre os resultados obtidos. Cada setor apresenta características próprias ao nível dos consumos energéticos, matérias-primas, resíduos e tecnologias utilizadas.

Apesar destas limitações, procurou-se sempre utilizar dados representativos das empresas analisados.

Como sugestão para trabalhos futuros, seria relevante desenvolver o mesmo estudo com limites de sistema mais abrangentes, utilizando abordagens cradle-to-grave, de forma a incluir outras etapas do ciclo de vida dos produtos. Esta ampliação do limite do sistema permitiria incluir etapas como produção das matérias-primas, transporte, utilização e fim de vida dos produtos, possibilitando uma avaliação mais completa da pegada de carbono.

Outra possibilidade seria melhorar a recolha de dados junto das empresas, através da criação de registos mais detalhados por produto, incluindo consumos energéticos por processo, quantidades de resíduos por tipo e destino final, massas dos componentes e origem dos principais materiais utilizados. Esta melhoria permitiria reduzir a incerteza dos cálculos e tornar os resultados mais representativos.

Também seria importante utilizar fatores de emissão mais específicos, sempre que possível provenientes de fornecedores, declarações ambientais de produto ou bases de dados atualizadas. Esta melhoria seria especialmente relevante para os materiais e componentes com maior peso nos resultados, como fertilizantes, substratos, fibras têxteis, vidro e alumínio.

7. Referências Bibliográficas

- Agência Portuguesa do Ambiente. (2024). *Fatores de emissão de eletricidade em Portugal*. APA.
- Agência Portuguesa do Ambiente. (2024). *Inventário Nacional de Emissões por Fontes e Remoção por Sumidouros de Poluentes Atmosféricos (NIR 2024)*. APA.
- Agência Portuguesa do Ambiente. (2024). *Relatório do Estado do Ambiente 2024*. APA.
- Audsley, E., Stacey, K. F., Parsons, D. J., & Williams, A. G. (2009). *Estimation of the greenhouse gas emissions from agricultural pesticide manufacture and use*. Cranfield University.
- Asif, M., Muneer, T., & Kubie, J. (2005). *Building Services Engineering Research and Technology Sustainability analysis of window frames*. <https://doi.org/10.1191/0143624405bt118tn>
- Blonk, H., Kool, A., & Luske, B. (2008). The carbon footprint of food products: A comparison of different methodologies. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 13(1), 3–10.
- Brentrup, F., Küsters, J., Lammel, J., Kuhlmann, H., & Hülsbergen, K. J. (2004). Environmental impact assessment of agricultural production systems using the life cycle assessment methodology II: The application to N fertilizer use in winter wheat production systems. *European Journal of Agronomy*, 20(3), 265–279. [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(03\)00039-X](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(03)00039-X)
- Clift, R., & Wright, L. (2011). Carbon footprinting: A new tool for environmental management. *Journal of Environmental Management*, 92(10), 2329–2330.
- Corda, M. S. J. (2021). *Revisão bibliográfica da pegada carbónica e hídrica de vinhos* [Dissertação de mestrado].
- Co, L. S. &. (2015). THE LIFE CYCLE. *THE LIFE CYCLE Understanding the Environmental Impact of a Pair of Levi's® 501® Jeans*.
- Medeiros, D. L., Braghirolli, F. L., Ramlow, H., Ferri, G. N., & Kiperstok, A. (2019). Environmental improvement in the printing industry: the case study of self-adhesive labels. 13195–13209.
- Chen, F., Ji, X., Chu, J., Xu, P., & Wang, L. (2021). *A review: life cycle assessment of cotton textiles*. 72(1), 19–29. <https://doi.org/10.35530/IT.072.01.1797>

- Directive (EU) 2022/2464 of the European Parliament and of the Council of 14 December 2022 as regards corporate sustainability reporting. *Official Journal of the European Union*, L 322, 15–80.
- Esteves, J. C. G., & Pinto, L. T. C. (2022). *Algoritmo para o cálculo da pegada de carbono na Região Demarcada do Douro Manual Técnico (Versão 1 , 0)*.
- European Commission. (2019). *The European Green Deal*. <https://commission.europa.eu>
- European Commission. (2021). *Delivering the European Green Deal*. <https://commission.europa.eu>
- European Commission. (2021). *Proposal for a Carbon Border Adjustment Mechanism*. <https://taxation-customs.ec.europa.eu>
- European Financial Reporting Advisory Group. (2023). *European Sustainability Reporting Standards: ESRS E1 Climate Change*. EFRAG.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2019). *Methods for estimating greenhouse gas emissions from food systems*. FAO.
- Finkbeiner, M., Inaba, A., & Tan, R. B. H. (2011). The new international standards for carbon footprinting. *Environmental Science & Technology*, 45(16), 6719–6725.
- Garcia, R., & Freire, F. (2014). Carbon footprint of particleboard: A comparison between ISO/TS 14067, GHG Protocol, PAS 2050 and Climate Declaration. *Journal of Cleaner Production*, 66, 199–209.
- Guinée, J. B., Heijungs, R., Huppes, G., Zamagni, A., Masoni, P., van der Werf, L., & Rebitzer, G. (2011). Life cycle assessment: Past, present, and future. *Environmental Science & Technology*, 45(1), 90–96.
- HEDMAN, E. Å. (2018). *Comparative Life Cycle Assessment of Jeans A case study performed at Nudie Jeans*.
- Cotton Incorporated, C. (2012). *Life Cycle Assessment of Cotton Fiber & Fabric Full Report*. 156.
- Instituto Nacional de Estatística. (2023). *Águas residuais tratadas em estações de tratamento de águas residuais por localização geográfica e níveis de tratamento*. INE.
- IPCC. (2006). *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Volume 1 – General Guidance and Reporting*. Institute for Global Environmental Strategies. <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/>
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2021). *Climate Change 2021: The physical science basis*. Cambridge University Press.

- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2023). *Climate Change 2023: Synthesis report*. IPCC.
- International Organization for Standardization. (2006a). *ISO 14040:2006: Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework*. ISO.
- International Organization for Standardization. (2006b). *ISO 14044:2006: Environmental management — Life cycle assessment — Requirements and guidelines*. ISO.
- International Organization for Standardization. (2018). *ISO 14067:2018: Greenhouse gases — Carbon footprint of products — Requirements and guidelines for quantification*. ISO.
- Jensen, M. V., Christensen, P., Larsen, R., & Petersen, S. O. (2024). Carbon footprint assessment of open-field cabbage production systems in Denmark. *Journal of Cleaner Production*, 435, 140512. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2024.02.008>
- Jiménez-González, C., Kim, S., & Overcash, M. R. (2000). Methodology for developing gate-to-gate life cycle inventory information. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 5(3), 153–159.
- Jumat, F., Rasdi, R. M., Abdul Rahman, M. H. B., & Jamil, S. Z. (2024). Production of cabbage (*Brassica oleracea*) in Cameron Highlands, Malaysia: Evaluating the carbon footprint in compliance with MyGAP. *International Journal of Agriculture, Forestry and Plantation*, 15, 39–42.
- Karim, A. N. M., Kays, E., & Rosland, N. A. A. B. (2017). Gate-to-gate life cycle assessment for determining carbon footprint of catalytic converter assembly process. *International Journal of Engineering Management and Economics*, 1(1), 25–30.
- Larcher, W. (2003). *Physiological plant ecology: Ecophysiology and stress physiology of functional groups* (4th ed.). Springer.
- Lei n.º 98/2021, de 31 de dezembro. Lei de Bases do Clima. *Diário da República*, 1.ª série, n.º 252.
- Matthews, H. S., Hendrickson, C. T., & Weber, C. L. (2008). The importance of carbon footprinting for corporate sustainability. *Environmental Science & Technology*, 42(16), 5839–5842.
- Menegat, S., Ledo, A., & Tirado, R. (2022). Greenhouse gas emissions from global production and use of nitrogen synthetic fertilisers in agriculture. *Scientific Reports*, 12, 14490. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-18773-w>

- Pihkola, H., Nors, M., Kujanpää, M., Helin, T., Kariniemi, M., Pajula, T., Dahlbo, H., & Koskela, S. (2010). *Carbon footprint and environmental impacts of print products from cradle to grave*. VTT Technical Research Centre of Finland.
- Pinheiro, M. D. (2014). *Lectures: Impactes ambientais* [Material de apoio às aulas]. MEGI, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa.
- Porter, M. E., & Kramer, M. R. (2011). Creating shared value. *Harvard Business Review*, 89(1/2), 62–77.
- PwC Portugal. (2026, 3 de março). *Quais as alterações introduzidas pelo Pacote Omnibus?* PwC Portugal. Disponível em: <https://www.pwc.pt/pt/temas-actuais/omnibus-alteracoes-sustentabilidade.html>
- Resolução do Conselho de Ministros n.º 107/2019, de 1 de julho. Roteiro para a Neutralidade Carbónica 2050. *Diário da República*, 1.ª série, n.º 125.
- Schaltegger, S., & Wagner, M. (2006). Managing the business case for sustainability. *Business Strategy and the Environment*, 15(1), 5–16.
- Silva, I. S. H. (2024). *Cálculo comparativo da pegada carbónica de diferentes tipos de embalagens de produtos lácteos* [Dissertação de mestrado, Universidade do Porto].
- Saadatian, S., & Freire, F. (2021). *Embodied impacts of window systems: A comparative assessment of framing and glazing alternatives*. 35(November 2020). <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.102042>
- Sinha, A., & Kutnar, A. (2012). *Carbon Footprint versus Performance of Aluminum, Plastic, and Wood Window Frames from Cradle to Gate*. 542–553. <https://doi.org/10.3390/buildings2040542>
- Smith, P., Powlson, D. S., Smith, J. U., Falloon, P., & Coleman, K. (2004). Meeting Europe’s climate change commitments: Quantitative estimates of the potential for carbon mitigation by agriculture. *Global Change Biology*, 6(4), 525–539.
- UNFCCC. (2015). *Paris Agreement*. United Nations Framework Convention on Climate Change
- Vargas, G. M. S. (2021). *Avaliação do ciclo de vida de um novo sistema de construção modular* [Dissertação de mestrado, Universidade Nova de Lisboa].
- Wiedmann, T., & Minx, J. (2007). A definition of carbon footprint. In C. C. Pertsova (Ed.), *Ecological economics research trends* (pp. 1–11). Nova Science Publishers.

- World Resources Institute, & World Business Council for Sustainable Development. (2004). *The greenhouse gas protocol: A corporate accounting and reporting standard* (Rev. ed.). WRI/WBCSD.
- World Resources Institute (WRI) & World Business Council for Sustainable Development (WBCSD). (2011). *Product Life Cycle Accounting and Reporting Standard*. Greenhouse Gas Protocol
- Wulf, C., & Schaltegger, S. (2016). Carbon footprinting in SMEs: Drivers, barriers and benefits. *Journal of Cleaner Production*, 112, 3523–3532.
- Zalando. (s.d.). *TWO SOON Regular Chino – Chinos – navy blazer*. Consultado em 29 de maio de 2026, em <https://www.zalando.pt/two-soon-hose-regular-chinos-navy-blazer-tws22e000-k11.html>

Anexos

O presente anexo apresenta os fatores de emissão utilizados nos cálculos da pegada de carbono dos quatro casos de estudo. As quantidades dos materiais e consumos encontram-se nos respetivos inventários; neste anexo são apresentados apenas os fatores de emissão, unidades, fontes utilizadas e possíveis observações.

Anexo 1 — Fatores de emissão utilizados nos casos de Estudo

Tabela 9 - Fatores de emissão utilizados no caso Oliveira & Fontes

Categoria	Fluxo/material	Fator de emissão	Unidade	Fonte
Fertilizante	Azoto (N)	1,71	kg CO ₂ eq/kg N	Lista 4C / Brentrup et al.
Fertilizante	P ₂ O ₅	1,01	kg CO ₂ eq/kg P ₂ O ₅	Lista 4C
Fertilizante	K ₂ O	0,58	kg CO ₂ eq/kg K ₂ O	Lista 4C
Pesticida	Substância ativa	25,50	kg CO ₂ eq/kg s.a.	Audsley et al. (2009)
Energia	Eletricidade	0,092	kg CO ₂ eq/kWh	APA (2025)
Combustível	Gasóleo	2,30	kg CO ₂ eq/L	Galp (2024)
Estrume	Estrume por kg de N	3,32	kg CO ₂ eq/kg N	Esteves & Pinto(2022)

Tabela 10 - Parâmetros metodológicos utilizados no caso Oliveira & Fontes

Categoria	Parâmetro	Valor	Unidade	Fonte/observação
Solo	Fator Tier 1 para emissões diretas de N ₂ O	0,01	kg N ₂ O-N/kg N aplicado	IPCC (2006)

Solo	Conversão de N ₂ O-N para N ₂ O	44/28	—	Conversão estequiométrica
Solo	GWP ₁₀₀ do N ₂ O	273	kg CO ₂ eq/kg N ₂ O	IPCC / McCarthy et al.
Estrume	Teor de N no estrume	2,5	kg N/t	Estrume bovino
Biomassa	Carbono na biomassa seca	50	%	Larcher (2003)
Biomassa	Carbono estabilizado no solo	33	%	Smith et al. (2004)

Tabela 11 - Fatores de emissão utilizados no caso RCM Etiquetas

Categoria	Fluxo/material	Fator de emissão	Unidade	Fonte
Matéria-prima	Substrato Fedrigoni	0,48	kg CO ₂ eq/m ²	Fornecedor Fedrigoni
Tintas	Tinta amarela	4,45	kg CO ₂ eq/kg	Ficha técnica
	Tinta ciano	4,45	kg CO ₂ eq/kg	Ficha técnica
	Tinta magenta	4,45	kg CO ₂ eq/kg	Ficha técnica
	Tinta preta	4,95	kg CO ₂ eq/kg	Fonte técnica
	Cor direta: vermelho	4,45	kg CO ₂ eq/kg	Ficha técnica
	Cor direta: castanho	4,45	kg CO ₂ eq/kg	Ficha técnica
Energia	Eletricidade	0,092	kg CO ₂ eq/kWh	APA (2025)
Água	Água/águas residuais	1,906	kg CO ₂ eq/m ³	INE/APA
Resíduos	Resíduos sólidos industriais	1108,91	kg CO ₂ eq/t	APA

Tabela 12 - Fatores de emissão utilizados no caso Pinha Mansa

Os fatores de emissão utilizados no caso da Pinha Mansa foram obtidos principalmente através da base de dados Ecoinvent. Foi aplicado o método ReCiPe 2016 v1.03, midpoint (H), considerando a categoria de alterações climáticas. A geografia, foi

selecionado datasets de Portugal, Europa ou Global conforme a disponibilidade e adequação do material.

Categoria	Fluxo/material	Dataset/fonte utilizada	Fator de emissão	Unidade
Tecido	Linho	Ecoinvent-market for flax fibre	1,1001	kg CO ₂ eq/kg
Tecido	Algodão	Ecoinvent-market for woven cotton textile	11,3561	kg CO ₂ eq/kg
Tecido	Elastano	Ecoinvent-market for synthetic fibre	5,1141	kg CO ₂ eq/kg
Aviamentos	Linha de costura	Ecoinvent-market for cotton yarn	8,0537	kg CO ₂ eq/kg
Aviamentos	Botões/polímero	Ecoinvent-market for polypropylene, granulate	5,8736	kg CO ₂ eq/kg
Aviamentos	Fecho/nylon	Ecoinvent-market for nylon 6/6	9,8154	kg CO ₂ eq/kg
Aviamentos	Gancho	Ecoinvent-market for steel, low-alloyed	2,0109	kg CO ₂ eq/kg
Aviamentos	Entretela/fita do có	Ecoinvent-market for polyester non-woven textile	6,5555	kg CO ₂ eq/kg
Energia	Eletricidade	APA	0,092	kg CO ₂ eq/kWh
Embalagem	Saco plástico/PE	Ecoinvent-market for polyethylene, low density, granulate	3,3588	kg CO ₂ eq/kg
Embalagem	Papel sulfite	Ecoinvent-market for paper, woodfree, uncoated	0,0742	kg CO ₂ eq/kg

Embalagem	Etiquetas	Ecoinvent-market for printed paper / paperboard	1,1673	kg CO ₂ eq/kg
Embalagem	Caixa de cartão	Ecoinvent-market for corrugated board box / recycled paperboard	1,1673	kg CO ₂ eq/kg

Tabela 13 - Fatores de emissão utilizados no caso Oficina de Janelas

No caso da Oficina de Janelas, os fatores de emissão dos materiais foram obtidos maioritariamente através da base de dados Ecoinvent. Para os materiais metálicos, plásticos, vedantes e pó de lacagem, foi utilizado o método ReCiPe 2016 v1.03, midpoint (H). A geografia dos datasets variou entre Global e Europa. Para o vidro, foram utilizados dados do fornecedor COVIPOR/Saint-Gobain, considerando os módulos A1-A3.

Categoria	Fluxo/material	Fonte/dataset	Fator de emissão	Unidade
Perfis	Alumínio lacado RAL 9005	Ecoinvent - market for aluminium, wrought alloy	14,25	kg CO ₂ eq/kg
Perfis	Latão	Ecoinvent - market for brass	5,8278	kg CO ₂ eq/kg
Lacagem	Pó de lacagem R9005	Ecoinvent - market for coating powder	6,52	kg CO ₂ eq/kg
Acessórios	Nylon/plástico	Ecoinvent - market for nylon 6	9,82	kg CO ₂ eq/kg
Acessórios	Alumínio	Ecoinvent - market for aluminium, wrought alloy	14,25	kg CO ₂ eq/kg
Acessórios	Inox/metal	Ecoinvent - market for steel, chromium steel 18/8	5,18	kg CO ₂ eq/kg

Vedantes	PVC	Ecoinvent - market for polyvinylchloride, suspension polymerised	2,95	kg CO ₂ eq/kg
Vedantes	Pelúcia	Ecoinvent - market for polypropylene, granulate	3,63	kg CO ₂ eq/kg
Vedantes	Borracha/EPDM	Ecoinvent - market for synthetic rubber	3,43	kg CO ₂ eq/kg
Vidro	Vidro duplo 38 mm 8+8 — cenário baixo	COVIPOR/Saint-Gobain	53	kg CO ₂ eq/m ²
Vidro	Vidro duplo 38 mm 8+8 — cenário alto	COVIPOR/Saint-Gobain	71	kg CO ₂ eq/m ²