



Estratégias de Mitigação de Impactes no Setor Automóvel - Revisão de Estudos de Avaliação de Ciclo de Vida

ANA RITA ALONSO DA SILVA PINTO DE OLIVEIRA

novembro de 2021



ESTRATÉGIAS DE MITIGAÇÃO DE IMPACTES NO SETOR AUTOMÓVEL – REVISÃO DE ESTUDOS DE AVALIAÇÃO DE CICLO DE VIDA

Ana Rita Alonso da Silva Pinto de Oliveira
1160603

2021

Instituto Superior de Engenharia do Porto
Departamento de Engenharia Mecânica





ESTRATÉGIAS DE MITIGAÇÃO DE IMPACTES NO SETOR AUTOMÓVEL – REVISÃO DE ESTUDOS DE AVALIAÇÃO DE CICLO DE VIDA

Ana Rita Alonso da Silva Pinto de Oliveira
1160603

Dissertação apresentada ao Instituto Superior de Engenharia do Porto para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Energias Sustentáveis, realizada sob a orientação da Doutora Nídia de Sá Caetano e da Doutora Helena Isabel Pereira Monteiro.

2021

Instituto Superior de Engenharia do Porto
Departamento de Engenharia Mecânica



JÚRI

Presidente

Doutor Manuel Carlos Malheiro de Carvalho Felgueiras
Professor Adjunto do Instituto Superior de Engenharia do Porto

Orientador

Doutora Nídia de Sá Caetano
Professora Coordenadora do Instituto Superior de Engenharia do Porto

Coorientador

Doutora Helena Isabel Pereira Monteiro
Investigadora III, Gestora de projeto, Unidade de Baixo Carbono e eficiência de Recursos,
I&D-i, ISQ

Supervisor

Eng^a Margarida Gonçalves
Investigadora II, Unidade de Baixo Carbono e eficiência de Recursos, I&D-i, ISQ

Arguente

Belmira de Almeida Ferreira Neto
Professor Auxiliar da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

AGRADECIMENTOS

A entrega desta dissertação, no contexto do Mestrado em Energia Sustentáveis, marca a conclusão do meu percurso académico, uma fase imprescindível da minha vida que me trouxe tanto conhecimento, alegria e sentimento de concretização. Porém, nada disto teria sido possível sem a intervenção e apoio de várias pessoas e entidades, às quais dirijo o meu mais sincero agradecimento.

Em primeiro lugar agradeço à empresa ISQ por me ter acolhido e me ter dado a oportunidade de realizar este estágio curricular, permitindo o enriquecimento dos meus conhecimentos e experiência a nível profissional e pessoal. Às minhas orientadoras no ISQ, Doutora Helena Monteiro, por todo o tempo despendido a esclarecer as minhas dúvidas e pela incansável orientação para que eu elaborasse o trabalho com todo o valor que atingiu e, Eng^a Margarida Gonçalves, por todas as recomendações e conhecimentos transmitidos, que permitiram guiar este estudo com a maior qualidade possível.

Ao Instituto Superior de Engenharia do Porto que foi a minha segunda casa e me proporcionou dos melhores momentos da minha vida, a todos os funcionários e, em especial, a todos professores que contribuíram para a conclusão desta etapa. À minha orientadora do estágio curricular, Doutora Nídia de Sá Caetano, por todas as soluções encontradas sempre que algum obstáculo surgiu e por todo o esforço dedicado a esta dissertação tendo em vista obter os melhores resultados.

A realização deste estágio, apesar de no momento ideal, deu-se num contexto pandémico que veio a dificultar todo o processo. Desta forma deixo um agradecimento especial a todos, em particular, às minhas orientadoras que tornaram todo o percurso à distância o mais natural possível permitindo-me ter todo o apoio.

Aos meus amigos que, todos os dias, se tornaram a companhia que precisei, sempre prontos a estender a mão e incentivarem o melhor de mim sendo, em parte, responsáveis pela minha motivação para a conclusão desta etapa, obrigada, Ângela Costa, André Pedrosa e Daniel Ricardo. Um obrigado também à Inês Casal e Carolina Soares que recentemente se tornaram um apoio especial.

O maior dos agradecimentos vai para a minha família que sempre caminhou a meu lado. Obrigada à minha prima, Inês Alonso, por ter sido das primeiras pessoas a chegar-se à frente quando precisei de apoio. Aos meus pais por terem tornado esta e todas as caminhadas possíveis, por todo o apoio e todo o amor, mesmo nos momentos mais difíceis, e por terem feito de mim a pessoa que sou hoje. Ao meu irmão por todos os bons momentos que me proporcionou com a sua boa disposição infindável e por me ajudar a relativizar todos os obstáculos que surgiram na minha vida. Aos meus avós, por tudo o que me ensinaram e pela forma que ainda me influenciam estando presentes em todas as decisões que tomo.

Muito obrigada a todos!

A Prof.^a Nídia de Sá Caetano, orientadora desta dissertação, é membro integrado do LEPABE – Laboratório de Engenharia de Processos, Ambiente Biotecnologia e Energia, financiado pela Unidade de Investigação UID/EQU/00511/2020 - Laboratório de Engenharia de Processos, Ambiente, Biotecnologia e Energia – LEPABE - financiado por fundos nacionais através da FCT/MCTES (PIDDAC).

A dissertação está alinhada com o projeto PAC - *Portugal AutoCluster for the Future* (POCI-01-0247-FEDER-046095), EU H2020 *Research and Innovation Programme*, GA: “No. 810764”. O trabalho foi realizado no ISQ na unidade I&D-i de *Baixo Carbono & Eficiência Energética* do ISQ, pertencente à unidade de I&D em Análise de Ciclo de Vida de Produtos e Componentes Industriais Soldados (ISQ).



PALAVRAS-CHAVE

avaliação de ciclo de vida; consumo primário de energia; materiais leves; potencial de aquecimento global; setor automóvel; sistema de propulsão

RESUMO

A presente dissertação representa o trabalho desenvolvido na empresa ISQ (Instituto de Soldadura e Qualidade), em conjunto com o ISEP, no contexto da unidade curricular Dissertação/Projeto/Estágio do Mestrado em Energias Sustentáveis.

O foco desta dissertação foi o estudo de medidas que permitam a mitigação das alterações climáticas originadas pelo setor automóvel, sendo este setor um dos maiores responsáveis pelas emissões de gases com efeito de estufa (GEE). Foram estudadas três estratégias com potencial de redução dos impactes ambientais: seleção do sistema de propulsão, aplicação de materiais leves e cenários de fim-de-vida (FdV). Para isto foi conduzida uma revisão sistemática da literatura relativa ao setor automóvel que aplicasse a avaliação de ciclo de vida (ACV) a pelo menos uma das três estratégias mencionadas, segundo uma das duas categorias de impacte: consumo primário de energia (CPE) e potencial de aquecimento global (PAG). O valor desta dissertação encontra-se, sobretudo, na análise simultânea de diferentes artigos com diferentes características, ultrapassando obstáculos, como: diferentes casos de estudo, distância percorrida, cenários de FdV, limitações do sistema e diferente formatação de resultados. Desta forma, é possível identificar as opções mais benéficas e mais prejudiciais no ciclo de vida (CV) do veículo e quais os pontos sensíveis em cada estratégia, disponibilizando impactes quantificados que podem vir a ser aplicados noutros estudos, dados estes difíceis de encontrar sistematizados na literatura.

O sistema de propulsão demonstra como as alternativas eletrificadas têm potencial na redução de impactes, principalmente, na fase de utilização. Contudo, a sua etapa produtiva, contrariamente aos convencionais, tem associados elevados impactes, devendo-se isto, sobretudo, às baterias de íão lítio (Li-ion) onde as alternativas 100% eletrificadas apresentam os maiores impactes. Conclui-se que quanto maior a distância percorrida, maiores as vantagens ambientais associadas à utilização das opções eletrificadas relativamente às opções convencionais. Os aspetos mais sensíveis identificados incluem o *mix* energético do país onde é realizado o estudo, modo de obtenção do hidrogénio (H₂) para as alternativas movidas a H₂, fator de utilidade (FU) dos veículos híbridos *plug-in* e combustível utilizado para os veículos que o utilizam, devendo priorizar-se os biocombustíveis relativamente ao gás natural, gasolina e diesel.

Os materiais leves também apresentam potencial relativamente aos convencionais/pesados, contudo nem sempre os superam. Isto deve-se a quão intensiva é a sua fase de produção, que, por exemplo, para os compósitos inibe o seu bom desempenho na fase de utilização, enquanto os materiais convencionais apresentam impactes significativamente inferiores. No entanto, os materiais alternativos não só têm uma fase

de utilização bastante menos intensiva, como também alcançam compensações superiores no FdV. Também nesta estratégia o aumento da distância percorrida, provoca uma melhoria no desempenho das alternativas inovadoras. Os aspetos que merecem uma atenção especial na aplicação de materiais alternativos compreendem: redimensionamento do sistema de propulsão, reduções secundárias de massa, abordagem ACV selecionada, contexto/país onde são produzidos os materiais, incorporação de materiais secundários na produção de componentes e cenários de FdV aplicados.

A análise da estratégia de FdV permitiu reforçar a potencialidade dos materiais alternativos nesta etapa relativamente aos convencionais. Os impactes para cada material dependem consideravelmente do cenário de FdV selecionado, verificando-se uma elevada amplitude nos resultados obtidos. Parâmetros como a inclusão de material biológico e reciclado na produção dos componentes e abordagem selecionada para a ACV também afetam os impactes quantificados. A análise desta estratégia permite concluir que a melhor alternativa acaba por depender mais do cenário de FdV do que do material selecionado.

A etapa de produção das alternativas inovadoras, tanto para o sistema de propulsão como para os materiais leves, deve ser um tema a expandir de forma a desenvolver tecnologias que permitam a redução dos seus impactes ambientais. Também a identificação dos melhores contextos para utilização de determinados sistemas de propulsão e produção de certos materiais alternativos deve ser efetuada. As tecnologias de FdV comprovaram a elevada influência no ciclo de vida total dos componentes, merecendo assim ser estudadas no âmbito da economia circular, desenvolvendo procedimentos avançados com potencial de redução nos impactes.

O ideal seria a implementação das três estratégias em simultâneo, sendo benéfico, para isto, um estudo da perspetiva de CV de um veículo onde estas fossem aplicadas. Aqui seria considerada a combinação de diferentes tecnologias, avaliando diferentes caminhos e respetivas compatibilizações de alternativas entre estratégias que permitissem as maiores reduções nos impactes ambientais no CV do veículo.

A nível nacional deve ser estudado e aprofundado o promissor *mix* energético que identifica Portugal como um bom contexto para implementação das tecnologias eletrificadas, mitigando assim os impactes ambientais associados ao setor automóvel. Para além disto, deve ser analisada a margem de crescimento de Portugal na produção automóvel, dada a sua dimensão neste âmbito e, por isso, responsabilidade associada.

KEYWORDS

automotive sector; global warming potential; life cycle assessment; lightweighting materials; primary energy demand; propulsion system

ABSTRACT

The present dissertation represents the work developed in the organization ISQ (Instituto de Soldadura e Qualidade), together with ISEP, in the context of the discipline Dissertation/Project/Internship in its Master's Degree in Sustainable Energies.

The focus of this dissertation was the study of measures allowing the mitigation of climate change through the automotive sector, this sector being one of the most responsible for the greenhouse gases emissions (GHG). Three strategies with the potential of reducing environmental impacts were studied: propulsion systems selection, lightweighting materials application and end-of-life (EoL) scenarios. For this, a systematic literature review, existent in the automotive sector applying a life cycle assessment (LCA), was conducted, according to one of the two impact categories: primary energy demand (PED) and global warming potential (GWP). The relevance of this dissertation finds itself, mainly, in the simultaneous analysis of several articles with different features that in another way would not be possible, overcoming obstacles, as, different case studies, distances travelled, EoL scenarios, system limitations and different format of results. This way, it was possible to identify the most beneficial and most prejudicial options to the vehicle's life cycle (LC) and sensitive aspects in each strategy, providing quantified impacts that can be applied in other studies and that are difficult to find systematized in the literature.

The propulsion system demonstrates the potential electrified alternatives have to reduce impacts, especially, in the use phase. However, its productive stage, contrarily to the conventional ones, has associated high impacts, which is mainly due to the lithium-ion (Li-ion) batteries, where the 100% electrified alternative showed the highest impacts. It could be concluded that the higher the distance travelled, the higher the environmental advantages associated to the utilization of the electrified options, relatively to the conventional ones. The most sensitive aspects identified include the energy mix of the country where the study was conducted, method of hydrogen (H₂) production for the alternatives powered on H₂, utility factor (UF) of plug-in hybrid vehicles and fuel used for combustion engine vehicles, where biofuels must be prioritized relatively to natural gas, gasoline and diesel.

Lightweighting materials also present potential when compared to the conventional/heavy ones, however not always overcome them. This is due to how intensive is its production phase. An example is that composite material inhibits its good performance in the use phase, while conventional materials present significantly lower impacts. Nevertheless, alternative materials not only have a use phase considerably less intensive, but also achieve higher offsets in the EoL. In this strategy, the increase of

distance travelled also leads to an improvement of the performance of the innovative alternatives. The aspects that deserve a special attention in the application of lightweighting materials include: resizing of the propulsion system, secondary mass reductions, LCA selected approach, context/country where the materials are produced, incorporation of secondary materials in the components manufacture and EoL scenarios applied.

The analysis of EoL strategy enabled the reinforcement of the potential of alternative materials in this stage relatively to the conventional ones. The impacts for each material considerably depend on the selected EoL scenario, showing a high range in the obtained results. Parameters including inclusion of biological and secondary material in the components manufacture and LCA selected approach also affect the quantified impacts. The analysis of this strategy allows to conclude that the best alternative tends to depend more on the EoL scenario than on the material selected.

The production stage of innovative alternatives, both for the propulsion system and lightweighting materials, must be a subject to expand in order to develop technologies allowing the reduction of its environmental impacts. Also, the identification of the best contexts for the use of determined propulsion systems and production of certain alternative materials must be undertaken. The EoL technologies demonstrate a high influence in the total component's LC, making it worth being studied through the circular economy scope, developing advanced procedures with potential for impacts reduction.

The ideal path would be the implementation of the three strategies simultaneously, making it beneficial, at this level, the study, in a LC perspective, of a vehicle where they were applied. Here, it would be considered a combination of different technologies, evaluating different pathways and respective compatibilities of alternatives among strategies, allowing the highest reductions of environmental impacts in the vehicle LC.

At a national level, the promising energetic mix that identifies Portugal as a good context to implement the electrified technologies, must be studied and deepened, this way mitigating the environmental impacts associated with the automotive sector. In addition, the Portugal leeway growth in the automotive production should be analysed, given its dimension in this ambit and, therefore, associated responsibility.

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

Lista de Siglas

ACV	Avaliação do Ciclo de Vida
AHSS	Aço Avançado de Elevada Resistência / <i>Advanced High-Strength Steel</i>
Al	Alumínio
BEV	Veículo Elétrico / <i>Battery Electric Vehicle</i>
BiW	Carroçaria / <i>Body-in-White</i>
CAI	Alumínio Fundido / <i>Cast Aluminium</i>
CCI	Ferro Fundido Convencional / <i>Conventional Cast Iron</i>
CE	Comissão Europeia
CF	Fibras de Carbono / <i>Carbon Fibers</i>
CFRP	Polímero Reforçado por Fibras de Carbono / <i>Carbon Fibers Reinforced Polymer</i>
CO ₂	Dióxido de Carbono
CPE	Ciclo Primário de Energia
UE	União Europeia
UE-27 / UE - 28	União Europeia – 27 / União Europeia – 28
EUA	Estados Unidos de América
FCV	Veículo Movido a Hidrogénio / <i>Fuel Cell Vehicle</i>
FdV	Fim-de-Vida
FU	Fator de Utilidade
GEE	Gases com Efeito de Estufa
GF	Fibras de Vidro / <i>Glass Fibers</i>
GFRP	Polímero Reforçado por Fibras de Vidro / <i>Glass Fibers Reinforced Polymer</i>
H ₂	Hidrogénio
HEV	Veículo Híbrido / <i>Hybrid Electric Vehicle</i>
HSS	Aço de Elevada Intensidade / <i>High-Strength Steel</i>
I&D	Investigação e Desenvolvimento
ICEV	Veículo Convencional / <i>Internal Combustion Engine Vehicle</i>
ISQ	Instituto de Soldadura e Qualidade
Li-ion	Ião Lítio / <i>Lithium-Ion</i>
LFP	Fosfato de Lítio e Ferro / <i>Lithium Iron Phosphate</i>
Mg	Magnésio
NMC	Óxido de Lítio Níquel Manganês Cobalto / <i>Lithium Nickel Manganese Cobalt Oxide</i>
PAG	Potencial de Aquecimento Global
PHEV	Veículo Híbrido Plug-In / <i>Plug-In Hybrid Vehicle</i>
PHFCV	Veículo Híbrido Plug-In Movido a Hidrogénio / <i>Plug-In Hybrid Fuel Cell Vehicle</i>
PNEC	Plano Nacional de Energia e Clima

rCF	Fibras de Carbono Recicladas / <i>Recycled Carbon Fibers</i>
rCFRP	Polímero Reforçado por Fibras de Carbono Recicladas / <i>Recycled Carbon Fibers Reinforced Polymer</i>
SUV	Veículo Utilitário Desportivo / <i>Sport Utility Vehicle</i>
TWDCI	Ferro Dúctil Fundido com Parede Fina / <i>Thin Wall Ductile Cast Iron</i>
vCFRP	Polímero Reforçado por Fibras de Carbono Virgens / <i>Virgin Carbon Fibers Reinforced Polymer</i>

Lista de Unidades

g CO ₂ /km	gramas de CO ₂ por quilómetro
GJ	giga joule
kg	quilograma
kg CO ₂ -eq	quilograma de CO ₂ equivalente
kg CO ₂ -eq/kg	quilograma de CO ₂ equivalente por quilograma
km	quilómetro
MJ	mega joule
MJ/kg	mega joule por quilograma

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. HIERARQUIA PARA PROCESSAMENTO DE VEÍCULOS EM FDV [21].	16
FIGURA 2. FASES DE VIDA DO OBJETO DE ESTUDO AVALIADO ATRAVÉS DE ACV. FONTE (USEPA 2001)..	21
FIGURA 3. DISTRIBUIÇÃO DAS PALAVRAS-CHAVE COM ADAPTAÇÃO NOS 220 ARTIGOS RECOLHIDOS, ATRAVÉS DA FERRAMENTA VOSVIEWER.....	25
FIGURA 4. CPE DOS ARTIGOS PARA A ESTRATÉGIA DE SISTEMA DE PROPULSÃO	38
FIGURA 5. PAG DOS ARTIGOS PARA A ESTRATÉGIA DE SISTEMA DE PROPULSÃO	42
FIGURA 6. CPE DOS ARTIGOS PARA A ESTRATÉGIA DE MATERIAIS LEVES (100 KG - 436 KG).....	56
FIGURA 7. CPE DOS ARTIGOS PARA A ESTRATÉGIA DE MATERIAIS LEVES (6 KG - 38 KG).....	58
FIGURA 8. CPE DOS ARTIGOS PARA A ESTRATÉGIA DE MATERIAIS LEVES (0,3 KG - 0,8 KG)	60
FIGURA 9. PAG DOS ARTIGOS PARA A ESTRATÉGIA DE MATERIAIS LEVES (100 KG - 436 KG)	61
FIGURA 10. PAG DOS ARTIGOS PARA A ESTRATÉGIA DE MATERIAIS LEVES (6 KG - 38 KG).....	62
FIGURA 11. PAG DOS ARTIGOS PARA A ESTRATÉGIA DE MATERIAIS LEVES (0,3 KG - 0,8 KG)	63
FIGURA 12. ANÁLISE DO CPE PARA A ESTRATÉGIA DE MATERIAIS LEVES POR ARTIGO POR KG DE MATERIAL	71
FIGURA 13. ANÁLISE DO PAG PARA A ESTRATÉGIA DE MATERIAIS LEVES POR ARTIGO POR KG DE MATERIAL	71
FIGURA 14. CPE DOS ARTIGOS PARA A ESTRATÉGIA DE FDV POR ARTIGO (100 KG – 518 KG).....	73
FIGURA 15. CPE DOS ARTIGOS PARA A ESTRATÉGIA DE FDV POR ARTIGO (6 KG – 38 KG)	74
FIGURA 16. CPE DOS ARTIGOS PARA A ESTRATÉGIA DE FDV POR ARTIGO (SEM FASE DE UTILIZAÇÃO) ...	76
FIGURA 17. PAG DOS ARTIGOS PARA A ESTRATÉGIA DE FDV POR ARTIGO (100 KG - 518 KG).....	76
FIGURA 18. PAG DOS ARTIGOS PARA A ESTRATÉGIA DE FDV POR ARTIGO (6 KG - 38 KG)	77
FIGURA 19. PAG DOS ARTIGOS PARA A ESTRATÉGIA DE FDV POR ARTIGO (SEM FASE DE UTILIZAÇÃO) ..	78
FIGURA 20. ANÁLISE DO CPE PARA A ESTRATÉGIA DE FDV POR ARTIGO POR KG DE MATERIAL	79
FIGURA 21. ANÁLISE DO PAG PARA A ESTRATÉGIA DE FDV POR ARTIGO POR KG DE MATERIAL	79

ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 1. MATERIAIS LEVES E RESPECTIVO POTENCIAL DE REDUÇÃO NO PESO DO VEÍCULO [18].....	14
TABELA 2. EQUAÇÃO DE PESQUISA, CAMPOS DE PREENCHIMENTO E ARTIGOS RECOLHIDOS NOS MOTORES DE BUSCA <i>SCIENCEDIRECT</i> E <i>SPRINGERLINK</i>	23
TABELA 3. ARTIGOS RECOLHIDOS NOS RESPECTIVOS MOTORES DE BUSCA E NÚMERO FINAL APÓS REVISÃO SISTEMÁTICA NO <i>RAYYAN</i>	24
TABELA 4. ARTIGOS SELECIONADOS APÓS SERIAÇÃO NA FERRAMENTA <i>MENDELEY</i> PARA CADA ESTRATÉGIA E INDICADORES AVALIADOS	26
TABELA 5. DESCRIÇÃO DAS ALTERNATIVAS ESTUDADAS PARA A ESTRATÉGIA DE SISTEMA DE PROPULSÃO	28
TABELA 6. DESCRIÇÃO DAS ALTERNATIVAS ESTUDADAS PARA A ESTRATÉGIA DE MATERIAIS LEVES E FDV	30
TABELA 7. IMPACTE DE DISTRIBUIÇÃO E TRANSPORTE DE VEÍCULOS PARA A ESTRATÉGIA DE SISTEMA DE PROPULSÃO	47
TABELA 8. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DO CPE EM GJ COM VARIAÇÃO DA DISTÂNCIA PERCORRIDA PARA OS ARTIGOS DE SISTEMA DE PROPULSÃO	49
TABELA 9. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DO PAG EM KG CO ₂ -EQ COM VARIAÇÃO DA DISTÂNCIA PERCORRIDA PARA OS ARTIGOS DE SISTEMA DE PROPULSÃO	52
TABELA 10. CATEGORIZAÇÃO DOS ARTIGOS PARA MATERIAIS LEVES EM FUNÇÃO DO SEU PESO	56
TABELA 11. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DO CPE EM GJ COM VARIAÇÃO DA DISTÂNCIA PERCORRIDA PARA OS ARTIGOS DE MATERIAIS LEVES	65
TABELA 12. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DO PAG EM KG CO ₂ -EQ COM VARIAÇÃO DA DISTÂNCIA PERCORRIDA PARA OS ARTIGOS DE MATERIAIS LEVES	68
TABELA 13. CATEGORIZAÇÃO DOS ARTIGOS PARA FDV EM FUNÇÃO DO SEU PESO/A NÁLISE	72

ÍNDICE

1.	INTRODUÇÃO.....	3
1.1	Enquadramento geral.....	3
1.2	Objetivos da dissertação.....	3
1.3	A Empresa ISQ.....	4
1.4	Conteúdo da dissertação	5
2.	SETOR AUTOMÓVEL.....	9
2.1	Situação atual	9
2.2	Estratégias de mitigação	12
2.2.1	Sistema de propulsão.....	12
2.2.2	Materiais leves	14
2.2.3	Fim-de-Vida.....	15
2.3	Contributo da Dissertação.....	17
3.	METODOLOGIA.....	21
3.1	Avaliação de Ciclo de Vida.....	21
3.2	Revisão da literatura.....	23
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	37
4.1	Sistema de propulsão	37
4.1.1	Análise de Sensibilidade	47
4.2	Materiais leves.....	55
4.2.1	Análise de Sensibilidade	65
4.2.2	Análise Complementar.....	70

4.3	Fim-de-Vida	72
4.3.1	Análise Complementar	79
5.	CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	85
5.1	Conclusões.....	85
5.2	Sugestões de trabalhos futuros	88
6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	91
7.	ANEXOS.....	99
ANEXO A.	SISTEMA DE PROPULSÃO	99
ANEXO B.	MATERIAIS LEVES.....	102
ANEXO C.	FIM-DE-VIDA	107
ANEXO D.	<i>EXTENDED ABSTRACT</i>	112

INTRODUÇÃO

- 1.1 Enquadramento Geral
- 1.2 Objetivos da Dissertação
- 1.3 A Empresa ISQ
- 1.4 Conteúdo da Dissertação

1. INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento geral

A presente dissertação resulta do trabalho de investigação desenvolvido no estágio curricular realizado na unidade de baixo carbono e eficiência de recursos inserida no departamento de I&D (Investigação e Desenvolvimento), da delegação Norte da empresa ISQ – Instituto de Soldadura e Qualidade, em Grijó. A duração do estágio curricular foi de nove meses e meio, tendo tido início no dia 15 de dezembro de 2020 e fim no dia 30 de setembro de 2021.

O estudo desenvolvido por meio deste estágio curricular motivou a participação na conferência ICEER 2021 – “*The 8th International Conference on Energy and Environmental Research*”, decorrida entre 13 e 17 de setembro de 2021, com a submissão de um artigo e publicação de um *extended abstract* denominados “*Life cycle energy of vehicles on lightweighting and alternative powertrain strategies – a Review*”. Este trabalho foi apresentado oralmente no dia 15 de setembro na referida conferência, e resultou num artigo científico submetido na revista *Energy Reports (Elsevier)*, com os seguintes coautores: Helena Monteiro, Rita Alonso, Margarida Gonçalves, Muriel Iten e Nídia de Sá Caetano. O *extended abstract* publicado no livro de *Extended Abstracts* da conferência encontra-se em anexo.

1.2 Objetivos da dissertação

O trabalho desenvolvido teve como tema “Estratégias de Mitigação de Impactes no Setor Automóvel – Revisão de Estudos de Avaliação de Ciclo de Vida”, sendo que o seu objetivo principal consistiu numa revisão da literatura relativa ao setor automóvel. Esta literatura abrangeu um conjunto de artigos científicos que aplicassem o conceito de avaliação de ciclo de vida (ACV) neste âmbito.

Este setor foi já identificado como um dos grandes contribuidores para o aquecimento global, devido à intensidade das emissões de gases com efeito de estufa (GEE) e elevado consumo energético, levando à necessidade de medidas de mitigação aplicáveis neste domínio. Numa análise inicial da literatura recolhida, assim como, através do estudo da legislação em vigor, foram identificadas três estratégias com potencial de melhoria da sustentabilidade no setor automóvel, nas quais este estudo se focou: utilização de diferentes sistemas de propulsão, aplicação de materiais leves aos veículos e diferentes métodos de fim-de-vida (FdV) a que o veículo é sujeito. Foram selecionados dois dos

indicadores mais utilizados em estudos de ACV: consumo de energia primária (CEP) e potencial de aquecimento global (PAG).

A ferramenta ACV que tem vindo a ser aplicada ao setor automóvel, analisa e compara os impactes associados às diferentes alternativas existentes dentro de cada uma destas estratégias. Este método permite, então, identificar as alternativas capazes de maiores benefícios no ciclo de vida (CV) total do veículo, tendo em conta os impactes ambientais associados. Contudo, a interpretação dos resultados e delineação de conclusões considerando vários estudos de ACV é dificultada dada a divergência das características de cada estudo, entre as quais, o caso de estudo ou a unidade funcional, a distância percorrida, os cenários de FdV considerados e as limitações do sistema. Para além destas divergências, a forma de exposição dos resultados também varia na forma da sua apresentação: gráficos, tabelas, texto ou figuras. Deste modo, a dissertação faz o levantamento da literatura existente realizando uma revisão sistemática a diferentes artigos científicos que apliquem a ACV a pelo menos uma das três estratégias mencionadas (sistema de propulsão, materiais leves ou cenários de FdV), possibilitando uma comparação lógica entre estes. Esta comparação vai permitir a identificação das opções benéficas, assim como as mais prejudiciais em cada estratégia, permitindo também reconhecer quais os aspetos mais sensíveis em cada uma, e que têm maior influência nos impactes ambientais obtidos. Adicionalmente, a dissertação também sistematiza informação difícil de encontrar e que pode, posteriormente, ser aplicada em diferentes estudos e artigos.

1.3 A Empresa ISQ

O ISQ é uma entidade privada e independente fundada em 1965. Esta empresa estava primeiramente orientada para a soldadura no setor da construção que, na altura, era considerada uma tecnologia essencial e inovadora para o desenvolvimento e melhoria da indústria nacional. No princípio da década de 1980, a empresa expandiu a sua área de atividade ao incluir diversos setores nos serviços prestados e atualmente trabalha em áreas como, engenharia, consultoria, inspeção, ensaios e atividades de I&D e inovação. Através da aplicação destes serviços garante apoio empresarial através da promoção da qualidade dos seus serviços, produtos, processos e instalações, assegurando o reconhecimento, competitividade e inovação [1].

A missão do ISQ tem por base a promoção da melhoria contínua, inovação e segurança, nos serviços e indústria. Garante a presença no exterior de Portugal através do estabelecimento de relações internacionais e assegura o desenvolvimento e sustentabilidade dos seus colaboradores. Esta empresa visa ser reconhecida como uma organização tecnológica independente, presente a nível internacional, com uma contínua diversificação e inovação, ao desenvolver e oferecer serviços independentes e abrangentes, operando sempre do modo mais eficiente possível. O ISQ garante que os seus serviços prestados se apoiam nos valores estabelecidos, valores estes que incluem

competência e rigor no atendimento prestado, assim como, integridade na sua atuação e relações, independência e inovação contínua [1].

A área de trabalho do ISQ é variada e diversificada, fornecendo serviços aos seus clientes e auxiliando em setores, como:

- Acesso a mercados;
- Controlo de custos;
- Licença para operar;
- Inovação acelerada;
- Segurança e fiabilidade;
- Reputação da marca [1].

O departamento de I&D, onde se inseriu o estágio curricular realizado, já participou em mais de 500 projetos em todo o mundo desde a década de 1980. Esta área é considerada uma área chave para o ISQ, baseando-se na antecipação prévia das necessidades empresariais e desenvolvimento de soluções inovadoras, fundamentando-se em: instalações adequadas, equipamento tecnologicamente avançado e recursos humanos de elevada qualidade. Através da colaboração entre mais de 1200 parceiros em Portugal e a nível internacional, seja no meio industrial ou académico, o ISQ procura a introdução da tecnologia na indústria, promovendo atividades mais sustentáveis e melhoria empresarial. No ranking realizado anualmente relativo às empresas com mais gastos em atividades de I&D em Portugal, divulgado pelo Gabinete de Planeamento, Estratégia, Avaliação e Relações Internacionais, o ISQ, entre 2007 e 2009, ficou posicionado entre os 50 primeiros, onde o investimento médio esteve próximo dos 5 milhões de euros. Em 2021, o ISQ foi também distinguido como *Superbrand Corporate* pela *Superbrands Portugal* através da avaliação do índice de relevância e reputação, sendo que as *Superbrand Corporates* são marcas referenciadas espontaneamente e consideradas relevantes na perspetiva de negócio, de forma a esclarecer a relevância desta distinção, a *Superbrands* é uma organização internacional independente, atuando em 89 países, e que tem como objetivo a identificação e promoção de marcas de excelência [1].

O ISQ tem vindo a crescer com uma participação cada vez mais ativa e sustentada no mundo, estando presente em 12 países, com 13 empresas sediadas em Portugal e 16 laboratórios acreditados. O ISQ, a nível nacional, presta mais de 250 serviços especializados com 1700 colaboradores em todo o mundo, dos quais 800 se encontram empregados em Portugal. A sua área de formação já abrangeu mais de 20000 cursos de formação até hoje. Em Portugal, o ISQ já foi alvo de mais de 76 creditações, notificações e reconhecimentos, enquanto internacionalmente atingiu mais de 50 [1].

1.4 Conteúdo da dissertação

A presente dissertação divide-se em cinco capítulos.

O presente capítulo descreve o contexto e objetivos do estudo desenvolvido, e apresenta a empresa onde foi realizado o estágio curricular.

O segundo capítulo aborda a situação atual das alterações climáticas e consumos energéticos na União Europeia (UE) e em Portugal, identifica o papel do setor automóvel no contexto atual, seguindo-se a apresentação da legislação e metas estabelecidas para mitigação destas alterações. Ainda neste capítulo são descritas as estratégias consideradas mais eficazes na redução de impactes ambientais.

A metodologia, presente no terceiro capítulo, começa por esclarecer a aplicação da metodologia de ACV para comparação das alternativas e estratégias consideradas e, posteriormente, as condições aplicadas na recolha da literatura a ser revista e respetivos motivos de exclusão. Ainda neste ponto também é descrita a forma como a informação relevante de cada artigo foi reunida e categorizada tendo em conta a estratégia em questão, assim como as análises aplicadas a cada uma.

O quarto capítulo apresenta os resultados obtidos, compilados em gráficos e tabelas onde é feita também a discussão tendo por base esse conteúdo, estando ele dividido pelas três estratégias.

Por fim, no quinto capítulo, são delineadas conclusões com base nos resultados obtidos e identificadas as áreas que podem vir a ser exploradas no sentido de auxiliar na seleção das melhores alternativas para cada situação, promovendo a redução dos impactes ambientais.

Após a listagem das referências bibliográficas, encontram-se os anexos, onde são especificados dados e impactes separados por estratégia de mitigação. O anexo A corresponde à seleção do sistema de propulsão, o anexo B à aplicação de materiais leves e o anexo C aos cenários de FdV. Fechando este capítulo, no anexo D, encontra-se o *extended abstract* submetido para a participação na conferência ICEER 2021, em Setembro deste ano.

SETOR AUTOMÓVEL

- 2.1 Situação Atual
- 2.2 Estratégias de Mitigação
- 2.3 Análise de Ciclo de Vida

2. SETOR AUTOMÓVEL

2.1 Situação atual

Atualmente, um dos maiores desafios enfrentados pela comunidade global é o combate às alterações climáticas, responsáveis pelo aumento global da temperatura do planeta, pelo degelo, e pela subida dos níveis dos oceanos, e consequente ocorrência de fenómenos climáticos extremos (ex.: secas e cheias) cada vez mais frequentes, que afetam os ecossistemas e a vida humana. A poluição atmosférica é a principal fonte responsável pelas alterações climáticas, devendo-se às emissões com elevadas concentrações de GEE [2].

A produção e consumo energético têm uma relação estreita com os impactes negativos sobre o meio ambiente. Isto deve-se, principalmente, à sua contribuição para a emissão de GEE, nomeadamente o dióxido de carbono (CO₂), gerado durante a queima de combustíveis fósseis, sendo que a produção e consumo energético são responsáveis por cerca de 75% das emissões de GEE [2,3]. Ainda que haja um empenho associado à exploração de energias renováveis e respetivas melhorias, Portugal mantém-se bastante dependente de outros países relativamente à produção energética [3]. O potencial de emissão de CO₂ e o consumo energético são dois fatores preponderantes que devem ser alvo de estudo de forma a combater com o maior sucesso possível as alterações climáticas. O alcance de reduções nestas categorias de impacte permite mitigar as consequências negativas que têm vindo a pressionar o meio ambiente [2,3].

Os GEE têm origem nos mais variados setores aos quais recorreremos no dia-a-dia, entre os quais: indústria energética, construção, habitação, comercial, agroalimentar, processos industriais, desperdícios e transportes. Em 2018, o setor dos transportes foi responsável por cerca de 25% das emissões de GEE na União Europeia 27 (UE-27), sendo que esta percentagem em Portugal foi superior: 30%. Dentro das diferentes formas de mobilidade incluídas no setor dos transportes, o setor automóvel rodoviário é o principal responsável pela poluição atmosférica representando 72% das emissões dos transportes para a UE-27 em 2018. Em Portugal esta percentagem desce para 68% [4].

O setor da mobilidade está também associado a elevados consumos energéticos, os quais são responsáveis pelas alterações climáticas e poluição atmosférica. Na UE-27, em 2018, os transportes eram responsáveis por 31% da energia final consumida, dos quais 96% se deviam aos veículos motorizados. Em Portugal, os impactes dos transportes são mais elevados, sendo responsáveis por 36% da energia final consumida, sendo que relativamente a este consumo 94% provém do transporte rodoviário [4].

Aos impactes negativos citados anteriormente acresce que, o transporte rodoviário tem vindo a crescer ano após anos. Entre 2000 e 2018 o transporte de passageiros e mercadorias aumentou, respetivamente, 0,9 e 1%. De 2017 a 2018, o crescimento registado foi mais acentuado, 1,3% para transporte de passageiros e 1,8% para transporte de mercadorias [4].

Tendo em conta os dados recolhidos relativamente ao setor dos transportes, o setor automóvel rodoviário mostra um grande potencial na mitigação das alterações climáticas, com uma grande margem de redução dos consumos energéticos e emissão de GEE. Os impactes ambientais aliados à crescente procura por veículos tornam necessária a implementação de medidas regulamentares mais exigentes.

A UE tem como objetivo tornar-se climaticamente neutra até ao ano de 2050, baseando-se numa economia com zero emissões de GEE. O Pacto Ecológico Europeu tem este objetivo como princípio central, e encontra-se alinhado com o compromisso acordado pela UE no Acordo de Paris. Este pacto visa transformar a Europa de forma a eliminar as emissões de GEE em 2050 e a quebrar a ligação entre desenvolvimento económico e exploração de recursos naturais, impedindo em simultâneo que alguma região seja deixada para trás. O Pacto Ecológico Europeu tem incluídas, em vários domínios, estratégias de intervenção, entre as quais está a estratégia para a mobilidade sustentável e inteligente [5]. Esta estratégia assenta em três pilares, a saber: 1) mobilidade inteligente, 2) segura e 3) sustentável, onde a vertente sustentável inclui o estabelecimento das seguintes medidas:

1. Veículos de zero emissões, assim como combustíveis renováveis e de baixo carbono e infraestruturas relacionadas;
2. Criar portos e aeroportos de *emissões zero*;
3. Tornar a mobilidade urbana e interurbana mais sustentável e saudável;
4. Tornar o transporte de mercadorias mais ecológico;
5. Aumentar as taxas de carbono e atribuir incentivos aos utilizadores [6].

Para que fosse possível atingir os objetivos estabelecidos para 2050, a UE-27 comprometeu-se a reduzir as emissões até, pelo menos, 55% em 2030, comparativamente aos valores de 1990. A Comissão Europeia (CE) divulgou a legislação “Energia Limpa para todos os Europeus” no sentido de apoiar a tão necessária transição energética entre 2021 e 2030, pretendendo cumprir o Acordo de Paris e promover o crescimento económico e de emprego. Desta forma, neste pacote ficou estabelecido que todos os países integrantes da UE-27 concebessem um Plano Nacional Integrado de Energia e Clima (PNEC). Este plano deve ter incluídas as metas relativas à emissão de GEE, utilização de energias renováveis, eficiência e segurança energética, mercado interno e investigação, competitividade e inovação, assim como um esclarecimento estratégico compreensível para atingir estes objetivos. Assim, o PNEC é considerado a ferramenta de política energética e climática central para a década de 2021 a 2030. Para que seja possível o alcance de neutralidade climática até ao ano de 2050, foram estabelecidas as seguintes metas para Portugal para o ano de 2030, tendo como base o ano de 2005, alinhadas com as metas da CE [7]:

- Emissões de GEE: - 45% a - 55%;
- Eficiência energética: + 35%;
- Utilização de fontes renováveis de energia: + 47%;
- Utilização de fontes renováveis nos transportes: + 20%;
- Interligações elétricas: + 15%.

No contexto da UE os veículos destinados ao transporte de passageiros são responsáveis por cerca de 12% das emissões totais de dióxido de carbono (CO₂) e os veículos comerciais ligeiros 2,5% [8]. Em vigor desde 1 de janeiro de 2020, o regulamento da UE 2019/631 estipulou um máximo de 95 g CO₂/km de emissões médias para os novos automóveis de passageiros e 147 g CO₂/km para os veículos comerciais ligeiros novos matriculados na UE, até 31 de dezembro de 2020. A partir de 1 de janeiro de 2025, os veículos de passageiros e ligeiros de mercadorias estão sujeitos às seguintes metas nas emissões de CO₂:

- 15% de redução para os veículos de passageiros e veículos comerciais ligeiros relativamente ao objetivo estabelecido para 2021;

A partir de 1 de janeiro de 2030, as metas de emissões de CO₂ tornam-se mais ambiciosas, sendo elas:

- 37,5% para os veículos de passageiros relativamente ao objetivo estabelecido para 2021;
- 31% para os veículos comerciais ligeiros relativamente ao objetivo estabelecido para 2021,

Da mesma forma que foram implementadas metas na redução de emissão de GEE, a CE também determina estratégias complementares de forma a mitigar os impactos provocados pelo setor dos transportes. A seleção das fontes energéticas para a mobilidade é abordada na Diretiva (UE) (2018/2001) que define uma integração mínima de 14% de fontes renováveis no setor automóvel até 2030, sendo que em 2022 é estabelecido um mínimo de 0,2%, em 2025 de 1% e em 2030 de 3,5% de biocombustíveis de última geração.

As vertentes prioritárias apontadas pela CE para a sustentabilidade do setor da mobilidade incluem: aumento da eficiência energética, aposta em veículos elétricos, utilização de combustíveis alternativos e de veículos que utilizem hidrogénio (H₂) como fonte energética [9].

Na Diretiva (UE) 2000/53 um outro aspeto que a CE considera como essencial é a integração da economia circular no setor automóvel. Nesta vertente há um esforço adicional no desmantelamento dos veículos na sua etapa de FdV de forma a reintegrar os materiais de novo no ciclo produtivo dos automóveis.

2.2 Estratégias de mitigação

De forma a conseguir responder às necessidades atuais, contribuindo para a mitigação das alterações climáticas e correspondendo à legislação imposta, existem estratégias aplicáveis ao setor automóvel rodoviário com elevado potencial na redução das emissões de GEE e energia consumida.

A revisão da documentação regulamentar e orientadora dos princípios da CE efetuada no subcapítulo anterior permitiu a identificação de pontos chave para a redução de impactes:

1. Adaptação do sistema de propulsão, pela Diretiva (UE) 2018/2001, [6];
2. Redução do peso e dimensão dos veículos [9];
3. Integração da economia circular pela valorização de veículos em FdV, pela Diretiva (UE) 2000/53.
4. Mobilidade autónoma e partilhada [6].

A presente dissertação, onde foi realizada a revisão de estudos de ACV, teve como foco as três primeiras estratégias identificadas e o seu potencial para aumentar a sustentabilidade no setor automóvel. Descrevem-se seguidamente estas estratégias.

2.2.1 Sistema de propulsão

A adaptação do sistema de propulsão pode ser orientada em várias vertentes, estando disponíveis diversas tecnologias para a aposta na eletrificação, assim como o investimento em biocombustíveis.

Os combustíveis fósseis, baseados em hidrocarbonetos, podem ser substituídos na indústria automóvel pelos biocombustíveis, cuja matéria-prima, biomassa, tem a capacidade de absorção do CO₂ enquanto cresce, compensando assim as emissões associadas à sua produção e utilização. Os biocombustíveis utilizados neste setor abrangem o bioetanol e o biodiesel. O bioetanol é um álcool produzido através da fermentação dos açúcares e amidos das plantações de trigo, milho e beterraba, enquanto o biodiesel tem como base ésteres metílicos de ácidos gordos e é produzido através de uma ampla gama de matérias-primas renováveis, como, colza, resíduos de óleo alimentar, óleo de palma, óleo vegetal e gordura animal por transesterificação [10], [11].

Contudo, existem atualmente no mercado, e em desenvolvimento, opções alternativas de propulsão com o objetivo de reduzir as emissões de GEE e consumo energético dos veículos, ao invés de substituírem apenas o combustível. A adaptação do sistema de propulsão vem alterar a forma de obtenção de energia no próprio veículo relativamente ao veículo convencional provido de motores a combustão interna / *internal combustion engine vehicle* (ICEV). Na propulsão convencional o combustível é misturado com o ar para a sua queima, onde esta ignição e queima se dá no interior do motor, sendo o calor convertido em trabalho mecânico e calor residual. Atualmente, existem dois tipos de

ignição distintas, para o motor a gasolina com ignição por faísca e para o motor a diesel com ignição por compressão [12]. Os veículos com sistemas de propulsão que visam substituir os convencionais incluem:

1. O veículo elétrico / *battery electric vehicle* (BEV) é 100% eletrificado e constituído por uma bateria recarregável, que usualmente é alimentada pela rede elétrica. Nestes veículos não é utilizado nenhum combustível e não são necessários tanques de armazenamento [13], [14].
2. O veículo híbrido / *hybrid electric vehicle* (HEV) utiliza combustível para a produção de eletricidade para alimentação do motor elétrico. Esta tecnologia é, normalmente, constituída por duas baterias com diferentes funções: movimentação do veículo e regeneração e armazenamento energético. Desta forma toda a energia é aproveitada, como é o caso das travagens efetuadas, ao contrário do que acontece nos ICEV em que esta energia é dissipada em forma de calor. Esta é uma das razões pelas quais os motores de combustão dos HEV têm menores dimensões e conduzem à diminuição do consumo energético e emissões de GEE. Este veículo não tem a possibilidade de ser conectado à rede para carregamento da bateria contrariamente ao BEV e ao híbrido *plug-in* (PHEV) [13], [15].
3. Veículo híbrido *plug-in* / *plug-in hybrid electric vehicle* (PHEV), apesar de ser também munido de um sistema híbrido, tem um modo de funcionamento completamente distinto do HEV. Neste automóvel existe também um sistema alimentado a combustível e um sistema elétrico, no entanto o sistema elétrico pode ser alimentado diretamente da rede através de ligação a esta. Ou seja, a tecnologia PHEV pode funcionar tal e qual como um BEV, contudo existe a possibilidade de recorrer a combustível quando a bateria elétrica descarrega totalmente [13], [15]. Uma característica relevante dos PHEVs é o seu fator de utilidade (FU), definido pela distância percorrida no modo elétrico, dado que esta tecnologia tem a capacidade de produzir movimento através de combustível ou energia elétrica. Este fator depende, sobretudo, da capacidade da bateria, mas também de outros parâmetros, como modo de condução e padrão de carregamento elétrico do seu utilizador [16]. Tal como o HEV, o PHEV também inclui a regeneração energética através do sistema de travagem, no entanto, as baterias desta tecnologia têm, geralmente, maior capacidade comparativamente ao híbrido. Outra divergência entre o HEV e o PHEV é a distância a que cada um pode percorrer até o modo combustível ser acionado, que para o híbrido *plug-in* é de 16 a 64 km e para o híbrido é de 3 a 5 km [13], [15].
4. Por último, o veículo movido a H₂ / *fuel cell vehicle* (FCV) recorre também a eletricidade para fornecer energia a um motor elétrico; o ponto chave está na produção *in situ* da eletricidade que utiliza. Nesta tecnologia é utilizada uma célula a combustível alimentada a H₂ para a produção de eletricidade, também

aqui é necessário um tanque, contudo destina-se ao armazenamento do H₂. Desta forma, o motor elétrico utiliza a energia da célula de combustível e da bateria suplementar para regeneração da energia, também ela através da travagem, para a locomoção do carro [17].

A adaptação dos sistemas de propulsão no setor automóvel está associada a um aumento da eficiência energética, dado que a eficiência da conversão energética pode chegar aos 75% nos veículos eletrificados, enquanto para os convencionais esta conversão ronda os 20% [14].

2.2.2 Materiais leves

A aplicação de materiais leves alternativos na indústria automóvel tem como principal objetivo a redução do peso dos veículos. Os benefícios desta estratégia advêm, principalmente, da fase de utilização do veículo, uma vez que as necessidades energéticas de transporte estão associadas ao peso total a ser transportado. Por outro lado, carroçarias mais leves podem originar que o tamanho de outros componentes (ex., motores, baterias) seja igualmente reduzido levando a uma redução secundária de materiais incorporados no veículo.

Cada vez mais se recorre à substituição de materiais pesados, como aço e ferro, por materiais alternativos, entre os quais: *high-strength steel* / aço de elevada resistência (HSS), *advanced high-strength steel* / aço avançado de elevada resistência (AHSS), alumínio (Al), magnésio (Mg), *carbon fibres* / fibras de carbono (CF), *glass fibres* / fibras de vidro (GF) e compósitos, como, *carbon fibre reinforced polymers* / polímeros reforçados por fibras de carbono (CFRP) e *glass fibre reinforced polymers* / polímeros reforçados por fibras de vidro (GFRP). Esta substituição quando levada a cabo na estrutura do veículo, designada por carroçaria ou *Body in White* (BiW), e chassi têm o potencial de reduzir até 50% do peso da viatura [18].

Na Tabela 1, estão listados os materiais leves mais utilizados na indústria do setor automóvel e as respetivas reduções na substituição dos materiais convencionais.

Tabela 1. Materiais leves e respetivo potencial de redução no peso do veículo [18]

Materiais Leves	Redução de Massa
Mg	30-70%
CFRP	50-70%
Al	30-60%
GFRP	25-35%
AHSS	15-25%
HSS	10-28%

A integração de materiais alternativos para redução do peso dos veículos está associada a três grandes vantagens, sendo elas: aumento da eficiência energética e melhorias na segurança e desempenho do veículo.

O aumento da eficiência energética é motivado pela economia de combustível. A poupança no combustível dá-se, uma vez que é requerida menos energia para arrancar e acelerar um veículo com menor peso, criando uma boa margem no aumento da eficiência dos veículos. Se for estabelecida uma redução de 10% no peso total de um automóvel, o combustível economizado pode atingir um valor de 6% a 8% [18]–[20]. Perspetiva-se que, a aplicação de materiais leves, no contexto dos Estados Unidos da América (EUA), em conjunto com motores mais eficientes através de materiais avançados pode levar à poupança de mais de 18,9 biliões de litros de combustível anualmente em 2030 [18]. A maior segurança deve-se ao facto de estar comprovado que o Al, Mg, compósitos, CF, entre outros materiais alternativos, estão associados a uma melhor absorção energética comparativamente aos metais (aço por si só, por exemplo), assegurando maior segurança nos impactes [19], [20]. Para além disto, os veículos mais leves têm um melhor desempenho em condições rodoviárias piores, visto que o peso não força demasiado o motor do veículo. A distância de segurança é outro ponto favorecido pelos materiais leves, isto porque um veículo composto maioritariamente por materiais mais leves permite que o veículo responda de forma mais ágil às ações do condutor, como as travagens [19]. Paralelamente, também são mais práticos durante a condução por serem de mais fácil estacionamento [19], [20].

A incorporação de materiais leves em veículos deve ser considerada não só nos ICEVs mas também nas tecnologias BEV, HEV e PHEV. A utilização de materiais alternativos nestes casos pode levar a uma diminuição do peso dos sistemas motorizados (baterias e motores elétricos), melhorando a sua eficiência e aumentando a sua autonomia elétrica. Ou seja, pode resultar na necessidade de uma bateria de menores dimensões e menor custo mantendo a autonomia elétrica e, conseqüentemente, em menores consumos energéticos e emissões de GEE. A incorporação de materiais leves nos veículos também induz, na fase de utilização do veículo, reduções de custos e a economia de combustível [18].

2.2.3 Fim-de-Vida

A estratégia de FdV consiste na aposta da economia circular no setor automóvel. Embora nos últimos anos se tenha verificado um esforço acrescido por parte da CE para a transição para a economia circular, a verdade é que atualmente, a nível industrial, ainda é escassa a operação considerando este conceito, dado que apenas 32% das cadeias de abastecimento das empresas ligadas ao setor automóvel contribuem para a economia circular, resultando num uso excessivo de matérias-primas virgens ou primárias [8]. A contínua sobre-exploração de recursos naturais tem levado à sua depleção e a um aumento dos impactes ambientais. Sendo que, o processamento de matérias-primas, ou materiais primários, é energeticamente mais intensivo e está associado a maiores libertações de GEE. A integração de matérias-primas não virgens,

ou secundárias, evita e/ou minora desta forma a extração de novos materiais, consumos energéticos elevados e emissões de GEE.

O tratamento de veículos em FdV pode ser realizado através de diferentes formas, cada uma com diferentes impactes associados, assim sendo a hierarquia de tratamento de automóveis em FdV é apresentada na Figura 1, sequencialmente, da opção prioritária e mais benéfica, para a mais prejudicial.



Figura 1. Hierarquia para processamento de veículos em FdV [21].

A reutilização direta de componentes do veículo é apontada como a alternativa prioritária sem necessidade de qualquer intervenção extra de processamento nesta parte. Caso seja necessário algum tipo de processamento procede-se à remanufatura do componente. Na terceira opção surge a reciclagem, que consiste no processamento do componente para a produção de novas matérias-primas. Este tratamento pode resultar na obtenção de materiais de elevada qualidade ou na obtenção de materiais de baixa qualidade. A reciclagem divide-se em dois processos: desmantelamento e trituração. O principal produto da fase de trituração é o metal ferroso, que é expedido para a indústria do aço onde é reciclado, sendo que a maioria dos resíduos de trituração automóvel é depositada em aterro. Seguidamente, a recuperação consiste na utilização dos desperdícios automóveis para fins úteis; o tipo de recuperação mais frequente neste setor é a recuperação energética através de incineração ou pirólise. Por fim, a deposição em aterro que de forma alguma valoriza o veículo ou componente em FdV, devendo a todo o custo ser evitada [21].

A reintegração do material na produção do novo componente pode dar-se em ciclo aberto ou fechado. O ciclo fechado é preferível relativamente ao ciclo aberto, uma vez que neste cenário o material vai substituir matéria-prima virgem (1:1) sem perder as propriedades iniciais, evitando assim a produção da mesma quantidade de material virgem ao fechar o seu ciclo. No caso do ciclo aberto, a substituição de matérias virgens não se dá a 100%, porque as propriedades/qualidades iniciais do material vão-se deteriorando com a reciclagem, sendo necessário a inclusão de uma parte de material primário para a produção de novos componentes e havendo uma parte de material que acaba depositado em aterro. O cenário de ciclo aberto também pode referir-se ao facto de haver uma perda de valor do material que será reintegrado na produção de outros materiais com diferentes fins, onde a exigência da sua qualidade é menor [22].

A integração de veículos eletrificados no mercado vem adicionar ainda mais relevância a atividades ligadas à economia circular. As baterias de ião lítio (Li-ion) são as principais responsáveis pelos elevados impactes produtivos característicos dos veículos com propulsão elétrica e a economia circular tem o potencial de reduzir estes impactes, diminuindo a dependência na produção e extração de lítio e metais raros [8].

A economia circular pode ser promovida através da aplicação da estratégia de materiais leves, dado que permite a valorização do potencial reciclável dos materiais leves/alternativos, tornando, desta forma, ambas as estratégias aliadas na redução dos impactes no setor automóvel [18].

2.3 Contributo da Dissertação

A ACV permite a avaliação por meio da perspetiva ambiental, quantificando impactes para determinar as opções mais ou menos impactantes e é um método ideal para comparação entre objetos de estudo, permitindo avaliar alternativas dentro das próprias estratégias e também relacionar o desempenho entre estas. Desta forma torna-se uma ferramenta de apoio à tomada de decisão relativamente à alternativa mais adequada a cada circunstância. Por estes motivos a aplicação desta ferramenta tornou-se frequente neste setor.

Contudo, existem limitações associadas, dado que os diversos estudos de ACV encontrados na literatura consideram diferentes: objetos de estudo ou unidade funcional, distância percorrida durante a vida útil do veículo, cenários de FdV e limitações do sistema, dificultando uma comparação direta entre estudos. Adicionalmente, os resultados relativos à quantificação de impactes encontram-se formatados de formas distintas, além de dispersos em tabelas, texto, gráficos e figuras. Por estes motivos, o valor desta dissertação encontra-se na reunião e análise detalhada de vários estudos de ACV, no setor automóvel rodoviário, relativamente às estratégias: aplicação de materiais leves, seleção de sistemas de propulsão e processamento de veículos em fim de vida. Os estudos são categorizados segundo as diferentes estratégias e normalizados de modo a possibilitar a sua comparação de forma coerente. Por fim, é possível concluir quais as alternativas com mais impactes associados e as mais benéficas ambientalmente no decorrer do ciclo de vida do veículo, assim como os pontos mais sensíveis em cada estratégia, os quais devem ser considerados detalhadamente. Este estudo também fornece os impactes totais e por etapa do CV, permitindo a sua aplicação noutros estudos e artigos, informação que é frequentemente difícil de encontrar sistematizada.

METODOLOGIA

- 3.1 Consumo Energético
- 3.2 Potencial de Aquecimento Global
- 3.3 Revisão da Literatura

3. METODOLOGIA

3.1 Avaliação de Ciclo de Vida

A ACV é uma ferramenta de avaliação dos potenciais impactos ambientais associados a um serviço, produto ou material. Tal como o nome indica, todo o ciclo de vida do objeto de estudo pode ser considerado, isto é, desde a sua origem/extração até ao seu FdV. Em cada etapa do ciclo de vida consideram-se as respetivas entradas e saídas do sistema, conforme indicado na Figura 2. Cada etapa do ciclo de vida, necessária ao funcionamento e correta utilização do produto/serviço, tem impactos associados [23].

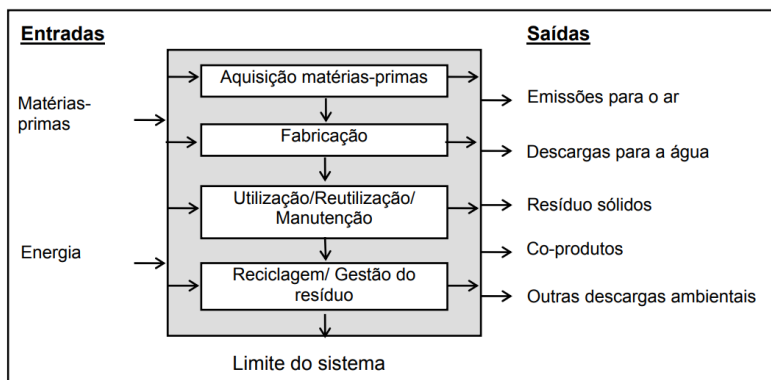


Figura 2. Fases de vida do objeto de estudo avaliado através de ACV. Fonte (USEPA 2001)

A Norma ISO 14040 é a referência internacional e padronizada de ACVs, normalmente, seguida e utilizada como guia para a sua aplicação. Desde o ano de 2006 que as normas técnicas foram compactadas em duas normas apenas: ISO 14040. *Avaliação do Ciclo de Vida. Princípios e Estrutura* e ISO 14044. *Avaliação do Ciclo de Vida. Regulamento e Diretrizes* [24].

A ACV é constituída por uma gama de processos sistematizados responsáveis por compilar e avaliar todas as entradas e saídas das vertentes materiais e energéticas e os seus impactos ambientais associados. Segundo a norma ISO 14040, esta ferramenta é constituída por quatro etapas:

- **Definição do âmbito e objetivos:** Definição e descrição do produto/serviço e determinação do contexto da avaliação, de forma a identificar os seus limites e selecionar as categorias de impacto a ser avaliadas. Nesta etapa é definida a unidade funcional que se trata da referência para a qual as entradas e saídas do sistema estão associadas. A unidade funcional garante a comparabilidade dos impactos na ACV através da mesma base, essencial na avaliação de diferentes sistemas.

- **Análise do inventário:** Identificação e quantificação das entradas e saídas de cada etapa do ciclo de vida, por exemplo água, materiais e energia necessários, assim como das descargas ambientais.
- **Análise de impacto ambiental:** Avaliação dos efeitos ecológicos e humanos transcritos em impactes ambientais associados aos elementos quantificados em inventário.
- **Interpretação:** Avaliação dos resultados obtidos pela avaliação do inventário e análise dos impactes de forma a selecionar o produto/serviço mais adequado [25].

A aplicação da ACV mostra-se útil no desenvolvimento e melhoria de produtos/serviços, planeamento estratégico para, por exemplo, comparar diferentes produtos/serviços e optar pelo mais adequado às circunstâncias, estabelecimento de políticas públicas, *marketing*, entre outros [26], [27].

O objeto de estudo pode ser avaliado segundo diversas categorias de impacto, como: alterações climáticas/aquecimento global, consumo energético, toxicidade humana, ocupação do solo, depleção de recursos, entre outros [26], [27]. Tal como explicado anteriormente, as duas categorias imprescindíveis de estudo para mitigação das alterações climáticas abrangem a emissão de GEE e o consumo energético. A categoria referente às alterações climáticas é geralmente medida em kg CO₂-eq e é o indicador de aquecimento global devido às emissões atmosféricas de GEE, podendo ser dividida em 3 subcategorias, dependendo da fonte responsável pelas emissões: recursos fósseis, recursos biológicos, alterações no uso do solo [28]. A categoria relativa ao consumo energético, frequentemente denominada como consumo de energia primária ou consumo cumulativo de energia, reflete a utilização de energia primária ao longo do CV do produto/serviço considerando a energia proveniente de fontes renováveis e de fontes fósseis, sendo geralmente medida em MJ ou GJ [28]. Este indicador permite avaliar de que forma a energia é utilizada em todo o CV do produto/serviço, incluindo os impactes ambientais associados ao consumo energético [29]. No decorrer desta dissertação o indicador referente às emissões de CO₂ é designado como potencial de aquecimento global (PAG), enquanto a avaliação do consumo energético é referida como consumo primário de energia (CPE).

A aplicação da análise de ACV pode utilizar duas metodologias distintas para a construção do inventário e quantificação de impactes na reciclagem de um material. Estes processos são comuns e muito utilizados nas ACV realizadas atualmente, as quais incluem:

- **'Cut-off approach':** considera a parte de material reciclado no fabrico do produto. Os impactes relativos à extração, beneficiação e refinamento do material virgem são apenas atribuídos à primeira aplicação. A segunda utilização do produto considera os impactes associados à recolha, beneficiação e refinamento da sucata. Contudo, a partir do momento em que o produto reciclável deixa o sistema, os seus impactes já não são envolvidos na análise.

- *'Avoided burden approach'*: considera o modo de FdV do produto. A parcela de material reciclado após a sua utilização define a quantidade de material primário não requerido na produção. Desta forma, os impactes ambientais evitados pelo não processamento de materiais virgem são contabilizados no CV do produto. Nesta abordagem, para a produção, os impactes incluem sempre o processamento de material primário, quer este tenha ou não incluído no seu fabrico material secundário [30].

3.2 Revisão da literatura

Para que fosse possível a recolha de literatura adequada para esta revisão, foi realizada uma pesquisa nas plataformas: *ScienceDirect* e *SpringerLink*, cujo acesso final foi em 17 de fevereiro de 2021.

A possibilidade de utilizar a mesma equação de pesquisa em ambas as bases de dados foi averiguada, contudo os resultados obtidos não eram praticáveis. No *ScienceDirect* é possível detetar os termos seleccionados apenas no título, resumo e palavras-chave, enquanto no *SpringerLink* os termos são detetados em toda as secções do artigo. Este procedimento levou à obtenção de mais de 50 000 resultados no *SpringerLink*, sem a aplicação de qualquer filtro à pesquisa, onde a maioria não se enquadrava nos objetivos do estudo, conduzindo à necessidade de aplicar uma diferente abordagem, onde fosse obtido um número praticável de resultados coerentes com aqueles reunidos na pesquisa realizada no motor *ScienceDirect*. Assim, foram formuladas equações de pesquisa distintas para cada motor de busca, indicadas na Tabela 2, viabilizando assim a recolha de literatura.

Tabela 2. Equação de pesquisa, campos de preenchimento e artigos recolhidos nos motores de busca *ScienceDirect* e *SpringerLink*

	<i>ScienceDirect</i> [31]	<i>SpringerLink</i> [32]
Equação de pesquisa	OR "Life Cycle" "Material Flow" "Eco Efficiency"	OR "Life Cycle Analysis" "Life Cycle Assessment" "Material Flow" "Eco Efficiency"
	AND	AND
	OR Automotive Vehicle	OR Automotive Vehicle
	AND	AND
	OR Recycling "end-of-life" ASR	Recycling
	-	AND "end-of-life"
Campos de pesquisa	Título, resumo e palavras-chave	Todas as secções do artigo
Literatura recolhida	255 artigos	604 artigos

Em ambos os motores de busca a pesquisa foi limitada a artigos publicados em inglês, sendo que apenas estes foram considerados para a revisão da literatura.

A aplicação *Rayyan* trata-se de uma ferramenta de apoio à revisão sistemática da literatura e foi utilizada com este fim para esta dissertação, de forma a excluir da análise os artigos que não se enquadrassem nos objetivos estabelecidos [33]. Como representado na Tabela 3, através do *Rayyan*, o número de resultados foi reduzido de 859 para 220 através da exclusão de artigos. Os motivos de exclusão dos artigos incluíram, por ordem decrescente de peso: âmbito errado, aplicação de critérios coerentes aos resultados do *SpringerLink*, tipo de publicação errada, não ter o FdV como foco, tipo errado de sistema de transporte, sem acesso, demasiado genérico e demasiado específico. O motivo de exclusão ‘aplicação de critérios coerentes aos resultados do *SpringerLink*’ foi aplicado em último lugar e refere-se à deteção de termos e respetivos sinónimos no título, resumo e palavras-chave da literatura recolhida de forma a induzir coerência relativamente aos resultados obtidos em ambos os motores de busca.

Tabela 3. Artigos recolhidos nos respetivos motores de busca e número final após revisão sistemática no *Rayyan*

	Antes <i>Rayyan</i>	Depois <i>Rayyan</i>
<i>ScienceDirect</i>	255	150
<i>SpringerLink</i>	604	70
Total (nº artigos)	859	220

Para analisar as três estratégias, objeto de estudo na presente dissertação, para os 220 artigos obtidos, recorreu-se à ferramenta de *software VosViewer* que é destinada a construir e visualizar redes bibliométricas [34]. A Figura 3 mostra a distribuição das palavras-chave dos 220 artigos reunidos, palavras-chave estas que foram adaptadas de forma a evitar redundâncias. Esta adaptação consiste numa padronização das palavras, por exemplo, os termos LCA, provenientes de *Life Cycle Assessment*, e *Life Cycle Analysis*, foram convertidos para *Life Cycle Assessment* e somados aqueles que já utilizavam este termo, permitindo uma análise mais clara da esfera de artigos que utilizam esta avaliação, sem encontrar termos idênticos dispersos. O mesmo por exemplo para termos *end-of-life* ou *ELV*, proveniente de *End-of-Life Vehicles*, que foram convertidos para *EoL vehicles*. Desta forma confirma-se a presença do tipo de análise procurada, ACV, dado que o círculo de maior área é designado *Life Cycle Assessment*, termo em inglês para ACV. Da mesma forma, o mesmo sucedeu para as três estratégias em estudo, sendo que o sistema de propulsão se encontra representado pelo termo *electric vehicles*, consistindo na eletrificação dos veículos. Para os materiais leves são encontrados diversos círculos que comprovam o seu estudo, como: *lightweighting*, *plastics*, *aluminium*, *carbon fiber*, entre outros. O FdV está presente também em diversos termos, incluindo, *EoL vehicles*, *circular economy*, *reuse*, entre outros. A análise destas estratégias segundo os indicadores considerados como essenciais no estudo para a mitigação das alterações climáticas na introdução encontra-se em *greenhouse gas*, *global warming* e *energy consumption*.

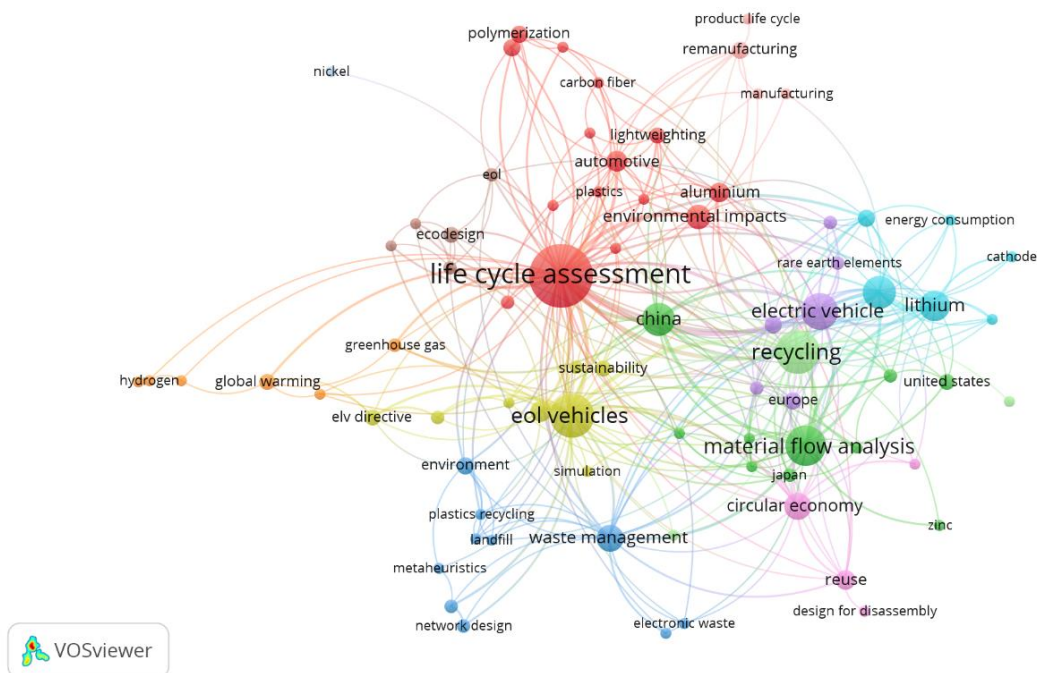


Figura 3. Distribuição das palavras-chave com adaptação nos 220 artigos recolhidos, através da ferramenta *VosViewer*

Por último, utilizou-se o *Mendeley*, uma aplicação de gestão de referências bibliográficas que consiste no apoio ao armazenamento, criação de notas e rótulos e muito útil na citação de referências e informação de pesquisa [35]. Nesta aplicação foram carregados os 220 artigos para ser realizada uma seriação que permitiu a restrição aos artigos que correspondem ao enquadramento da dissertação, sendo que os critérios aplicados incluíam a verificação das três condições em simultâneo:

- Aplicação de ACV;
- Avaliação do objeto segundo o indicador energético de consumo ou segundo este e potencial de aquecimento global;
- Estudo de uma das três estratégias: sistema de propulsão, materiais leves e FdV.

Esta seriação levou a uma limitação dos artigos a serem analisados, nomeadamente 22, sendo que alguns são comuns na estratégia de FdV e materiais leves.

Na Tabela 4 encontram-se os artigos identificados para cada estratégia, indicando também, entre o CPE e PAG, quais os indicadores avaliados. Para a análise de materiais leves e FdV existem artigos que analisam apenas CPE e não incluem o PAG.

Tabela 4. Artigos selecionados após seriação na ferramenta *Mendeley* para cada estratégia e indicadores avaliados

Estratégia	Artigo	CPE	PAG
Sistema de Propulsão	Lombardi et al. (2017) [36]	✓	✓
	Bartolozzi et al. (2012) [37]	✓	✓
	Rosenfeld et al. (2019) [38]	✓	✓
	Xiong et al. (2019) [39]	✓	✓
	Yang et al. (2020) [40]	✓	✓
	Marmioli et al. (2019) [41]	✓	✓
	Onat et al. (2015) [42]	✓	✓
	Mayyas et al. (2017) [43]	✓	✓
Materiais Leves	Tempelman (2011) [44]	✓	✗
	Sato and Nakata (2021) [45]	✓	✗
	Mayyas et al. (2012) [46]	✓	✓
	Ghosh et al. (2021) [47]	✓	✓
	He et al. (2020) [48]	✓	✗
	Delogu et al. (2017) [49]	✓	✓
	Sun et al. (2017) [50]	✓	✓
	Poulikidou et al. (2015) [51]	✓	✓
	Jhaveri et al. (2018) [52]	✓	✓
	He et al. (2021) [53]	✓	✓
FdV	Mayyas et al. (2012) [46]	✓	✓
	Raugei et al. (2015) [54]	✓	✓
	Sato and Nakata (2021) [45]	✓	✗
	Sun et al. (2017) [50]	✓	✓
	Puri et al. (2009) [55]	✓	✓
	Sujit Das (2011) [56]	✓	✗
	Delogu et al. (2017) [49]	✓	✓
	Koffler and Zahller (2012) [57]	✓	✓

Após a reunião e distribuição dos artigos por estratégia, estes foram analisados. Esta análise incluiu o agrupamento de determinadas informações relevantes no estudo para a elaboração de conclusões, sendo que esta pode diferir de estratégia para estratégia. Para o sistema de propulsão as características recolhidas para cada artigo incluem: tipo de sistema de propulsão, distância percorrida durante a sua vida, consumo combustível/elétrico, capacidade da bateria, FdV considerado, peso do veículo e alternativas. Relativamente aos materiais leves e FdV, as características relevantes alteram ligeiramente, integrando o objeto de estudo/unidade funcional, distância percorrida, materiais alternativos, peso do veículo e componente e FdV considerado.

O passo seguinte consistiu no mesmo procedimento para os resultados dos impactes obtidos para o CPE e PAG. Para as diferentes estratégias foram estabelecidas diferentes formas de quantificação dos impactes, tendo em conta as fases consideradas. No que

diz respeito ao sistema de propulsão este tem os seus impactes divididos pela fase de produção, fase de utilização (constituída pelos impactes associados ao combustível, consumo elétrico e manutenção), etapa de FdV e, por fim, quando quantificada, a fase de distribuição e armazenamento (D&A) de combustível. Para o caso dos materiais leves e FdV, estes são avaliados para a etapa de produção, manufatura, fase de uso e FdV.

No decorrer deste estudo os resultados foram tratados segundo três análises distintas: análise de impactes para todas as estratégias em análise, análise de sensibilidade para o sistema de propulsão e materiais leves, e análise complementar para os materiais leves e FdV.

Na análise de impactes, a única comum às três estratégias, os artigos são estudados segundo as duas categorias, CPE e PAG. De forma a possibilitar uma análise coerente, entre cada estratégia, os resultados foram normalizados para a mesma distância percorrida: 200 000 km. Isto porque ao realizar a média das distâncias percorridas para cada estratégia nos diferentes artigos e, posteriormente, utilizar estas médias para estabelecer a média geral entre elas, o resultado obtido foi de: 207 989 km, o qual foi então arredondado para 200 000 km. No passado, a duração média de um veículo era significativamente mais baixa comparativamente aos dias de hoje. Atualmente, um veículo vulgar dura cerca de 321 869 km, sendo que os elétricos podem até ultrapassar os 482 803 km, no entanto, não há muito tempo, esperava-se que um veículo vulgar durasse cerca de 241 401 km, aliás, atingir a distância de 160 934 km já era considerado um sucesso, sendo que atualmente é apenas um ponto de partida tendo em conta a distância média percorrida por um veículo no seu CV [58]. Por estes motivos, a média de distância percorrida entre veículos nos artigos avaliados acaba por não ser muito elevada, sendo que este obstáculo acaba por ser ultrapassado numa análise posterior. A análise de impactes (200 000 km) é apresentada no corpo da dissertação em forma de gráfico para as três estratégias, sendo que os resultados numéricos se encontram anexados. Adicionalmente, a análise dos materiais leves é considerada uma estratégia com elevada dependência do fator peso, não sendo coerente a análise de componentes com pesos totalmente distintos, uma vez que serão provocadas discrepâncias nos impactes quantificados. Deste modo, reconhece-se a necessidade de análise separada dos diferentes artigos, sendo esta dependente do peso dos respetivos componentes. Neste sentido, criaram-se grupos de análise em função dos intervalos de pesos definidos e magnitude dos impactes. O mesmo procedimento foi aplicado à estratégia de FdV. Nas três estratégias a unidade selecionada para apresentação dos impactes é GJ para a categoria CPE e kg CO₂-eq para a categoria PAG.

Relativamente à análise de sensibilidade, que possibilita então a avaliação para diferentes distâncias, esta não foi incluída na estratégia de FdV, uma vez que reflete impactes na fase de utilização, não apresentando relevância para esta estratégia. Nesta avaliação, procedeu-se à variação da distância percorrida em cada estudo, avaliando as alterações induzidas nos impactes e permitindo compreender o peso que as fases dependentes da distância percorrida têm no CV total das alternativas (fase de utilização e D&A), mantendo-se inalterados os impactes associados à produção e FdV. Sendo os

impactes a variável dependente e a distância percorrida a variável independente, foi determinado o declive para cada alternativa em cada estudo, o que permitiu de uma forma mais simples avaliar a sensibilidade de cada opção à variação da distância percorrida. As distâncias consideradas vão desde os 0 km até aos 300 000 km de 50 000 em 50 000 km. A consideração dos 0 km permite também a identificação das alternativas cujas etapas produtivas e de FdV são mais intensivas. Os resultados relativos à análise de sensibilidade no capítulo de resultados e discussão encontram-se dispostos numericamente em tabelas, sendo que nos anexos são apresentados os gráficos construídos dos impactes em função da distância percorrida para cada opção considerada nos diferentes estudos. As unidades selecionadas para quantificação dos impactes são as mesmas utilizadas na análise prévia (análise de impactes).

Tendo em conta a análise complementar, considerada para os materiais leves e FdV, esta permite a avaliação sem considerar o fator peso, ou seja, os resultados são apresentados por kg de material (MJ/kg para o indicador CPE e kg CO₂-eq/kg para o indicador PAG). Desta forma é possível concluir qual a produção mais intensiva, se produzir 1 kg do material A ou do material B. O mesmo para o FdV que permite avaliar, por exemplo, se a reciclagem de 1 kg do material A é mais ou menos intensiva comparativamente à reciclagem de 1 kg do material B.

Para a construção dos gráficos e tabelas para o capítulo dos resultados e discussão, tornou-se necessária a atribuição de siglas para as designações das diferentes alternativas, para que a análise fosse o mais esclarecedora possível. Desta forma, as Tabela 5 e Tabela 6, para o sistema de propulsão e, materiais leves e FdV, respetivamente, apresentam as alternativas e correspondente descrição e referência, indicando quais os artigos que a estudam.

Tabela 5. Descrição das alternativas estudadas para a estratégia de Sistema de Propulsão

Alternativas	Descrição	REF.
BEV	Veículo elétrico	[40]–[42]
BEV_AlBiW	BEV com <i>BiW</i> de Al	[43]
BEV_BattReplace	BEV com substituição da bateria no seu CV	[36]
BEV_Biomass	BEV abastecido por eletricidade obtida através da gaseificação da biomassa	[37]
BEV_EUMix	BEV abastecido pelo <i>mix</i> de eletricidade da UE_28	[38]
BEV_ItMix	BEV abastecido pelo <i>mix</i> de eletricidade nacional italiano	[37]
BEV_LFP	BEV com bateria LFP abastecido pelo <i>mix</i> elétrico nacional	[39]
BEV_MgBiW	BEV com <i>BiW</i> de Mg	[43]
BEV_NMC	BEV com bateria NMC abastecido pelo <i>mix</i> elétrico nacional	[39]
BEV_NoReplace	BEV sem substituição da bateria no seu CV	[36]
BEV_StBiW	BEV com <i>BiW</i> de aço	[43]

BEV_WE	BEV abastecido por energia eólica	[37], [38]
FCV_Biomass	FCV com H ₂ produzido por eletrólise abastecida por eletricidade obtida através da gaseificação da biomassa	[37]
FCV_COG	FCV com H ₂ produzido de gás de síntese	[40]
FCV_EAH	FCV com H ₂ produzido por eletrólise a partir de energia hidroelétrica em abandono	[40]
FCV_ENH	FCV com H ₂ produzido por eletrólise a partir de energia hidroelétrica normal	[40]
FCV_ESG	FCV com H ₂ produzido por eletrólise através do <i>mix</i> elétrico nacional	[40]
FCV_ItMix	FCV com H ₂ produzido através do <i>mix</i> de eletricidade nacional italiano	[37]
FCV_NGR	FCV com H ₂ produzido de gás natural	[40]
FCV_PtH	FCV com H ₂ produzido através de <i>Power-to-Hydrogen</i> (separação da água através de sobras elétricas renováveis)	[38]
FCV_SteamReform	FCV com H ₂ produzido através de <i>Steam-Reforming</i> (H ₂ produzido de gás natural)	[38]
FCV_TWS	FCV com H ₂ produzido através da separação termoquímica da água.	[40]
FCV_WE	FCV com H ₂ produzido por eletrólise abastecida por energia eólica	[37]
HEV	Veículo híbrido	[42]
HEV_Bioet	HEV a bioetanol (etanol celulósico produzido numa biorefinaria)	[38]
HEV_BtL	HEV a <i>Biomass-to-Liquid</i> (gasificação da biomassa)	[38]
HEV_Gas	HEV a gasolina	[38]
HEV_Gas_AlBiW	HEV a gasolina com <i>BiW</i> de Al	[43]
HEV_Gas_MgBiW	HEV a gasolina com <i>BiW</i> de Mg	[43]
HEV_Gas_StBiW	HEV a gasolina com <i>BiW</i> de aço	[43]
ICEV_Gas	ICEV a gasolina	[36], [38], [40], [42]
ICEV_Bioet	ICEV a bioetanol	[38]
ICEV_BtL	ICEV a <i>Biomass-to-Liquid</i>	[38]
ICEV_CNG	ICEV a gás natural comprimido	[38], [41]
ICEV_Diesel	ICEV a diesel	[40], [41]
ICEV_Gas_AlBiW	ICEV a gasolina com <i>BiW</i> de Al	[43]
ICEV_Gas_MgBiW	ICEV a gasolina com <i>BiW</i> de Mg	[43]
ICEV_Gas_StBiW	ICEV a gasolina com <i>BiW</i> de aço	[43]
ICEV_H2_Biomass	ICEV com H ₂ produzido através da separação direta na gaseificação da biomassa	[37]
ICEV_SNG	ICEV a gás natural sintético	[38]
PHEV_Gas_BattReplace	PHEV a gasolina com substituição da bateria no seu CV	[36]

PHEV _Gas_NoReplace	PHEV a gasolina sem substituição da bateria no seu CV	[36]
PHEV_Gas	PHEV a gasolina	[38]
PHEV_Gas_AlBiW	PHEV a gasolina com <i>BiW</i> de Al	[43]
PHEV_Gas_MgBiW	PHEV a gasolina com <i>BiW</i> de Mg	[43]
PHEV_Gas_StBiW	PHEV a gasolina com <i>BiW</i> de aço	[43]
PHEV_LFP	PHEV a gasolina com bateria LFP abastecido pelo <i>mix</i> elétrico nacional	[39]
PHEV_NMC	PHEV a gasolina com bateria NMC abastecido pelo <i>mix</i> elétrico nacional	[39]
PHEV_WE and bioet	PHEV abastecido por energia eólica e bioetanol	[38]
PHEV_WE and BtL	PHEV abastecido por energia eólica e <i>biomass-to-liquid</i>	[38]
PHEV18_Gas	PHEV a gasolina com FU de 0,32	[42]
PHEV62_Gas	PHEV a gasolina com FU de 0,69	[42]
PHFCV_BattReplace	PHFCV com substituição da bateria no seu CV	[36]
PHFCV_NoReplace	PHFCV sem substituição da bateria no seu CV	[36]

Tabela 6. Descrição das alternativas estudadas para a estratégia de Materiais Leves e FdV

Alternativas	Descrição	REF.
Aço	100% aço	[46], [48], [50], [51]
Aço - Atual	100% aço com cenário FdV atual (tecnologias de trituração e pós-trituração para reciclagem e recuperação energética dos resíduos de trituração para materiais alternativos)	[49]
Aço - Futuro	100% aço com cenário FdV futuro (tecnologias avançadas de pós-trituração e reciclagem)	[49]
Aço - Int	Aço com FdV: 85% reciclagem em ciclo aberto	[54]
Aço_HSS	Mistura de aço (55%) e HSS (45%)	[44]
Aço_HSS - CR	Reciclagem convencional da mistura de HSS (75%) e aço (25%)	[45]
Aço_HSS - ER	Reutilização de partes da mistura de HSS (75%) e aço (25%)	[45]
Aço_HSS - MR	Reciclagem mecânica da mistura de HSS (75%) e aço (25%)	[45]
Aço_HSS - PR	Recuperação energética da mistura de HSS (75%) e aço (25%)	[45]
Aço_Rec	Aço submetido ao processo de reciclagem	[55], [56]
AçoInoxidável	100% aço inoxidável	[46]
AHSS	100% AHSS	[46], [50]
AHSS - CR	Reciclagem convencional de AHSS	[45]

Alternativas	Descrição	REF.
AHSS - ER	Reutilização de partes da mistura de AHSS	[45]
AHSS - MR	Reciclagem mecânica da mistura de AHSS	[45]
AHSS - PR	Recuperação energética da mistura de AHSS	[45]
Al	100% Al	[44], [46], [48], [50],
Al - CR	Reciclagem convencional de Al	[45]
Al - ER	Reutilização de partes de Al	[45]
Al - MR	Reciclagem mecânica de Al	[45]
Al - Opt	Al com FdV: 90% reciclagem em ciclo fechado	[54]
Al - Pess	Al com FdV: 75% reciclagem em ciclo aberto	[54]
Al - PR	Recuperação energética de Al	[45]
Al_60%Sec_EU	Al produzido com 60% de Al secundário no contexto da UE	[53]
Al_85%Sec_US	Al produzido com 85% de Al secundário no contexto dos EUA	[53]
Al_Aço_AHSS - Atual	Mistura de Al (15%), aço (76%) e HSS (8%) com cenário FdV atual	[49]
Al_Aço_AHSS - Futuro	Mistura de Al (15%), aço (76%) e HSS (8%) com cenário FdV futuro	[49]
Al_Aço_AHSS_CFRP - Atual	Mistura de Al (31%), aço (8%), AHSS (8%) e CFRP (52%) com cenário FdV atual	[49]
Al_Aço_AHSS_CFRP - Futuro	Mistura de Al (31%), aço (8%), AHSS (8%) e CFRP (52%) com cenário FdV futuro	[49]
Al_Aço_GFRP - Atual	Mistura de Al (47%), aço (10%) e GFRP (43%) com cenário FdV atual	[49]
Al_Aço_GFRP - Futuro	Mistura de Al (47%), aço (10%) e GFRP (43%) com cenário FdV futuro	[49]
Al_Aço_Plástico - Atual	Mistura de Al (77%), aço (15%) e plástico (9%) com cenário FdV atual	[49]
Al_Aço_Plástico - Futuro	Mistura de Al (77%), aço (15%) e plástico (9%) com cenário FdV futuro	[49]
Al_AHSS_CFRP - CR	Reciclagem convencional da mistura de Al (97%), AHSS (1,4%) e CFRP (1,4%)	[45]
Al_AHSS_CFRP - ER	Reutilização de partes da mistura de Al (97%), AHSS (1,4%) e CFRP (1,4%)	[45]
Al_AHSS_CFRP - MR	Reciclagem mecânica da mistura de Al (97%), AHSS (1,4%) e CFRP (1,4%)	[45]
Al_AHSS_CFRP - PR	Recuperação energética da mistura de Al (97%), AHSS (1,4%) e CFRP (1,4%)	[45]
Al_CFRP - Atual	Mistura de Al (51%) e CFRP (49%) com cenário FdV atual	[49]
Al_CFRP - Futuro	Mistura de Al (51%) e CFRP (49%) com cenário FdV futuro	[49]
Al_CFRP - Int	Al com FdV: 90% reciclagem em ciclo aberto; CFRP com FdV: 10% recuperação energética e 90% reciclagem em ciclo aberto	[54]
Al_CFRP - Opt	Al com FdV: 90% reciclagem em ciclo fechado; CFRP com FdV: 10% recuperação energética e 90% reciclagem em ciclo fechado	[54]
Al_CFRP - Pess	Al com FdV: 75% reciclagem em ciclo aberto; CFRP com FdV: recuperação energética	[54]

Alternativas	Descrição	REF.
Al_Rec	Al submetido ao processo de reciclagem	[55]
CAI_ABA	Alumínio fundido / <i>Cast aluminium</i> (CAI) com ' <i>avoided burden approach</i> '	[52]
CAI_COA	CAI com ' <i>cut-off approach</i> '	[52]
CCI_ABA	Ferro fundido convencional / <i>Conventional cast iron</i> (CCI) com ' <i>avoided burden approach</i> '	[52]
CCI_COA	Ferro fundido convencional com ' <i>cut-off approach</i> '	[52]
CFRP	100% CFRP	[44], [50], [51]
CFRP - CR	Reciclagem convencional de CFRP	[45]
CFRP - ER	Reutilização de partes da mistura de CFRP	[45]
CFRP - MR	Reciclagem mecânica da mistura de CFRP	[45]
CFRP - PR	Recuperação energética da mistura de CFRP	[45]
CFRP_Bio_1_Rec+ER	Precursor de lenhina às CFRP combinada com a tecnologia de manufatura <i>Sheet Moulding Compound</i> submetidas a reciclagem e recuperação energética	[56]
CFRP_Bio_2_Rec+ER	Precursor de lenhina às CFRP combinada com a tecnologia de manufatura P4 submetidas a reciclagem e recuperação energética	[56]
CFRP_Conv_1_Rec+ER	Precursor têxtil às CFRP combinada com a tecnologia de manufatura <i>Sheet Moulding Compound</i> submetidas a reciclagem e recuperação energética	[56]
CFRP_Conv_2_Rec+ER	Precursor têxtil às CFRP combinada com a tecnologia de manufatura P4 submetidas a reciclagem e recuperação energética	[56]
CFRP_NoPR	CFRP sem redimensionamento do sistema de propulsão	[47]
CFRP_NoPR_SMS	CFRP sem redimensionamento do sistema de propulsão e 50% de reduções secundárias de massa	[47]
CFRP_PR	CFRP com redimensionamento do sistema de propulsão	[47]
CFRP_PR_SMS	CFRP com redimensionamento do sistema de propulsão e 50% de reduções secundárias de massa	[47]
GFRP	100% GFRP	[50]
GFRP_Aço - ABA	Mistura de GFRP (52%) e aço (49%) com ' <i>avoided burden approach</i> '	[57]
GFRP_Aço - COA	Mistura de GFRP (52%) e aço (49%) com ' <i>cut-off approach</i> '	[57]
GFRP_Aço_Al - ABA	Mistura de GFRP (42%), aço (57%), 0,1% Al e 0,4% de latão com ' <i>avoided burden approach</i> '	[57]
GFRP_Aço_Al - COA	Mistura de GFRP (42%), aço (57%), 0,1% Al e 0,4% de latão com ' <i>cut-off approach</i> '	[57]
GFRP_ER	GFRP com recuperação energética	[55]
GFRP_LF	GFRP com deposição em aterro	[55]
GFRP_MR	GFRP com reciclagem mecânica	[55]
GFRP_Vidro_Aço - ABA	Mistura de GFRP (90%), vidro (10%) e aço (3%) com ' <i>avoided burden approach</i> '	[57]
GFRP_Vidro_Aço - COA	Mistura de GFRP (90%), vidro (10%) e aço (3%) com ' <i>cut-off approach</i> '	[57]

Alternativas	Descrição	REF.
HSCF + HSGF	Fibras de carbono de elevada resistência e fibras de vidro de elevada resistência	[46]
HSS	100% HSS	[47]
HSS_AI_GFRP	Mistura de HSS (70%), AI (20%) e GFRP (10%)	[44]
HSS_SMS	CFRP com 50% de reduções secundárias de massa	[47]
Mg	100% Mg	[46]
Mg - Opt	Mg com FdV: 90% reciclagem em ciclo fechado	[54]
Mg - Pess	Mg com FdV: 75% reciclagem em ciclo aberto	[54]
Mg_CFRP	Mistura de CFRP (44%) e Mg (56%). CFRP com FdV: 10% recuperação energético e 90% reciclagem em ciclo fechado; Mg com FdV: 90%	[54]
PET	100% PET	[50]
rCFRP_20%_EU	rCFRP produzido com 20% de CF secundárias no contexto da UE	[53]
rCFRP_20%_US	rCFRP produzido com 20% de CF secundárias no contexto dos EUA	[53]
rCFRP_40%_EU	rCFRP produzido com 40% de CF secundárias no contexto da UE	[53]
rCFRP_40%_US	rCFRP produzido com 40% de CF secundárias no contexto dos EUA	[53]
rCFRP_60%_EU	rCFRP produzido com 60% de CF secundárias no contexto da UE	[53]
rCFRP_60%_US	rCFRP produzido com 60% de CF secundárias no contexto da EUA	[53]
rCFRP_Method1	Trituração, pirólise, fabrico de papel para produção de rCFRP	[48]
rCFRP_Method2	Triagem, trituração, pirólise, fabrico de papel para produção de rCFRP	[48]
rCFRP_Method3	Pirólise para produção de rCFRP	[48]
rCFRP_Method4	Trituração, pirólise, realinhamento para produção de rCFRP	[47]
rCFRP_Method5	Trituração, solvólise através de água supercrítica e fabrico de papel para produção de rCFRP	[48]
SrPET	100% SrPET	[50]
TWDCI_ABA	Ferro dúctil fundido com parede fina / <i>Thin wall ductile cast iron (TWDCI) com 'avoided burden approach'</i>	[52]
TWDCI_COA	TWDCI com ' <i>cut-off approach</i> '	[52]
vCFRP	100% CFRP virgens	[48]

Nota: LFP: Fosfato de Lítio e Ferro / *Lithium Iron Phosphate*; NMC: Óxido de Lítio Níquel Manganês Cobalto / *Lithium Nickel Manganese Cobalt Oxide*; PHFCV: Veículo Híbrido Plug-In Movido a Hidrogénio / *Plug-In Hybrid Fuel Cell Vehicle*; rCFRP: Polímero Reforçado por Fibras de Carbono Recicladas / *Recycled Carbon Fibers Reinforced Polymer*; vCFRP: Polímero Reforçado por Fibras de Carbono Virgens / *Virgin Carbon Fibers Reinforced Polymer*

RESULTADOS E DISCUSSÃO

- 4.1 Sistemas de Propulsão
- 4.2 Materiais Leves
- 4.3 Fim de Vida e Reciclagem

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

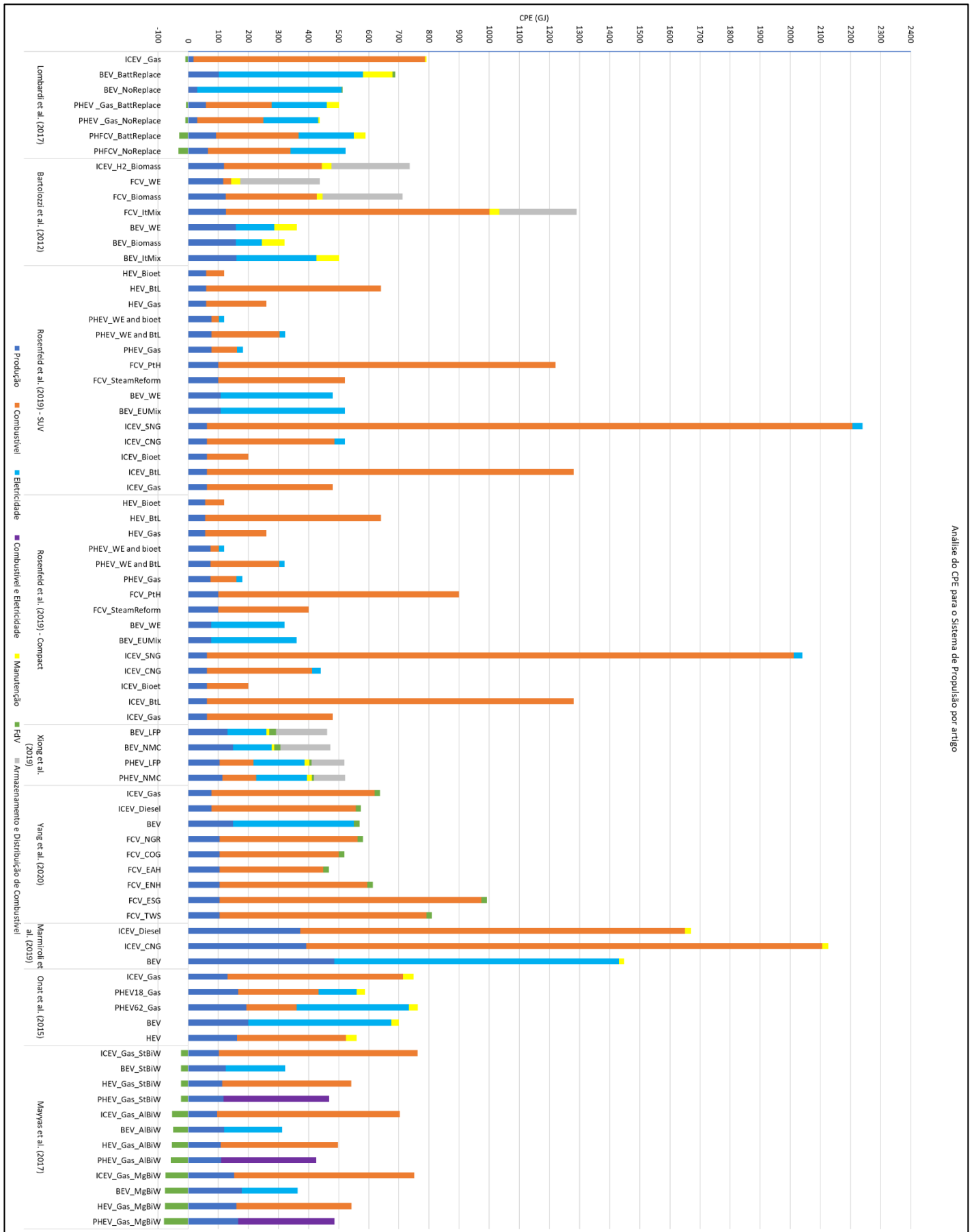
No decorrer deste capítulo são apresentados, sistematizados e comparados os resultados de estudos de ACV para os indicadores de impacto ambiental de CPE e PAG de forma a melhor retratar a influência de três estratégias de melhoria frequentemente estudadas no sector automóvel: seleção do sistema de propulsão dos veículos (secção 4.1), aplicação de materiais leves para redução do seu peso (secção 4.2) e soluções de fim de vida (secção 4.3). Seguidamente, é apresentada uma análise de sensibilidade que permite uma observação mais pormenorizada da influência das diferentes etapas do CV dos veículos. Uma análise complementar para as estratégias de materiais leves e FdV também é efetuada de forma a avaliar o desempenho das alternativas, quanto ao CPE e PAG, por kg de material, ou seja, eliminando a dependência dos resultados quanto ao fator peso.

4.1 Sistema de propulsão

Tal como explicado no capítulo anterior na descrição da metodologia, foram oito os artigos recolhidos (Tabela 4) e analisados relativamente aos diferentes sistemas de propulsão existentes e testados atualmente (ICEV, BEV, FCV, HEV, PHEV). Estes artigos, assim como as restantes estratégias, vão ser analisados segundo o CPE e PAG.

Normalizados para uma distância de 200 000 km, os resultados de impacto ambiental de CV afetos a cada veículo com sistema de propulsão distinto são apresentados na Figura 4 para o CPE (energia primária, em GJ) e na Figura 5 para o PAG (em kg CO₂-eq), distinguindo as diferentes etapas do ciclo de vida.

No anexo A encontram-se as tabelas com as características de cada caso para o sistema de propulsão, assim como os resultados de caracterização para as categorias CPE e PAG, recolhidos dos artigos e convertidos para diferentes distâncias percorridas, utilizadas para elaboração das Figura 4 e Figura 5, e para a análise de sensibilidade abordada no próximo subcapítulo.



Análise do CPE para o Sistema de Propulsão por artigo

Figura 4. CPE dos Artigos para a estratégia de Sistema de Propulsão

Relativamente à energia primária, o estudo conduzido por Lombardi et al. [36] várias tecnologias disponíveis para o sistema de propulsão foram avaliadas no contexto italiano, entre elas, ICEV, BEV, PHEV e PHFCV (sistema complementar da tecnologia elétrica consiste no sistema movido a H₂ utilizado no FCV), onde se recorre à gasolina para os casos do ICEV e PHEV. Os resultados permitem também avaliar a influência da substituição da bateria nos impactes totais para todas as alternativas exceto a convencional. Os impactes são determinados para as etapas de produção, utilização (eletricidade e combustível), manutenção e FdV. Neste estudo as etapas de FdV e produção referem-se apenas ao sistema de propulsão e não ao veículo como um todo. Relativamente aos resultados obtidos, o ICEV é a opção com o CPE mais impactante. Tendo em conta as restantes alternativas, e como seria expectável, existe uma diminuição dos impactes nos casos em que se considera que não é necessária a substituição da bateria. Sendo necessária esta substituição durante a vida útil do veículo (<200 000 km), um aumento na energia primária é registado nos CVs dos veículos de 33,9% para o BEV, 15,5% para o PHEV e, por último, 13,9% para o PHFCV. A tecnologia PHEV apresenta-se como a melhor opção, no que diz respeito ao consumo energético, seguido do PHFCV (+14,7% no caso de não substituição da bateria e +30,9% no caso onde existe substituição da bateria), em terceiro lugar o BEV (+60,8% considerando a colocação de uma nova bateria na sua vida útil e +20,1% se não for procedida a colocação) e em último lugar o ICEV que apresenta um impacte total superior em 58,3% relativo ao PHEV com substituição e 82,9% relativamente ao PHEV sem substituição.

Também no contexto italiano, Bartolozzi et al. [37] tem como objetivo o estudo dos impactes de diferentes processos de obtenção de H₂, tendo em conta a sua fonte. Neste artigo o FCV é avaliado segundo três fontes energéticas distintas: energia eólica, gaseificação da biomassa e *mix* de eletricidade em Itália. Estas opções são, posteriormente, comparadas com um ICEV movido a H₂ recorrendo à gaseificação da biomassa para a sua produção e também com três tecnologias BEV que são alimentadas por diferentes fontes energéticas, as mesmas utilizadas para obtenção do H₂ na tecnologia FCV. As etapas do CV avaliadas incluem a produção, utilização (eletricidade e combustível), manutenção e D&A. Contrariamente a Lombardi et al. [36], Bartolozzi et al. [37], não regista o ICEV como pior opção, mas sim o FCV, que assume a produção de H₂ através da rede elétrica italiana, maioritariamente baseada em fontes de energia fósseis (não renováveis). Neste estudo, a opção mais vantajosa do ponto de vista energético é o BEV, em que a energia elétrica é produzida por queima de biomassa; em segundo, e em terceiro lugar as tecnologias alimentadas por energia eólica (+13,1% para BEV e +36,8% para FCV) e de seguida os BEVs com a sua produção pela rede elétrica (+56,9%). Em quinto lugar está o FCV com produção através de biomassa e impacte superior em 122,9% comparativamente à melhor opção, acompanhado pelo ICEV (+130,2%). Por último a pior opção, como referido anteriormente, é o FCV com produção pela rede elétrica italiana, que apresenta impactes superiores em 303,5% relativo ao BEV com produção energética através de biomassa.

Dois tipos de veículos são analisados por Rosenfeld et al. [38], SUV e compacto no contexto da UE-28. O tipo de opções analisadas neste estudo difere daqueles já

analisados, visto que não só são avaliados diferentes modos de propulsão, mas também diferentes combustíveis. Este estudo integra as tecnologias ICEV, BEV, HEV, PHEV e FCV e os seguintes combustíveis/métodos de obtenção energéticos: gasolina, bioetanol, energia eólica, *biomass-to-liquid*, *power-to-hydrogen*, conversão por vapor, *mix* de eletricidade e gás natural sintético ou comprimido. Os impactes são quantificados apenas para as fases de produção e utilização (eletricidade e combustível). Não são registadas diferenças significativas entre as diferentes tipologias de veículos, dado que, por exemplo, as três piores e três melhores opções se mantêm em ambos, assim sendo, serão apresentados os resultados para o veículo compacto. São identificadas elevadas amplitudes de impacto no CPE dentro das próprias tecnologias, por exemplo, considerando apenas os HEV, a amplitude percentual da melhor opção para a pior tem um aumento de 433,3%, sendo que para os ICEV é de 1020%. As opções mais vantajosas do ponto de vista energético incluem os HEV com energia produzida por bioetanol e os PHEV com energia produzida por energia eólica e bioetanol. De seguida, o PHEV a gasolina e o ICEV a bioetanol com mais 50% e 66,7% de impactes no CPE, respetivamente. O HEV que utiliza gasolina como combustível (+116,7%), assim como o PHEV que complementa energia eólica e *biomass-to-liquid* (+166,7%), também são boas alternativas com alguns dos menores consumos energéticos obtidos neste caso de estudo. As três alternativas com consumos mais intensivos incluem o FCV a *power-to-hydrogen* com mais de 650% de consumo energético, o ICEV a *biomass-to-liquid* (+966,7%) e, como mais impactante está o ICEV a gás natural sintético com mais de 1600% de energia consumida relativamente às melhores opções.

Diferentes tipos de baterias foram analisadas e comparadas por Xiong et al. [39], LFP e NMC, para as tecnologias de BEV e PHEV, na China. Este artigo considera todas as etapas do CV: produção, utilização (eletricidade e combustível), manutenção, FdV e D&A. Quanto aos diferentes sistemas de propulsão, o BEV acarreta menor consumo energético comparativamente ao PHEV, tanto para as baterias LFP (-11,3%) como para as baterias NMC (-9,4%). Tendo em conta as características das baterias, as LFP têm um CPE menor relativamente às NMC, acarretando estas últimas impactes ligeiramente mais elevados, de 2,5% e 0,3% para o BEV e PHEV, respetivamente. No geral, as diferenças de consumo energético não são muito elevadas entre as diferentes tipologias de baterias, sendo a melhor alternativa o BEV com bateria LFP e a pior o PHEV com bateria NMC, com um impacto superior de 13,1% relativamente à primeira.

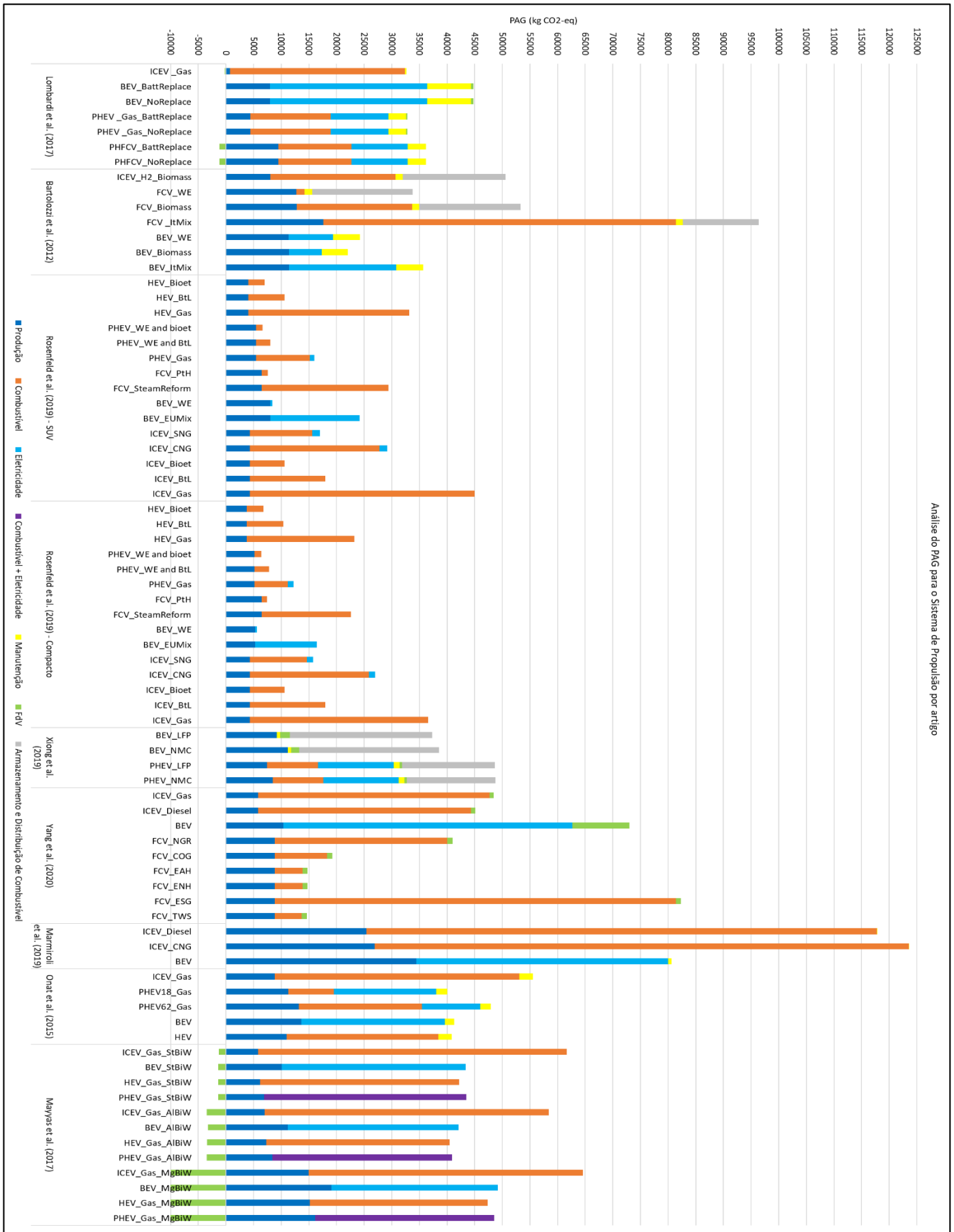
Tal como Bartolozzi et al. [37], o estudo conduzido por Yang et al. [40] tem como objetivo a avaliação dos FCV. Este estudo baseia-se no contexto chinês e analisa diferentes processos de obtenção de H₂, sendo eles os seguintes: conversão de gás natural, gás de síntese, eletrólise por hidroeletricidade ao abandono (reaproveitamento) ou normal, eletrólise pela rede elétrica chinesa e separação termoquímica da água. As opções FCV são comparadas com dois ICEVS, a gasolina e diesel, e com um BEV. As etapas para as quais os impactes estão quantificados são as seguintes: produção, utilização (combustível e eletricidade) e FdV. Entre todas as alternativas analisadas, o FCV com H₂ produzido por energia hidroelétrica ao abandono é a opção mais vantajosa com menores consumos de energia. Em segundo lugar está o FCV com H₂ produzido através

de gás de síntese, com mais 11,2% de impacto energético por comparação à melhor alternativa, seguido do BEV (+22,0%), ICEV a diesel (+22,8%) e FCV por reformação do gás natural (+24,5%). Com mais 31,3% de impactos está o FCV com produção por energia hidroelétrica normal e mais 36,3% para o ICEV a gasolina. Os consumos energéticos mais elevados pertencem a FCV com H₂ produzido pela separação eletroquímica da água e pela rede elétrica chinesa, com impactos superiores em 73,4% e 112,5% comparativamente à melhor opção, respetivamente. Mesmo em contextos diferentes, China e Itália, Yang et al. [40] e Bartolozzi et al. [37] chegam à conclusão de que a utilização da rede elétrica para produção de H₂ vem aumentar significativamente os impactos relativos ao CPE.

Em Marmiroli et al. [41] dois combustíveis para o ICEV são considerados e comparados com um BEV, diesel e gás natural comprimido, no contexto italiano. As etapas com impactos quantificados incluem a produção, utilização (eletricidade e combustível) e manutenção. O BEV é identificado como a melhor opção, menor consumo energético, seguido do modelo convencional alimentado a diesel, com mais 15,3% de impactos, e a opção mais intensiva é o modelo convencional alimentado a gás natural comprimido (+46,8%).

Onat et al. [42], utiliza como contexto os EUA para a comparação de diferentes tecnologias de sistema de propulsão, nomeadamente, ICEV, BEV, HEV e PHEV, onde em todas as opções em que é necessário combustível se considera gasolina, para o PHEV são analisados dois modelos distintos com diferentes FU. As fases avaliadas para o CV do veículo são a produção, utilização (eletricidade e combustível) e manutenção. A opção com menor consumo energético é o HEV, posteriormente o PHEV18 (menor FU) com mais 5,1% de impacto, seguido do BEV e ICEV a gasolina, mais 25,1% e 33,8%, respetivamente, e, por fim, o PHEV62 (maior FU) com o consumo mais elevado (36,3%).

Mayyas et al. [43] analisam diferentes sistemas de propulsão, nomeadamente ICEV, BEV, HEV e PHEV, com o BiW constituído por diferentes materiais: Aço, Al e Mg. Os impactos encontram-se quantificados para a produção, utilização (eletricidade e combustível) e FdV. Conclui-se que, independentemente das alterações no BiW, o BEV é a melhor opção no que diz respeito aos consumos energéticos. Comparativamente ao BEV, o PHEV apresenta, em média, mais 43,3% de consumo energético no seu CV, seguido do HEV com 68,0% e, por fim, o ICEV com mais 143,1% de média de impactos. Se for analisada a variação dentro de cada sistema de propulsão em análise, ou seja, analisando o fator peso para cada tecnologia (sendo o mais pesado o BiW de aço e o mais leve de Al), verifica-se que o ICEV atinge a maior amplitude de impactos, seguido do PHEV, HEV e BEV, ordenadamente.



Análise do PAG para o Sistema de Propulsão por artigo

Figura 5. PAG dos Artigos para a estratégia de Sistema de Propulsão

Lombardi et al. [36] ao quantificar as emissões conclui que o ICEV emite a menor quantidade de CO₂ ao longo do seu CV, tendo este o menor potencial poluente comparativamente ao BEV, PHEV e PHFCV. Como mostra o gráfico a necessidade de substituição da bateria não afeta este indicador. Imediatamente a seguir ao ICEV, está o PHEV com um PAG superior em apenas 1,4%, em terceiro lugar surge o PHFCV com mais 8,0% de emissões e, por último, como opção mais poluente está o BEV com mais 38,2% de emissões de CO₂ comparativamente à melhor opção. Os resultados obtidos não coincidem com o esperado, dado que o BEV acaba por ter associados impactes mais elevados. Isto pode ser explicado pelo facto de o *mix* elétrico italiano, em 2018 (ano posterior à publicação deste artigo científico), ser composto por menos de 50% de energias renováveis, particularmente, 33,9% [59]. Como podemos observar na Figura 2, o facto de o BEV ter a segunda produção mais poluente, assim como a maior intensidade relativamente às emissões de CO₂ na fase de manutenção também vai contribuir para o seu mau desempenho.

Através do estudo realizado por Bartolozzi et al. [37], facilmente se conclui que o FCV que obtém energia através da rede elétrica italiana para produção de H₂ por hidrólise é aquele que acarreta mais impactes, visto que o *mix* da rede italiana é sobretudo constituído por fontes não renováveis e, por isso, poluentes. Ao considerar todas as hipóteses em análise, os BEVs que recorrem a fontes renováveis comprovam um melhor desempenho, estando associados a menores emissões de CO₂. A opção menos poluente é o BEV com produção elétrica por biomassa, seguido da produção através da energia eólica para o BEV e FCV (+9,8% e +53,0%, respetivamente). Em quarto lugar está o BEV que recorre à rede elétrica com mais 61,5% das emissões associadas, seguido do veículo convencional onde o aumento do indicador é 129,3% e, com mais emissões associadas, está a tecnologia FCV com produção através de biomassa (+141,6%) e através da rede elétrica italiana (+336,7%). Alinhado com os resultados obtidos por Lombardi et al. [36] o *mix* elétrico italiano reflete maus desempenhos nas tecnologias, atribuindo impactes elevados não só ao BEV mas também ao FCV.

Neste indicador, para Rosenfeld et al. [38], são registadas diferenças mais significativas entre os tipos de veículos, SUV e compacto. Para o SUV as melhores opções registadas são o PHEV cuja produção energética combina o bioetanol e a energia eólica, seguido do HEV a bioetanol (+6,1%) e, em terceiro lugar, o FCV com *power-to-hydrogen* (+15,2%). O PHEV que combina *biomass-to-liquid* e energia eólica também se revela uma boa opção com mais 21,2% de PAG, assim como, o BEV a energia eólica com emissões superiores em 27,3% relativamente à alternativa menos poluente. As três piores opções, com taxas mais elevadas de emissões de CO₂, são o HEV recorrendo à gasolina, FCV a *steam reforming* e o ICEV que utiliza também gasolina como combustível, com emissões superiores em: 345,5%, 403,0% e 581,8%, respetivamente, quando comparadas com PHEV com produção energética através de bioetanol e energia eólica. O veículo compacto apresenta ordens diferentes tanto nas melhores alternativas como nas menos vantajosas. As melhores alternativas correspondem às anteriores, contudo são apresentadas em diferente ordem, sendo o BEV com produção eólica a opção menos poluente, seguido então pelo PHEV que complementa a energia eólica com o bioetanol

(+14,3%) e, em terceiro lugar, o HEV a bioetanol com mais 21,4% de PAG. De notar que opções como: FCV a *power-to-hydrogen* e o PHEV que complementa a energia eólica com o *biomass-to-liquid* também são opções com baixas emissões associadas (mais 32,1% e 39,3%, respetivamente). Como opções mais poluentes estão: HEV a gasolina (+314,3%), ICEV a gás natural comprimido (+382,1%) e ICEV a gasolina (+553,3%). As amplitudes registadas dentro de cada tecnologia em avaliação são, mais uma vez, elevadas, atingindo em média para os HEVs mais 307,7% de emissões de CO₂ da pior opção para a melhor, sendo que a amplitude para os ICEVs é de 284,8%.

Em Xiong et al. [39], o BEV é associado a menores taxas de emissão de CO₂, sendo que o PHEV tem taxas superiores, em média, de 30,7%. Embora tenham sido identificadas diferenças nas emissões dos diferentes tipos de baterias, estas são mínimas, no caso dos BEV existe um acréscimo de 3,3% nas emissões de CO₂ quando passamos de baterias LFP para NMC e, no caso dos PHEV, as baterias NMC acarretam mais 0,1% de emissões comparativamente às LFP.

Segundo Yang et al. [40] o FCV com obtenção de H₂ por separação eletroquímica da água surge como a alternativa mais vantajosa, tendo um menor PAG associado, imediatamente seguido das hipóteses que utilizam a energia hidroelétrica para os FCV (normal ou ao abandono) com mais 0,7% de emissões. Com um intervalo superior encontra-se o FCV com H₂ obtido através de gás de síntese com mais 31,2% de impactes, seguido do FCV com produção por reforma do gás natural (+179,5%). Os ICEV a diesel e a gasolina acarretam mais 207,5% e 230,4% de emissões de CO₂, respetivamente. O BEV está na oitava posição com mais 398,1% de impactes comparativamente à melhor opção, FCV por separação eletroquímica da água, e, em último, com o mais elevado PAG está a produção através da rede elétrica chinesa, constituída na sua maioria por fontes de energia não renováveis, com mais 461,4% de emissões.

No estudo realizado por Marmioli et al. [41], o BEV é identificado como a melhor opção com menor PAG e, entre as duas hipóteses convencionais, o diesel destaca-se como mais vantajoso do que o ICEV movido a gás natural comprimido, os quais geram mais 46,2% e 53,2% de emissões de CO₂ relativamente ao BEV, respetivamente.

Onat et al. [42] identifica o PHEV18 (menor FU) como a opção mais vantajosa nesta categoria. De seguida, com taxas de emissão de CO₂ mais elevadas, estão o HEV e o BEV com mais 2,2% e 3,3%, respetivamente. Com um intervalo mais alargado, 19,8%, encontra-se o PHEV62 (maior FU) e, por último, o ICEV 38,8%.

Alinhado com os resultados obtidos para o CPE nos estudos mencionados anteriormente, Mayyas et al. [43], conclui que a melhor opção para todos os BiW é o HEV. Contudo, o segundo lugar varia, sendo que na alternativa mais pesada o BEV encontra-se em segundo, passando para terceiro nas alternativas mais leves, dado que quanto mais leve for o BiW mais afastado fica o BEV da segunda opção registada, sendo que para o BiW constituído por Al e Mg a segunda opção preferível é o PHEV. Portanto, o HEV é identificado como a hipótese com menos emissões associadas, o PHEV

apresenta uma média de mais 2,5% de emissões, seguido do BEV (+4,2%) e, por último o ICEV (+147,5%).

A análise deste conjunto de artigos, tendo em conta o sistema de propulsão, em ambos os indicadores, CPE e PAG, permitiu a identificação de pontos determinantes no CV de um veículo, entre os quais:

1. A necessidade de substituição da bateria conduz a um aumento significativo no consumo energético, sendo este um fator a ter em conta na sua fabricação e na vida útil da bateria instalada. Contudo o mesmo não se verifica no PAG, onde a substituição ou não substituição da bateria ao longo do CV não apresenta qualquer influência. Isto pode ser explicado pelo facto de a extração de lítio influenciar apenas em 2% no indicador PAG, sendo que esta percentagem foi obtida para o contexto europeu [36].
2. A utilização do H₂ como fonte energética, FCV ou ICEV movido a H₂, foi amplamente estudada, possibilitando por isso a compreensão do peso da fase de produção do H₂ no CPE e PAG dos veículos. As alternativas que utilizam a rede elétrica são as mais impactantes em ambas as categorias. Tendo em conta o CPE, as alternativas que utilizam fontes renováveis, nomeadamente, energia eólica e hidroelétrica (por abandono) são as mais benéficas. O PAG, por sua vez, além de identificar a energia eólica como uma boa escolha, inclui também a energia hidroelétrica normal ou por abandono e a separação termoquímica da água. A biomassa também pode ser vista como uma boa opção em ambos os indicadores.
3. Com o aumento do peso do veículo a magnitude da energia primária e CO₂ associados à da fase de utilização do veículo aumenta, sendo essa influência mais notória para alguns combustíveis/fontes de eletricidade usados, nomeadamente, nos: FCVs e BEVs para o CPE e alternativas a gasolina, assim como, FCV a *steam reforming* e o BEV que recorre à rede elétrica da UE, para o PAG.
4. Dependendo do tipo de sistema de propulsão (tecnologia, vetor energético e fonte de energia) o CPE e o PAG associados ao ciclo de vida de um veículo podem atingir intervalos muito significativos, sendo este ponto sensível e de elevada relevância.
5. O bioetanol aplicado às diferentes alternativas (ICEV, HEV, PHEV), seja individualmente ou complementado com outra fonte energética, como energia eólica, revela-se como uma boa alternativa na redução do CPE e PAG. O artigo analisado que estuda bioetanol refere-se ao etanol celulósico produzido através de métodos bioquímicos utilizando materiais como resíduos de madeira, relva, plantações agrícolas.
6. O gás natural, nomeadamente, sintético e comprimido, resulta num aumento significativo dos impactes. Consequentemente, torna-se essencial a sua substituição gradual por diferentes fontes energéticas, como, bioetanol ou

- biomassa ou até alteração do sistema de propulsão para alternativas eletrificadas. O mesmo se verifica para os veículos que recorrem a diesel e gasolina.
7. Tendo em conta os impactes associados aos veículos convencionais, ao comparar a gasolina e diesel o último tem a capacidade de redução dos impactes associados à energia consumida e CO₂ emitido.
 8. A influência do fator de utilidade, nas tecnologias de eletricidade e combustível, causa variações nos resultados obtidos. Sendo que, quanto maior o fator de utilidade maiores são impactes de ambas as categorias.
 9. A troca de baterias entre LFP e NMC não é responsável por alterações significativas nos impactes, ainda assim as LFP resultam em menores quantidades de CO₂ emitido e energia consumida.
 10. As alternativas eletrificadas, PHEV, HEV e BEV que, repetidamente, apresentam os melhores desempenhos, sobretudo devido à fase de utilização, levam a quedas no CPE e PAG.
 11. A importância do contexto, nos casos de utilização da rede elétrica, sendo que esta está altamente dependente do país onde é realizada a análise. Muitas vezes as hipóteses que consideram a rede elétrica do país acabam por ser a pior opção, dado que o *mix* representa uma maior quantidade de fontes não renováveis do que renováveis.

Ainda no capítulo referente aos sistemas de propulsão, existem artigos que quantificam os impactes associados à distribuição e transporte de veículos. A Tabela 7 apresenta os impactes quantificados para esta fase, onde é especificado o intervalo de pesos dos veículos em estudo, impactes normalizados para o CV e alguns aspetos relevantes que influenciam o CPE e PAG desta fase.

Verifica-se que em Marmioli et al. [41] se encontram os impactes mais elevados, o que pode ser justificado por dois motivos: utilização de transporte marítimo para além do rodoviário, contrariamente aos restantes artigos, e pelo facto dos veículos transportados se encontrarem num intervalo de pesos bastante superior, sendo que em Yang et al. [40] os veículos em análise têm metade do peso. Entre Xiong et al. [39] e Yang et al. [40], o primeiro tem associados maiores impactes, que podem ser explicados pela maior distância percorrida para o transporte e também pelo facto de os veículos estudados terem pesos superiores. Desta forma, identificam-se os fatores: distância percorrida, modo de transporte e peso do veículo como preponderantes na redução de emissão de impactes, tanto do CPE como do PAG, na fase de distribuição dos veículos. Apesar de não existir variação de combustível nos artigos considerados, à partida, a utilização de um sistema de propulsão à base de fontes renováveis ou eletrificados (a 100% ou híbrido) iria permitir uma redução significativa nestes impactes.

Tabela 7. Impacte de distribuição e transporte de veículos para a estratégia de Sistema de Propulsão

Intervalo de Pesos dos	Distribuição e Transporte de Veículos		Distribuição e Transporte de Veículos (normalizados para o CV)		Descrição
	CPE	PAG	CPE (GJ)	PAG (kg CO ₂ -eq)	
Xiong et al. 1760 - 1950	0,0253	1,84	4,05	294	Distância: 2100 km Combustível: Diesel
	0,0342	2,44	4,10	49	
	0,0227	1,73	3,63	277	
	0,0311	2,23	3,73	268	
Yang et al. [40] 1294 - 1524	0,91	84,3	0,91	84	Distância: 1207 km. Combustível: Diesel
	0,91	84,3	0,91	84	
	1,12	105,1	1,12	105	
	1,07	100,1	1,07	100	
	1,07	100,1	1,07	100	
	1,07	100,1	1,07	100	
	1,07	100,1	1,07	100	
	1,07	100,1	1,07	100	
Marmiro 2577 -	9,91	594	9,91	594	Transporte rodoviário e marítimo. Sem especificação de distância percorrida e combustível utilizado.
	9,91	594	9,91	594	
	9,91	594	9,91	594	

4.1.1 Análise de Sensibilidade

Neste capítulo é realizada uma análise de sensibilidade onde se estuda a influência da distância percorrida durante a etapa de utilização do veículo, nos impactes de CV: CPE (Tabela 8) e PAG (Tabela 9).

Os resultados de CV são apresentados para distâncias percorridas de 0 a 300 000 km, em intervalos de 50 000 km. De referir que, o impacte total de umas distâncias para as outras é apenas influenciado por alterações na fase de uso e D&A, dado que apenas esta depende da variação da distância percorrida, mantendo-se estáveis os impactes relativos à produção e FdV. A coluna referente a 0 km mostra-se útil na quantificação dos impactes de produção e FdV, permitindo a identificação das tecnologias com menos impactes nestas fases.

Os gráficos do impacte cumulativo ao longo do CV obtidos a partir destas tabelas estão no Anexo A, onde é apresentado o respetivo impacte em função da distância percorrida.

As tabelas apresentam também uma coluna referente ao declive para cada alternativa em análise, que permite compreender o respetivo peso da fase de utilização: quanto maior o declive maior o impacte da fase de utilização por km percorrido. A lógica do gradiente de cores identifica os impactes mais elevados com cor vermelha, enquanto as

opções com menor impacto se encontram a verde. As alternativas a meio destes limites apresentam diferentes tonalidades sendo que quanto mais próxima esta tonalidade estiver do vermelho, maiores impactos esta opção tem associados.

Os resultados obtidos pela análise da categoria CPE, mostram que existem alternativas que alteram a sua posição relativamente às restantes à medida que a distância percorrida no seu CV aumenta. Todas as alternativas que incluem um ICEV no seu estudo começam por apresentá-lo como a melhor ou segunda melhor opção, para o caso de Rosenfeld et al. [38], no entanto com o aumento da distância o seu desempenho piora, podendo isto ser confirmado pelo seu elevado declive que reflete a sua sensibilidade à fase de utilização e D&A. Os BEVs, por sua vez, são apresentados como as alternativas mais prejudiciais aos 0 km, contudo o aumento a distância percorrida mitiga este mau desempenho, acabando por torná-lo uma opção a considerar aos 300 000 km, aliás em Xiong et al. [39], Yang et al. [40], Marmioli et al. [41] e Mayyas et al. [43] acaba por se tornar mesmo uma opção benéfica e a ser priorizada relativamente às restantes. Isto pode ser comprovado pelo seu baixo declive, uma vez que apresenta valores baixos representando assim a pouca influência que a fase de utilização e D&A têm sobre esta tecnologia. As alternativas híbridas, HEV e PHEV, acabam por obter resultados mais divergentes entre artigos, no entanto, estas opções apresentam impactos menos intensivos inicialmente comparativamente aos veículos elétricos (devido ao tamanho, capacidade e potência da bateria instalada na fase de produção), mas superiores aos convencionais, tendo apenas como exceção Rosenfeld et al. [38]. Os HEV e PHEV acabam por obter declives superiores ao BEV, significando isto que o aumento da distância vai prejudicar o seu desempenho quando comparados com esta tecnologia, sendo que aos 300 000 km os impactos obtidos vão depender da magnitude dos impactos aos 0 km e do declive, onde a sua relação determina o quão prejudicial ou benéfica será a adoção deste sistema de propulsão. Tendo em conta o CPE, os FCVs, de um modo geral, não se encontram entre as melhores alternativas na fase de produção e FdV, apresentando impactos mais elevados do que os ICEVs, HEVs e PHEVs e mais baixos do que os BEVs, sendo a única exceção Rosenfeld et al. [38], onde estes apresentam impactos mais elevados comparativamente aos veículos 100% elétricos. Os artigos que analisam diferentes modos de obtenção de H₂, Bartolozzi et al. [37], Rosenfeld et al. [38] e Yang et al. [40], mostram a disparidade de resultados obtidos para o declive e 300 000 km dentro desta tecnologia, sendo que as alternativas que recorrem a fontes limpas apresentam, naturalmente, declives significativamente inferiores, aquelas alimentadas a fontes não renováveis. Ou seja, para este sistema de propulsão são registadas diferenças na sua posição relativamente às restantes alternativas, onde para as alternativas alimentadas a fontes fósseis o desempenho piora significativamente atingindo impactos prejudiciais aos 300 000 km com declives elevados, e para as alternativas alimentadas a fontes limpas, associadas a baixos declives, tornam-se opções a considerar para implementação de diferentes sistemas de propulsão, com baixos impactos.

Tabela 8. Análise de Sensibilidade do CPE em GJ com variação da distância percorrida para os artigos de Sistema de Propulsão

Artigos	Alternativas	0	50 000	100 000	150 000	200 000	250 000	300 000	Declive
Lombardi et al. [36]	ICEV_Gas	7	201	395	588	782	976	1169	194
	BEV_BattReplace	112	256	400	544	688	831	975	144
	BEV_NoReplace	35	154	274	394	513	633	753	120
	PHEV_Gas_BattReplace	52	171	273	383	494	604	715	111
	PHEV_Gas_NoReplace	21	132	224	326	428	529	631	102
	PHFCV_BattReplace	64	211	312	436	560	684	807	124
	PHFCV_NoReplace	35	172	263	377	492	606	720	114
Bartolozzi et al. [37]	ICEV_H2_Biomass	119	273	427	582	736	890	1045	154
	FCV_WE	116	197	277	357	437	518	598	80
	FCV_Biomass	125	272	419	566	713	860	1007	147
	FCV_ItMix	126	417	708	999	1291	1582	1873	291
	BEV_WE	158	209	260	311	362	413	463	51
	BEV_Biomass	159	199	239	280	320	360	400	40
	BEV_ItMix	160	245	331	416	502	587	673	86
SUV - Rosenfeld et al. [38]	HEV_Bioet	60	75	90	105	120	135	150	15
	HEV_BtL	60	205	350	495	640	785	930	145
	HEV_Gas	60	110	160	210	260	310	360	50
	PHEV_WE and bioet	78	89	99	110	120	131	141	11
	PHEV_WE and BtL	78	139	200	261	322	383	444	61
	PHEV_Gas	78	104	130	156	182	208	234	26
	FCV_PtH	100	380	660	940	1220	1500	1780	280
	FCV_SteamReform	100	205	310	415	520	625	730	105
	BEV_WE	108	201	294	387	480	573	666	93
	BEV_EUMix	108	211	314	417	520	623	726	103
	ICEV_SNG	62	607	1151	1696	2240	2785	3329	545
	ICEV_CNG	62	177	291	406	520	635	749	115
	ICEV_Bioet	62	97	131	166	200	235	269	35
	ICEV_BtL	62	367	671	976	1280	1585	1889	305
ICEV_Gas	62	167	271	376	480	585	689	105	
Compact - Rosenfeld et al. [38]	HEV_Bioet	56	72	88	104	120	136	152	16
	HEV_BtL	56	202	348	494	640	786	932	146
	HEV_Gas	56	107	158	209	260	311	362	51
	PHEV_WE and bioet	74	86	97	109	120	132	143	12
	PHEV_WE and BtL	74	136	197	259	320	382	443	62
	PHEV_Gas	74	101	127	154	180	207	233	27
	FCV_PtH	100	300	500	700	900	1100	1300	200
	FCV_SteamReform	100	175	250	325	400	475	550	75
	BEV_WE	76	137	198	259	320	381	442	61
	BEV_EUMix	76	147	218	289	360	431	502	71
	ICEV_SNG	62	557	1051	1546	2040	2535	3029	495
	ICEV_CNG	62	157	251	346	440	535	629	95
	ICEV_Bioet	62	97	131	166	200	235	269	35
	ICEV_BtL	62	367	671	976	1280	1585	1889	305
ICEV_Gas	62	167	271	376	480	585	689	105	
Xiong et al. [39]	BEV_LFP	152	229	306	384	461	538	616	77
	BEV_NMC	169	245	321	397	472	548	624	76
	PHEV_LFP	111	213	315	418	520	622	724	102

Artigos	Alternativas	0	50 000	100 000	150 000	200 000	250 000	300 000	Declive
	PHEV_NMC	121	221	322	422	522	622	722	100
Yang et al. [40]	ICEV_Gas	95	230	366	501	637	772	907	135
	ICEV_Diesel	95	214	334	454	573	693	812	120
	BEV	169	269	369	470	570	670	770	100
	FCV_NGR	123	238	352	467	581	696	810	115
	FCV_COG	123	222	321	420	519	618	717	99
	FCV_EAH	123	209	295	381	467	553	639	86
	FCV_ENH	123	246	368	491	613	735	858	123
	FCV_ESG	123	340	558	775	992	1210	1427	217
	FCV_TWS	123	295	466	638	809	981	1153	172
Marmioli et al. [41]	ICEV_Diesel	372	697	1021	1346	1670	1995	2319	325
	ICEV_CNG	392	826	1259	1693	2126	2560	2993	434
	BEV	485	726	967	1207	1448	1689	1930	241
Onat et al. [42]	ICEV_Gas	130	285	439	594	749	903	1058	155
	PHEV18_Gas	165	271	377	482	588	693	799	106
	PHEV62_Gas	193	335	478	620	763	905	1048	143
	BEV	200	325	450	575	700	825	950	125
	HEV	162	262	361	460	559	659	758	99
Mayyas et al. [43]	ICEV_Gas_StBiW	79	244	409	574	738	903	1068	165
	BEV_StBiW	101	151	200	250	299	349	398	49
	HEV_Gas_StBiW	89	197	304	411	518	626	733	107
	PHEV_Gas_StBiW	95	182	270	358	446	534	622	88
	ICEV_Gas_ALBiW	43	195	346	498	650	802	954	152
	BEV_ALBiW	71	119	167	215	263	311	359	48
	HEV_Gas_ALBiW	53	151	248	345	443	540	637	97
	PHEV_Gas_ALBiW	52	131	210	289	368	447	525	79
	ICEV_Gas_MgBiW	78	227	377	526	676	825	975	150
	BEV_MgBiW	101	148	194	241	287	333	380	46
	HEV_Gas_MgBiW	83	179	275	371	466	562	658	96
PHEV_Gas_MgBiW	85	165	245	325	405	485	565	80	

A análise dos resultados, permite avaliar o peso que a fase de produção e FdV tem nos veículos elétricos e mais eletrificados. Todos os artigos analisados, sem exceção, colocam o BEV como a alternativa com maior consumo energético aos 0 kms (i.e: na fase de produção).

Os elevados impactes na produção de veículos eletrificados, nomeadamente o BEV, devem-se maioritariamente aos consumos e emissões associados à fase produtiva das baterias Li-ion. Qiao et al. [60], comparou a produção dos ICEVs com os BEVs e concluiu que os valores associados à etapa de produção de um BEV são cerca de 50% superiores aos dos veículos convencionais. Também neste estudo são registados, em ambas as tecnologias, impactes elevados associados à produção do BiW e chassis, uma vez que são componentes estruturais de elevado peso, contudo para o caso dos BEVs esta fase acaba por acarretar impactes bastante superiores devido ao terceiro componente mais intensivo: as baterias Li-ion. Estas baterias, comparativamente aos restantes componentes, são responsáveis por cerca de 13% da energia consumida na produção e 20% das emissões de GEE nos veículos elétricos. As opções que integram a eletricidade

e combustível para a sua movimentação na fase de uso, apresentam maiores impactes nas fases independentes da distância percorrida, comparativamente ao ICEV. Como única exceção estão os resultados obtidos por Rosenfeld et al. [38] que colocam o HEV com um menor CPE do que o ICEV, embora os ICEVs tenham apenas mais 3,3% de impactes associados para a SUV e 10,7% para os veículos compactos. Onat et al. [42] mostra nos seus resultados que quanto mais eletrificado for o veículo em causa, maior impacte vai ter o CPE, isto porque ao analisar dois PHEVs, aquele com maior FU acarreta um maior consumo energético na fase de produção. Para dar suporte a esta lógica, Rosenfeld et al. [38], Onat et al. [42] e Mayyas et al. [43], que incluem o HEV no seu estudo, concluem sempre que este tem associado um menor consumo quando comparado com os PHEVs. O mesmo se verifica comparando o BEV e PHEV em Lombardi et al., Rosenfeld et al. [38], Xiong et al. [39], Onat et al. [42] e Mayyas et al. [43] onde o BEV mostra sempre um maior impacte relativamente ao PHEV.

O cálculo do declive permitiu a identificação das alternativas com pior desempenho na fase de utilização, ou seja, que tem maior energia primária associada por km percorrido. Contrariamente às fases de produção e FdV, a utilização do veículo juntamente com a fase de D&A, tem uma maior influência nos ICEVs. Os artigos que incluem a opção convencional no seu estudo confirmam esta maior influência, exceto em casos em que diferentes tecnologias utilizam, vetores energéticos mais energeticamente intensivos ou que recorram a fontes mais poluentes, como em Bartolozzi et al. [37], Rosenfeld et al. [38] e Yang et al. [40]. As tecnologias que recorrem a fontes renováveis, mostram-se menos dependentes da fase de utilização, resultando num melhor desempenho, o inverso acontece com tecnologias que utilizam gasolina, diesel, gás natural e a rede elétrica do país em questão, isto é comprovado por: Bartolozzi et al. [37], Rosenfeld et al. [38], Yang et al. [40] e Marmioli et al. [41]. As diferenças no consumo energético para as diferentes baterias, LFP e NMC por Xiong et al. [39], mostram que apesar das LFP terem menor impacte na fase de produção, estas apresentam declives superiores embora a diferença seja extremamente baixa. Onat et al. [42] mostra que a tecnologia PHEV com menor FU acaba por ter um menor declive, o que pode ser explicado pelo facto da tecnologia PHEV62 ter um sistema a gasolina menos eficiente em comparação com a PHEV18.

A análise de sensibilidade permite compreender o comportamento do CPE das hipóteses consideradas nas diferentes fases do CV. Conclui-se que as alternativas com menor impacte durante a fase de produção, acabam por ter o seu melhor desempenho compensado pela fase de utilização e D&A, quando considerado, uma vez que, a fase de utilização, que inclui não só o consumo de combustível e eletricidade mas também manutenção do veículo, contribui em média com 70,8% para o total de impactes, mostrando, por isso, uma elevada dependência destas etapas. No geral, as hipóteses menos influenciadas pelo uso do veículo acabam por apresentar menor consumo energético no seu CV aos 300 000 km, com exceção apenas em Xiong et al. [39].

Tabela 9. Análise de Sensibilidade do PAG em kg CO₂-eq com variação da distância percorrida para os artigos de Sistema de Propulsão

Artigos	Alternativas	0	50 000	100 000	150 000	200 000	250 000	300 000	Declive
Lombardi et al. [36]	ICEV_Gas	475	8454	16432	24411	32389	40367	48346	7978
	BEV_BattReplace	8424	17509	26594	35679	44764	53849	62934	9085
	BEV_NoReplace	8424	17509	26594	35679	44764	53849	62934	9085
	PHEV_Gas_BattReplace	4668	11710	18753	25795	32838	39880	46923	7043
	PHEV_Gas_NoReplace	4668	11710	18753	25795	32838	39880	46923	7043
	PHFCV_BattReplace	8325	14992	21660	28327	34994	41662	48329	6667
	PHFCV_NoReplace	8325	14992	21660	28327	34994	41662	48329	6667
Bartolozzi et al. [37]	ICEV_H2_Biomass	8010	18657	29305	39952	50600	61248	71895	10648
	FCV_WE	12720	17983	23245	28508	33770	39033	44295	5263
	FCV_Biomass	12800	22930	33060	43190	53320	63450	73580	10130
	FCV_ItMix	17640	37325	57010	76695	96380	116065	135750	19685
	BEV_WE	11373	14590	17807	21023	24240	27457	30673	3217
	BEV_Biomass	11384	14055	16727	19398	22070	24742	27413	2672
	BEV_ItMix	11390	17455	23520	29585	35650	41715	47780	6065
SUV - Rosenfeld et al. [38]	HEV_Bioet	4034	4776	5517	6259	7000	7742	8483	742
	HEV_BtL	4034	5676	7317	8959	10600	12242	13883	1642
	HEV_Gas	4034	11326	18617	25909	33200	40492	47783	7292
	PHEV_WE and bioet	5420	5715	6010	6305	6600	6895	7190	295
	PHEV_WE and BtL	5420	6065	6710	7355	8000	8645	9290	645
	PHEV_Gas	5420	8065	10710	13355	16000	18645	21290	2645
	FCV_PtH	6452	6739	7026	7313	7600	7887	8174	287
	FCV_SteamReform	6452	12189	17926	23663	29400	35137	40874	5737
	BEV_WE	8028	8121	8214	8307	8400	8493	8586	93
	BEV_EUMix	8028	12071	16114	20157	24200	28243	32286	4043
	ICEV_SNG	4324	7493	10662	13831	17000	20169	23338	3169
	ICEV_CNG	4324	10543	16762	22981	29200	35419	41638	6219
	ICEV_Bioet	4324	5893	7462	9031	10600	12169	13738	1569
	ICEV_BtL	4324	7743	11162	14581	18000	21419	24838	3419
ICEV_Gas	4324	14493	24662	34831	45000	55169	65338	10169	
Compact - Rosenfeld et al. [38]	HEV_Bioet	3744	4508	5272	6036	6800	7564	8328	764
	HEV_BtL	3744	5408	7072	8736	10400	12064	13728	1664
	HEV_Gas	3744	8608	13472	18336	23200	28064	32928	4864
	PHEV_WE and bioet	5162	5472	5781	6091	6400	6710	7019	310
	PHEV_WE and BtL	5162	5822	6481	7141	7800	8460	9119	660
	PHEV_Gas	5162	6922	8681	10441	12200	13960	15719	1760
	FCV_PtH	6452	6689	6926	7163	7400	7637	7874	237
	FCV_SteamReform	6452	10489	14526	18563	22600	26637	30674	4037
	BEV_WE	5318	5389	5459	5530	5600	5671	5741	71
	BEV_EUMix	5318	8089	10859	13630	16400	19171	21941	2771
	ICEV_SNG	4324	7193	10062	12931	15800	18669	21538	2869
	ICEV_CNG	4324	9993	15662	21331	27000	32669	38338	5669
	ICEV_Bioet	4324	5893	7462	9031	10600	12169	13738	1569
	ICEV_BtL	4324	7743	11162	14581	18000	21419	24838	3419
ICEV_Gas	4324	12389	20453	28518	36582	44647	52711	8065	
Xiong et al. [39]	BEV_LFP	10944	17528	24113	30697	37282	43867	50451	6585
	BEV_NMC	12747	19192	25637	32083	38528	44974	51419	6445
	PHEV_LFP	7887	18090	28292	38495	48698	58901	69104	10203

Artigos	Alternativas	0	50 000	100 000	150 000	200 000	250 000	300 000	Declive
	PHEV_NMC	8895	18849	28804	38759	48714	58669	68624	9955
Yang et al. [40]	ICEV_Gas	6554	17028	27503	37977	48451	58925	69399	10474
	ICEV_Diesel	6554	16189	25824	35459	45093	54728	64363	9635
	BEV	20704	33786	46868	59949	73031	86113	99195	13082
	FCV_NGR	9811	17603	25395	33188	40980	48772	56565	7792
	FCV_COG	9811	12169	14527	16885	19243	21601	23959	2358
	FCV_EAH	9811	11048	12285	13523	14760	15997	16294	1049
	FCV_ENH	9811	11048	12285	13523	14760	15997	17234	1237
	FCV_ESG	9811	27938	46065	64192	82319	100446	118573	18127
	FCV_TWS	9811	11024	12237	13450	14663	15876	17089	1213
Marmiroli et al. [41]	ICEV_Diesel	25406	48506	71606	94707	117807	140907	164007	23100
	ICEV_CNG	26894	51044	75194	99345	123495	147645	171795	24150
	BEV	34394	45947	57499	69052	80604	92157	103709	11553
Onat et al. [42]	ICEV_Gas	8851	20526	32200	43875	55549	67224	78898	11675
	PHEV18_Gas	11239	18434	25628	32823	40017	47212	54406	7195
	PHEV62_Gas	13162	21854	30547	39239	47932	56624	65317	8693
	BEV	13661	20576	27491	34406	41321	48236	55151	6915
	HEV	11004	18474	25943	33413	40882	48352	55821	7470
Mayyas et al. [43]	ICEV_Gas_StBiW	4559	18503	32447	46390	60334	74278	88221	13944
	BEV_StBiW	8663	16982	25302	33622	41942	50261	58581	8320
	HEV_Gas_StBiW	4802	13790	22778	31766	40753	49741	58729	8987
	PHEV_Gas_StBiW	5502	14658	23814	32970	42126	51283	60439	9156
	ICEV_Gas_AlBiW	3526	16369	29211	42054	54897	67739	80582	12843
	BEV_AlBiW	7933	15648	23364	31079	38794	46509	54225	7715
	HEV_Gas_AlBiW	3860	12162	20463	28764	37066	45367	53668	8301
	PHEV_Gas_AlBiW	4924	13048	21171	29295	37419	45542	53666	8124
	ICEV_Gas_MgBiW	5015	17421	29827	42234	54640	67046	79452	12406
	BEV_MgBiW	8997	16528	24060	31591	39122	46653	54185	7531
	HEV_Gas_MgBiW	5137	13178	21218	29259	37300	45341	53382	8041
PHEV_Gas_MgBiW	6079	14182	22284	30387	38489	46592	54694	8103	

A análise do indicador PAG revela resultados semelhantes comparativamente ao CPE na alteração das posições ao longo do CV do veículo, com o aumento da distância percorrida. Também nesta avaliação os ICEVs começam por ser apresentados como a opção a selecionar aos 0 km, desaparecendo este bom desempenho com o aumento da distância percorrida. Os BEVs, da mesma forma, continuam a ser associados a elevados impactes aos 0 km, obtendo, no entanto, baixos declives, com exceção do artigo efetuado por Yang et al. [40] e Lombardi et al. [36]. De notar que existem diferenças nos resultados obtidos dependendo da fonte energética, dado que quando o BEV é comparado com diferentes tecnologias alimentadas a fontes renováveis e mais limpas, os seus benefícios são compensados (Rosenfeld et al. [38], Yang et al. [40]), assim como quando existem diferentes tecnologias BEV comparadas entre si, aquelas que recorrem a fontes fósseis ou ao *mix* energético do país em questão, têm evidentemente, impactes associados mais prejudiciais (Bartolozzi et al. [37], Rosenfeld et al. [38]). Relativamente aos HEV e PHEV, o seu comportamento no indicador PAG é semelhante ao indicador anterior. Também aqui estas tecnologias, aos 300 000 km, vão refletir uma relação dos

impactes aos 0 km e do declive obtido, sendo que a sua posição vai depender da magnitude de cada um. Relativamente ao indicador PAG são registadas diferenças baixas para os 0 km comparativamente ao CPE, contudo o comportamento altera-se para a fase de utilização e D&A. Os veículos movidos a H₂, tendo em conta as emissões de CO₂, alcançam declives mais reduzidos, permitindo-os atingir posições benéficas aos 300 000 km. As únicas exceções nas alternativas dos artigos que incluem diferentes modos de obtenção de H₂, onde as opções de produção mais poluentes mostram, igualmente, maus desempenhos aos 300 000 km, com elevados declives.

Alinhado com o CPE, aos 0 km, o BEV também é identificado como a pior alternativa em termos de emissões de CO₂ referentes às etapas de produção e FdV. Apenas em Bartolozzi et al. [37] o BEV acarreta impactes inferiores nesta fase comparativamente ao FCV. O posicionamento dos veículos elétricos mantém-se relativamente aos convencionais, sendo que os últimos são associados a mais baixas emissões de CO₂ ao km 0, sendo que apenas Rosenfeld et al. [38] colocam o HEV como menos poluente. Quanto mais eletrificados os veículos, maior o PAG associado, considerando 0 km percorridos, o que é comprovado por Lombardi et al. [36], Rosenfeld et al. [38], Xiong et al. [39], Yang et al. [40], Mayyas et al. [43], onde BEV apresenta mais emissões comparativamente a PHEV, que, por sua vez, apresenta mais emissões do que HEV. Isto é explicado pelo facto dos veículos que utilizam 100% de eletricidade (BEV) necessitarem de baterias com maiores dimensões e elevadas potências e capacidades, comparativamente às tecnologias que complementam a utilização da eletricidade com combustíveis (HEV e PHEV, por exemplo). Mais uma vez em Onat et al. [42], o PHEV62 (maior FU) está associado a um PAG mais elevado, assim como se apresenta mais sensível à fase de utilização, devido ao seu sistema a gasolina menos eficiente relativamente ao PHEV18.

No que diz respeito aos declives obtidos, os BEVs apresentam os menores, sendo por isso menos influenciados pela fase de uso e D&A, quando é o caso. Apenas em Lombardi et al. [36] e Yang et al. [40] isto não se verifica. Em Lombardi et al. [36] é estudado o *mix* da rede elétrica italiana onde é esclarecido pelos autores que a baixa eficiência durante a produção deste *mix* elétrico justifica não só o elevado declive do BEV comparativamente ao PHEV e PHFCV no CPE, mas também no PAG. Relativamente a Yang et al. [40], onde o contexto em avaliação se refere à China a qual possui uma elevada percentagem de fontes fósseis para produção de energia elétrica, verifica-se também que as alternativas que mais recorrem a este *mix*, FCV com produção de H₂ através da rede elétrica e BEV, têm elevados declives na categoria de PAG. Bartolozzi et al. [37], Rosenfeld et al. [38] e Yang et al. [40] comprovam também que as fontes renováveis são úteis na redução de CO₂ libertado durante o CV apresentando estas maior independência na fase de utilização. Os ICEVs apresentam maiores declives principalmente quando utilizada gasolina comparativamente ao diesel, Yang et al. [40], e quando utilizado diesel comparativamente a gás natural, Marmiroli et al. [41]. Também neste caso quanto mais eletrificadas as alternativas, menor o PAG associado, comprovado por: Bartolozzi et al. [37], Rosenfeld et al. [38], Xiong et al. [39], Onat et al. [42] e Mayyas et al. [43]. As características das baterias avaliadas por Xiong et al. [39]

apresentam as LFP menos intensivas na produção e FdV, mas com maior influência pela fase de utilização e D&A, embora tal como no CPE, as diferenças sejam mínimas.

Comparativamente ao CPE, na análise do PAG, é registada uma maior divergência entre os resultados obtidos para o declive e a distância de 300 000 km, maior distância percorrida considerada, sendo que as alternativas com menor sensibilidade para o aumento da distância percorrida nem sempre correspondem às alternativas com menos emissões de CO₂ associadas aos 300 000 km. Nesta situação regista-se um maior *mix* entre os resultados das fases de produção e FdV (quando considerada) e fase de utilização e D&A (quando considerada). Isto verifica-se em Lombardi et al. [36], Rosenfeld et al. [38], Xiong et al. [39], Onat et al. [42] e Mayyas et al. [43], onde a ordem dos impactes aos 300 000 km não corresponde às do declive, mantendo-se consistente, com uma relação entre as etapas estudadas.

4.2 Materiais leves

Nesta secção é analisada a influência da utilização de materiais alternativos, com o objetivo de reduzir o peso do veículo (ou dos seus componentes) e minimizar os impactes de CV dos veículos, com base em dados de casos de estudo sistematizados a partir de dez artigos para a categoria CPE, e de sete artigos para a categoria PAG.

Os resultados da análise ciclo de vida dos diferentes materiais leves foram sistematizados em gráficos, de acordo com o peso do componente, para a distância selecionada de 200 000 km, para as categorias CPE e PAG, conforme identificado na Tabela 10.

No Anexo B estão as tabelas que detalham as características de cada cenário em análise, com os resultados de CV para o CPE e PAG, assim como os seus impactes convertidos para diferentes distâncias percorridas (importante para a análise de sensibilidade). Foram ainda calculados os impactes por kg de material (GJ/kg e kgCO₂-eq/kg), que se encontram presentes também no anexo B.

Tabela 10. Categorização dos artigos para Materiais Leves em função do seu peso

Peso do componente	Artigos	Categoria de impacte	Figura			
100 kg – 436 kg	Tempelman (2011) [44]	CPE	Figura 6			
	Sato and Nakata (2021) [45]					
	Mayyas et al. (2012) [46]					
6 kg – 38 kg	Mayyas et al. (2012) [46]	PAG	Figura 9			
	Ghosh et al. (2021) [47]	CPE	Figura 7			
	He et al. (2020) [48]					
	Delogu et al. (2017) [49]					
	Sun et al. (2017) [50]					
	Poulikidou et al. 15) [51]					
	Jhaveri et al. (2018) [52]					
0,3 kg – 0,8 kg	He et al. (2021) [53]	PAG	Figura 10			
		CPE	Figura 8			
				PAG	Figura 11	
						CPE

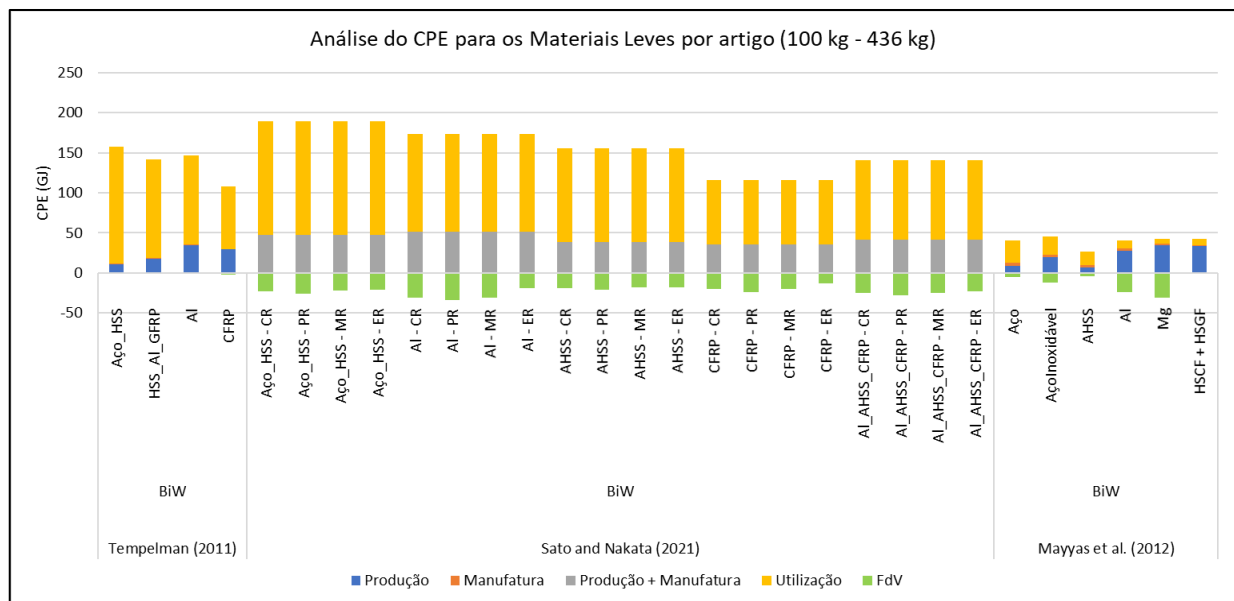


Figura 6. CPE dos artigos para a estratégia de Materiais Leves (100 kg - 436 kg)

O componente BiW é analisado por Tempelman [44] onde é estudada quatro composições distintas: aço (55%) e HSS (45%); multi-material (HSS: 70%, Al: 20%, e GFRP: 10%); Al; CFRP. Neste estudo a alternativa aço e HSS, assim como o Al são sujeitos a reciclagem no seu FdV, enquanto o multi-material é submetido a recuperação

energética e os CFRP a deposição em aterro. São quantificados os impactos para as etapas de produção, manufatura, utilização e FdV. Os resultados obtidos por Tempelman [44] levam a concluir que os compósitos (CFRP) são a opção mais vantajosa com menor energia consumida associada. Comparativamente, as alternativa multi-material e Al, têm maior energia primaria de CV (mais 32,9% e 37,6%, respetivamente do que a CFRP). Por último, apresenta-se o HSS, material mais pesado, com 48,6% de CPE mais elevado relativamente à opção mais benéfica (CFRP).

O artigo de Sato and Nakata [45] não só estuda diferentes materiais para o BiW, mas também os avalia relativamente a diversas opções de FdV. Os materiais constituintes do BiW avaliados incluem, mistura de aço (75%) e HSS (25%), Al, AHSS, CFRP e multi-material (Al: 97,1%, AHSS: 1,4% e CFRP: 1,4%). Cada uma destas hipóteses é analisada segundo diferentes opções de FdV, sendo elas: reciclagem convencional com 86,9% de reciclagem e 13,1% de reutilização de partes, reutilização de partes, reciclagem e recuperação energética. O CV avaliado neste estudo tem os seus impactos divididos por produção e manufatura, utilização e FdV. Segundo este estudo, a solução com menor energia de CV é constituída por CFRP, seguida do multi-material que acarreta mais 19,7% de impactos no CPE, em média tendo em conta os diferentes cenários de FdV considerados. A terceira e quarta posição pertencem, sequencialmente, ao AHSS e Al cada um com mais 41,7% e 50,5% de impactos associados, respetivamente. Em último lugar com os impactos mais prejudiciais encontra-se a mistura de aço e AHSS com impactos mais elevados em 71,9% relativamente aos CFRP. Relativamente aos cenários de FdV estudados, o modo de reciclagem convencional indica, por exemplo, a opção multi-material como a mais vantajosa, sendo que a pior é a CFRP com CPE superior em 17,8% comparativamente à mais vantajosa. Se se assumir a reutilização dos componentes, o menor CPE continua a ser para o BiW multi-material, realçando também os compósitos com apenas mais 1,9% de impactos no CPE, ficando a opção AHSS em último lugar (+115,4%). A reciclagem mecânica, contrariamente às duas opções anteriores, regista os CFRP como melhor opção, onde o aço e o Al são considerados as piores, com impactos no CPE superiores em 49,3% e 49,9%, respetivamente. A última alternativa de FdV, recuperação energética, indica o aço como a opção com menor consumo energético e o BiW multi-material como a opção mais intensiva (mais 14,4% de impactos relativamente à melhor opção). Consensualmente para os materiais em avaliação os cenários de FdV apresentados por ordem de preferência são: reutilização, reciclagem convencional, reciclagem mecânica e recuperação energética.

O estudo realizado por Mayyas et al. [46], onde o componente em estudo é também um BiW, analisa o aço, aço inoxidável, AHSS, Al, Mg e compósitos (HSCF + HSGF). Neste estudo todas as hipóteses em análise são submetidas a reciclagem na fase de FdV. Os impactos encontram-se quantificados para as fases de produção, manufatura, utilização e FdV. Os impactos obtidos indicam que o BiW com menor CPE é constituído por Mg. Em segundo lugar surge o Al, com impactos superiores em 44% e, em terceiro lugar, o AHSS com mais 89,5%. Por fim, encontram-se o aço inoxidável, aço e compósitos, com impactos no CPE superiores em 187,7%, 203,6% e 264,7%, respetivamente.

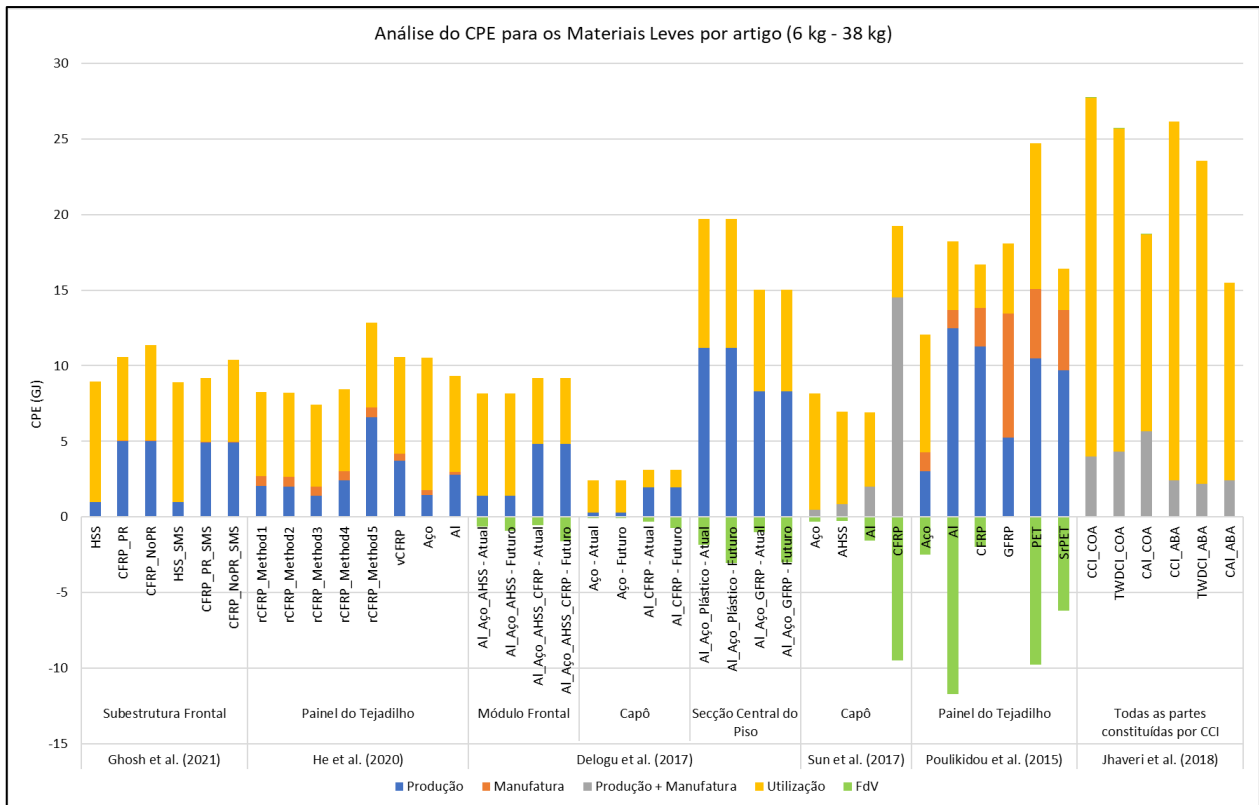


Figura 7. CPE dos artigos para a estratégia de Materiais Leves (6 kg - 38 kg)

O primeiro artigo para a gama de pesos entre 6 e 38 kg, Ghosh et al. [47], analisa uma subestrutura frontal do veículo que compara HSS com CFRP. Neste artigo é estudada a influência das reduções secundárias de massa, comparando sem e com 50% de reduções, além de que também é estudada a adaptação do sistema de propulsão em função das alternativas materiais em avaliação. A abordagem LCA selecionada neste estudo inclui um *'cut-off approach'*, adicionalmente as etapas com impactes quantificados no CV da subestrutura frontal são a produção, manufatura e utilização. Os resultados obtidos demonstram que a melhor opção é HSS com reduções secundárias de massa, sendo que o HSS sem estas reduções tem um impacte semelhante com apenas mais 0,5% de CPE. Os quatro restantes lugares pertencem às opções que consideram o CFRP, dado que apesar de atingir reduções significativas na fase de uso, tem impactes na produção cerca de cinco vezes superiores. O CFRP com reduções de massa e redimensionamento da tecnologia de propulsão encontra-se em terceiro lugar com mais 2,9% de consumo energético. Mais afastados, com impactes mais elevados relativamente ao CPE está o CFRP sem redimensionamento e com reduções secundárias (+16,5%), CFRP com redimensionamento do sistema de propulsão e sem reduções de massa (+18,5%) e, por fim, o CFRP sem considerar nenhuma das adaptações (+27,7%).

He et al. [48], foca-se no painel do tejadilho de um veículo, analisando diferentes modos de produção de rCFRP que são, posteriormente, comparados com aço, vCFRP e Al. De forma semelhante a Ghosh et al. [47], este artigo considera um *'cut-off approach'*, incluindo impactes quantificados para a produção, manufatura e utilização. Os impactes mostram que a rCFRP_Method3 se trata da melhor opção no que diz respeito ao

consumo energético, seguido pelo rCFRP_Method2, rCFRP_Method1 e rCFRP_Method4 com impactes no CPE superiores em, 10,7%, 11,5% e 13,7%, respetivamente. O Al regista uma diferença elevada no impacte no CPE de 25,7%, sendo que é seguido pelo aço (+41,9%) e vCFRP (+42,2%). Por fim, está o rCFRP_Method5 com mais 72,8% de consumo energético no CV. Estes resultados mostram que o método de reciclagem de CFRP utilizado para obter o rCFRP influencia de modo significativo o *ranking* das alternativas relativamente à energia de CV.

Vários componentes instalados num veículo elétrico são estudados por Delogu et al. [49], dos quais três foram incluídos no estudo: módulo frontal, capô e secção central do piso do veículo. Os materiais em análise incluem para cada componente uma opção convencional e outra leve, sendo que para cada uma delas são considerados dois cenários de FdV: atual (tecnologias de trituração e pós-trituração para a reciclagem de materiais ou para as alternativas inovadoras recuperação energética dos resíduos de trituração) e futuro (tecnologias avançadas de pós-trituração e reciclagem). Verifica-se que, no geral, a opção de FdV futura supera a atual, sendo que apenas no caso do capô ambas apresentam o mesmo impacte de CV total para o aço. Considerando o módulo frontal, a melhor opção inclui o material convencional, visto que o aço acarreta menores impactes, pois a opção leve tem um CPE superior de 4,8% para o FdV futuro e 19,2% para o FdV atual. O capô, da mesma forma que o módulo frontal, apresenta o material convencional, aço, como menos impactante, sendo que a opção multi-material apresenta impactes superiores em 3,6% e 22,2% para o FdV futuro e atual, respetivamente. Por último a secção central do piso, contrariamente às duas opções anteriores, indica o material leve como mais vantajoso na redução do CPE, sendo que a alternativa mais pesada, considerando FdV futuro tem mais 38,2% de impactes e no caso de FdV atual, mais 48,3%. No caso do módulo frontal, tendo em conta a melhor opção, o FdV atual inclui mais 3,5% de impactes no CPE e, para a secção central do piso do veículo, o impacte é de 16,2%.

Sun et al. [50], que também estudou os impactes de substituição de materiais no capô, inclui na análise os seguintes materiais: aço, AHSS, Al e CFRP. Todos os materiais, à exceção dos CFRP, foram sujeitos a reciclagem, sendo que este foi sujeito a pirólise. Neste artigo o CV foi estudado quantificando os impactes para a produção e manufatura, utilização e FdV. Os resultados obtidos registam o Al como o material mais indicado para constituição deste componente, sendo seguido pelo AHSS e, em terceiro lugar pelo aço, ambos com impactes mais elevados em, 24,9% e 45,8%, respetivamente. Também neste caso o material leve, CFRP, ficou registado como a opção a evitar com impactes no CPE superiores em 80,9%.

Uma vez mais é estudado o painel do tejadilho, desta vez por Pouligidou et al. [51], considerando a sua constituição por aço, Al, C/VE, G/VE, PET e SrPET. Os compósitos, C/VE e G/VE, foram submetidos a incineração, enquanto todos os restantes materiais foram reciclados. Neste artigo foram estudadas as etapas de produção, manufatura, utilização e FdV. Relativamente aos impactes, os compósitos estão associados a maiores consumos energéticos, sendo que a alternativa identificada capaz de maiores reduções

foi o Al. Como segunda opção surge o aço, com mais 46,9% de impactes relativamente ao Al. Seguidamente e, por ordem, estão SrPET, CFRP, PET e GFRP com o seguinte aumento de impactes comparativamente à melhor opção: 56,8%, 126,2%, 129,7% e 178,1%, respetivamente.

Jhaveri et al. [52], contrariamente aos restantes, não estudaram um componente, mas sim todo o veículo, analisando a substituição de todas as partes do veículo constituídas por ferro fundido convencional (CCI), onde a substituição considerou Al fundido (CaI) e ferro dúctil fundido com parede fina (TWDCI). Esta substituição foi analisada segundo dois cenários de FdV: *'cut-off approach'* e *'avoided burden approach'*. As etapas do CV para as quais os impactes se encontram quantificados incluem produção e manufatura, utilização e FdV. Os resultados obtidos indicam que tanto o TWDCI como o CAI levam a reduções no CPE comparativamente ao ferro fundido convencional. O CAI sujeito à *'avoided burden approach'* é indicado como a opção mais vantajosa, seguido do CAI sujeito à *'cut-off approach'*, com impactes no CPE superiores em: 20,9% relativamente à melhor alternativa. Surge então o TWDCI, primeiramente para o cenário *'avoided burden approach'* (+52,1%) e, posteriormente, para a *'cut-off approach'* (+66%). As piores alternativas incluem o CCI com *'avoided burden approach'*, seguido da *'cut-off approach'*, com impactes superiores em: 68,9% e 79,5%, respetivamente.

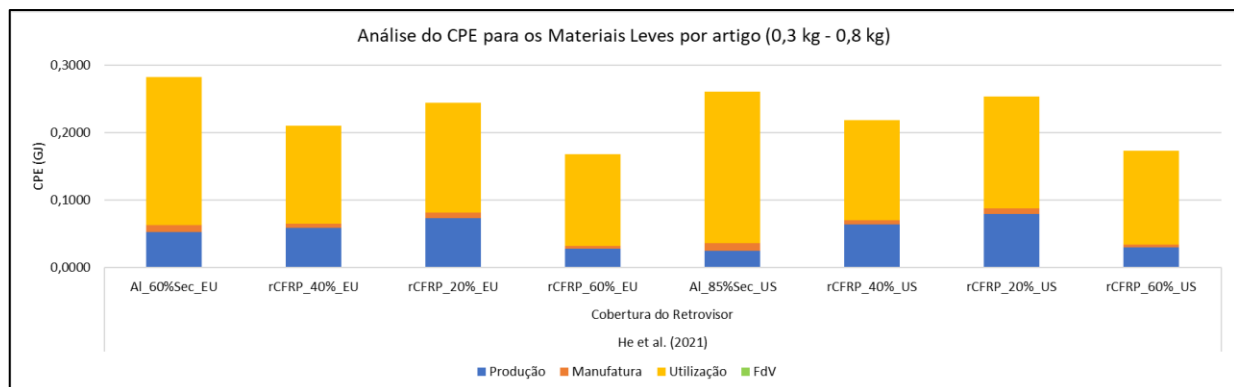


Figura 8. CPE dos artigos para a estratégia de Materiais Leves (0,3 kg - 0,8 kg)

Por último, para o CPE, He et al. [53] estudou a substituição de materiais num suporte de retrovisor, em dois contextos distintos: EUA e UE. Consideraram-se diferentes tipos de rCFRP, sendo que diferem na quantidade de fibras de carbono recicladas incorporadas no processo produtivo (20%, 40% e 60%). Estas fibras de carbono foram também comparadas com Al, que difere a sua percentagem de material secundário em função do contexto estudado, e incluíram a avaliação das seguintes etapas do CV: produção, manufatura e utilização, sendo que foi considerado um *'cut-off approach'*. Esta análise comprova que os materiais leves, rCFRP, atingem reduções no CPE superiores na UE, enquanto o Al é menos intensivo nos EUA. A produção de Al primário na UE está associada a maiores consumos relativamente aos EUA devido ao processo de fundição. Este processo recorre a eletricidade fornecida com uma parcela elevada de energia hidroelétrica, sendo esta superior para os EUA (75,1%) comparativamente à UE (64,8%). Para todos os outros processos para além da produção de Al primário, incluindo

os compósitos, as intensidades são mais evidentes nos EUA, tendo em conta que as fontes energéticas para os restantes processos são provenientes do *mix* geral de eletricidade ou energia térmica de gás natural ou uma combinação dos dois, onde ambas as fontes são menos intensivas na UE. Além disso, o consumo energético mostra ser influenciado pela percentagem de rCFRP constituintes do componente. Os resultados obtidos registam o rCFRP (60%) na UE como opção que menos energia consome, seguido por rCFRP (60%) nos EUA (+3,3%), rCFRP (40%) na UE (+25,5%) e rCFRP (40%) nos EUA (+30%). As três opções seguintes acarretam impactes superiores no CPE em 45,4%, 51% e 55,1% para o rCFRP (20%) na UE, rCFRP (20%) e Al nos EUA, respetivamente. A pior opção pertence ao Al no contexto da UE com um CPE, relativamente à melhor opção, superior em: 67,9%.

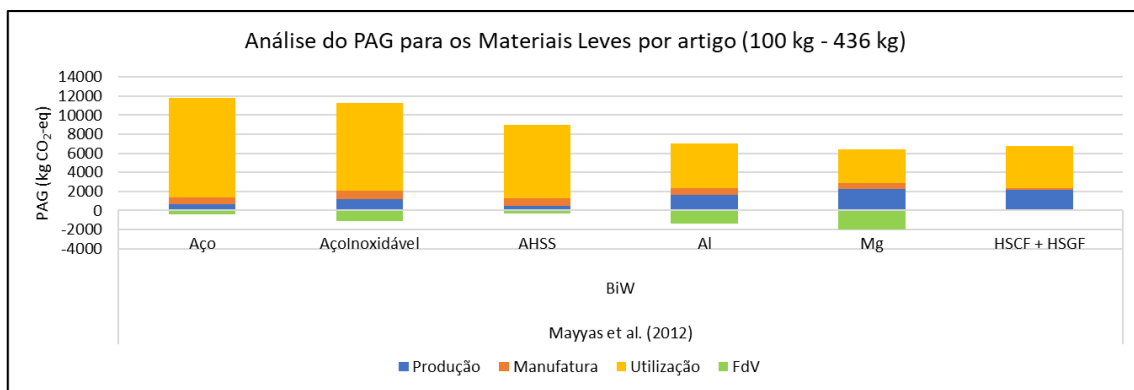


Figura 9. PAG dos artigos para a estratégia de Materiais Leves (100 kg - 436 kg)

Relativamente ao PAG, Mayyas et al. [46], identificou o Mg como o material associado a menores emissões de CO₂, seguido do Al com mais 28,1% de emissões. Em terceiro lugar surgem os compósitos com mais 52,6% de PAG associado relativamente ao Mg. As opções mais pesadas, AHSS, aço inoxidável e aço normal, ocupam os três últimos lugares, ordenadamente, com um aumento no PAG comparativamente à melhor alternativa de: 97,1%, 131,2% e 158,3%.

Em Ghosh et al. [47] foi estudada a subestrutura frontal de um veículo chegando a conclusões diferentes para o PAG relativamente ao CPE. Neste caso, a melhor opção é o CFRP com redimensionamento do sistema de propulsão e reduções secundárias de massa, sendo que só depois surgem as alternativas HSS com reduções (+5,9%) e HSS sem qualquer adaptação (+6,3%) que apresentam os melhores resultados no CPE. As restantes posições são ocupadas pelos CFRPs, sendo a primeira, CFRP com reduções secundárias e sem redimensionamento da tecnologia de propulsão, seguida de CFRP incluindo o redimensionamento e, por fim, CFRP sem adaptações, com PAG mais elevado comparativamente à melhor opção em: 14,9%, 15,2% e 24,2%, respetivamente.

Os diferentes componentes analisados por Delogu et al. [49], instalados num veículo elétrico, são: módulo frontal, capô e secção central do piso do veículo. Mais uma vez verifica-se que o FdV futuro tem maior potencial na redução de impactes. No que diz respeito ao módulo frontal, a opção menos poluente é o material alternativo com cenário de FdV futuro, sendo que o atual acrescenta 22,8% ao PAG. A alternativa pesada

apresenta mais 11,2% de emissões para o cenário futuro de FdV e 15,2% para o atual. O capô, tal como no CPE, identifica a opção convencional como a mais vantajosa, dado que a alternativa multi-material acarreta mais 33,6% de emissões de CO₂ no caso de FdV futuro e mais 27,8% no atual. No caso da secção central do veículo, o material alternativo volta a registar menores impactes, onde a aplicação do cenário atual de FdV acrescenta 21,9% de PAG, enquanto o material convencional acrescenta 59,5% para o cenário de FdV futuro e 70,5% para o cenário de FdV atual. De notar a diferença nos resultados obtidos para o caso do módulo frontal, onde no CPE a alternativa convencional é a mais vantajosa, contrariamente ao PAG.

Em Sun et al. [50], os resultados obtidos indicam o Mg como a melhor opção para constituinte do capô em estudo. Em segundo e terceiro lugar, as opções pesadas, aço e AHSS, que acarretam mais 9,6% e 34,5% de emissões de CO₂ comparativamente ao Mg. Por fim, e alinhado ao CPE, estão os CFRP, que possuem mais 41,1% de emissões.

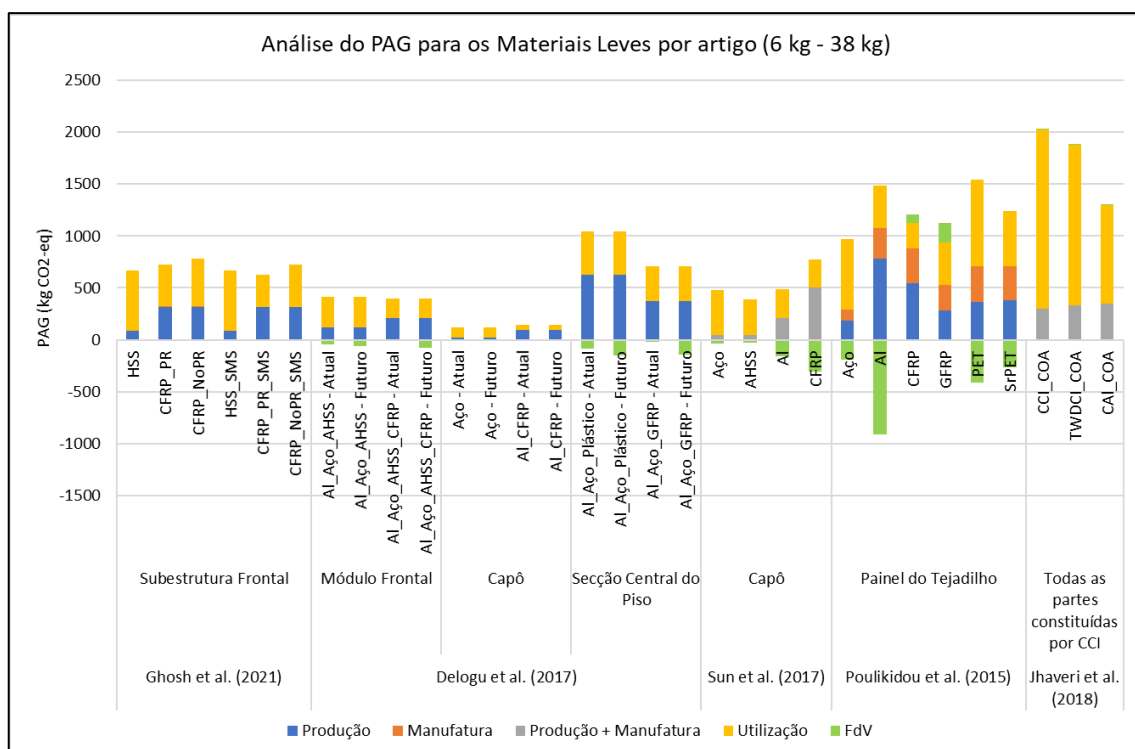


Figura 10. PAG dos artigos para a estratégia de Materiais Leves (6 kg - 38 kg)

Um painel do tejadilho é avaliado por Poulidikou et al. [51], onde os resultados obtidos para o PAG estão alinhados com os do CPE. Também neste caso, a opção com menores impactes associados é o Al e os compósitos estão posicionados como os mais poluentes. O aço, encontra-se em segundo lugar, e tem emissões de CO₂ superiores em 35,9%, relativamente ao Al. Os restantes materiais avaliados apresentam a seguinte ordem, do menos poluente para o mais poluente: SrPET (+69,3%), GFRP (+96,2%), PET (+97,9%) e CFRP (+110,8%) por comparação ao Al.

Jhaveri et al. [52] analisou a substituição de todos os componentes do veículo compostos por CCI, por CAI e TWDCI, sendo que na categoria PAG apenas a *'cut-off approach'* foi considerada. Os resultados obtidos, coincidentes ao CPE, indicam o CAI como a melhor alternativa, seguida pelo TWDCI e, por fim, CCI, onde os impactes no PAG acrescentados são: 45,2% e 56%, respetivamente.

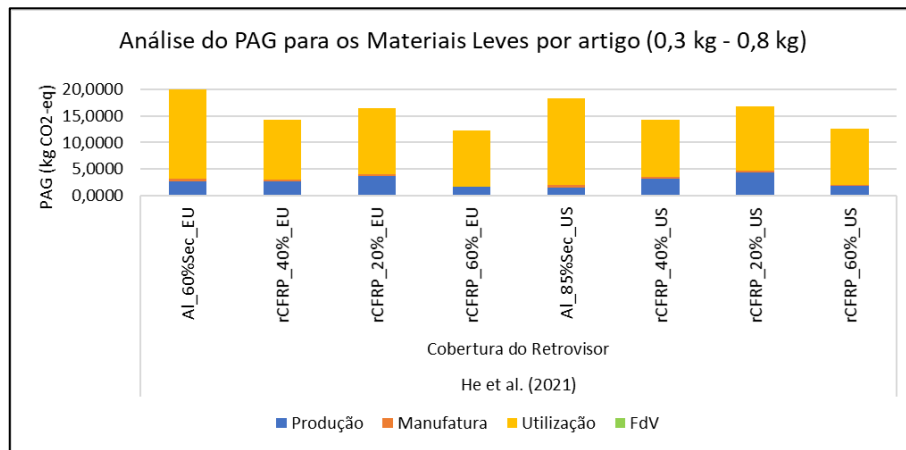


Figura 11. PAG dos artigos para a estratégia de Materiais Leves (0,3 kg - 0,8 kg)

He et al. [53] avaliou a cobertura de um retrovisor em diferentes contextos: EUA e UE. Contrariamente ao CPE, a intensidade da produção de Al primário é mais intensivo nos EUA e não na UE. Isto porque nos EUA, para o processo de fundição, apesar de haver menos geração de energia a partir de carvão (-11,1%), há uma maior parcela, em 10,6%, de energia produzida a partir de gás natural e mais 9,5% de energia nuclear. No entanto, todos os restantes processos, mostram uma menor intensidade nas emissões na UE comparativamente aos EUA, tal como no CPE. Os resultados, no geral, mostram-se alinhados aos do CPE, sendo que a opção mais promissora é rCFRP (60%) na UE. Em segundo e terceiro lugar encontram-se: rCFRP (60%) nos EUA e rCFRP (40%) no contexto da UE, com potenciais mais elevados, relativamente à melhor opção, de 2,8% e 16%, respetivamente. De seguida, encontra-se o rCFRP (40%) nos EUA com PAG superior em 16,3% e os rCFRP (20%) na UE com mais 34,5% e nos EUA com mais 36,2%. Por fim, as últimas duas opções incluem o Al, sendo a melhor opção nos EUA e a pior na UE, cada um com PAG associado mais elevado em 48,6% e 63,3%, respetivamente, relativamente aos rCFRP (60%) na UE.

A análise deste conjunto de artigos, tendo em conta os materiais leves, em ambos os indicadores, CPE e PAG, permitiu a identificação de pontos determinantes no CV de um veículo, entre os quais:

1. A maioria dos materiais leves apresenta potencial na redução do CPE e PAG, no entanto existem casos onde estes são superados pelas opções convencionais em ambas as categorias (fator inerente às premissas assumidas em cada estudo), sendo que será um ponto a avaliar na análise de sensibilidade do próximo subcapítulo.

2. As reduções secundárias de massa, assim como o redimensionamento do sistema de propulsão são condições capazes de reduções nas emissões de CO₂ e consumo energético. Verificou-se que, aquando da inclusão destes dois parâmetros nos estudos, o desempenho dos materiais leves foi de uma forma geral melhor. A comparação entre as duas neste estudo permitiu identificar as reduções secundárias de massa mais promissoras, comparativamente ao redimensionamento do sistema de propulsão.
3. Um dos fatores capaz de provocar mudanças nas melhores alternativas, tendo em conta os materiais, em ambos os indicadores, é o cenário de FdV selecionado. A utilização de diferentes opções de FdV, nomeadamente, reciclagem mecânica, recuperação energética, reutilização, entre outros, influencia de tal forma, que altera o material mais adequado para cada situação. De notar que o único estudo neste capítulo que considerou um veículo elétrico, demonstrou que a seleção de materiais leves para constituição de certos componentes se mostrou aquém das expectativas relativamente à seleção de um cenário de FdV, com tecnologias de reciclagem e trituração mais avançadas. Tendo em conta os cenários de FdV, deve ser priorizada a reutilização de partes e evitada a recuperação energética.
4. A abordagem de FdV selecionada na ACV tem também o poder de alterar os resultados finais no CPE e PAG. A *'cut-off approach'*, naturalmente, não atinge resultados tão positivos como a *'avoided burden approach'*. No entanto se for assumido que o componente é produzido através de materiais secundários, a *'cut-off approach'* pode atingir resultados mais vantajosos.
5. Materiais inseridos em diferentes contextos têm associados diferentes impactes, para o CPE e PAG. No entanto, enquanto um material pode ser menos intensivo no contexto A (país/área/região) relativamente ao contexto B, outro material distinto pode atingir exatamente o resultado oposto, como se pode verificar para o Al e rCFRP considerando a UE e EUA. De notar que pode também haver diferenças entre os impactes na energia consumida e emissões de CO₂, tendo em conta os diferentes contextos. Conclui-se que, os valores de PAG e CPE estão balizados para contextos específicos e por isso não devem ser generalizados.
6. A quantidade de material secundário, isto é sucata, reciclados ou rejeitados internos, utilizado na produção de um novo componente vai causar alterações nos impactes de ambos os indicadores. Quanto maior for a quantidade de material reciclado utilizado na produção, menor a quantidade de material virgem requerida e, por isso, menores os impactes associados.
7. Durante o CV do automóvel há a necessidade de substituição de determinados componentes, não sendo este aspeto considerado pela maioria dos artigos em análise. Esta substituição vai acabar por acrescentar impactes ao CV do veículo cuja dimensão irá variar de acordo com o componente a substituir, sendo que, por exemplo, a substituição de uma bateria ou componente estrutural, ou seja, de maiores dimensões, acaba por conduzir a um aumento de impactes

consideráveis se for comparada com a substituição de um retrovisor, por exemplo. Este aspeto, como comprovado na análise deste capítulo, vai depender também do contexto produtivo do componente, dado que diferentes países apresentam diferentes impactes de fabrico.

4.2.1 Análise de Sensibilidade

Nesta análise de sensibilidade, que apresenta a avaliação da distância percorrida para o CV durante a etapa de utilização, apresentam-se os seus impactes totais do CV para o PAG e CPE, tal como no capítulo anterior. A Tabela 11 estuda a sensibilidade na estratégia de materiais leves para a categoria CPE, enquanto a Tabela 12 se refere à mesma estratégia considerando a categoria PAG. Ambas indicam também o declive para cada alternativa em análise, para auxílio na compreensão do peso da fase de utilização em cada uma delas.

Tabela 11. Análise de Sensibilidade do CPE em GJ com variação da distância percorrida para os artigos de Materiais Leves

Artigo	Alternativas	0	50000	100000	150000	200000	250000	300000	Declive
Tempelman [44]	Aço_HSS	11,78	48,31	84,85	121,38	157,91	194,45	230,98	36,5
	HSS_AI_GFRP	18,38	49,09	79,81	110,52	141,23	171,94	202,66	30,7
	AI	35,63	63,28	90,92	118,57	146,22	173,86	201,51	27,6
	CFRP	27,93	47,52	67,10	86,69	106,27	125,86	145,44	19,6
Sato and Nakata [45]	Aço_HSS - CR	24,43	59,90	95,36	130,83	166,30	201,76	237,23	35,5
	Aço_HSS - PR	20,71	56,18	91,65	127,11	162,58	198,05	233,51	35,5
	Aço_HSS - MR	25,33	60,79	96,26	131,73	167,19	202,66	238,13	35,5
	Aço_HSS - ER	26,12	61,58	97,05	132,52	167,98	203,45	238,91	35,5
	AI - CR	20,52	51,05	81,58	112,11	142,63	173,16	203,69	30,5
	AI - PR	18,17	48,70	79,23	109,76	140,28	170,81	201,34	30,5
	AI - MR	21,09	51,62	82,14	112,67	143,20	173,73	204,25	30,5
	AI - ER	33,20	63,73	94,26	124,78	155,31	185,84	216,37	30,5
	AHSS - CR	19,73	49,08	78,43	107,78	137,14	166,49	195,84	29,4
	AHSS - PR	17,18	46,53	75,89	105,24	134,59	163,94	193,29	29,4
	AHSS - MR	20,24	49,59	78,94	108,29	137,64	166,99	196,34	29,4
	AHSS - ER	20,76	50,11	79,46	108,82	138,17	167,52	196,87	29,4
	CFRP - CR	15,31	35,35	55,39	75,43	95,48	115,52	135,56	20,0
	CFRP - PR	12,00	32,04	52,08	72,12	92,16	112,20	132,25	20,0
	CFRP - MR	15,87	35,92	55,96	76,00	96,04	116,08	136,12	20,0
	CFRP - ER	22,43	42,47	62,51	82,55	102,60	122,64	142,68	20,0
AI_AHSS_CFRP - CR	16,65	41,41	66,17	90,93	115,69	140,45	165,21	24,8	
AI_AHSS_CFRP - PR	14,27	39,03	63,79	88,56	113,32	138,08	162,84	24,8	
AI_AHSS_CFRP - MR	17,06	41,82	66,58	91,34	116,10	140,86	165,62	24,8	
AI_AHSS_CFRP - ER	18,37	43,13	67,89	92,65	117,41	142,17	166,93	24,8	
Mayyas et al. [46]	Aço	7,37	14,44	21,52	28,59	35,66	42,73	49,81	7,1
	AçoInoxidável	11,19	16,84	22,49	28,14	33,80	39,45	45,10	5,7
	AHSS	5,66	9,81	13,96	18,11	22,26	26,41	30,56	4,2
	AI	6,51	9,11	11,71	14,31	16,92	19,52	22,12	2,6
	Mg	5,87	7,34	8,81	10,28	11,75	13,22	14,69	1,5
	HSCF + HSGF	34,98	36,94	38,91	40,87	42,84	44,80	46,77	2,0
Ghosh et al. [47]	HSS	1,00	2,99	4,98	6,97	8,96	10,95	12,94	1,99
	CFRP_PR	5,05	6,43	7,81	9,19	10,56	11,94	13,32	1,38
	CFRP_NoPR	5,05	6,63	8,22	9,80	11,39	12,97	14,56	1,58

Artigo	Alternativas	0	50000	100000	150000	200000	250000	300000	Declive
	HSS_SMS	1,00	2,98	4,96	6,94	8,91	10,89	12,87	1,98
	CFRP_PR_SMS	4,95	6,01	7,06	8,12	9,18	10,23	11,29	1,06
	CFRP_NoPR_SMS	4,95	6,31	7,67	9,03	10,39	11,75	13,11	1,36
He et al. [48]	rCFRP_Method1	2,69	4,09	5,49	6,88	8,28	9,68	11,08	1,40
	rCFRP_Method2	2,65	4,04	5,44	6,83	8,22	9,61	11,01	1,39
	rCFRP_Method3	1,99	3,35	4,71	6,07	7,43	8,79	10,15	1,36
	rCFRP_Method4	3,00	4,36	5,72	7,08	8,45	9,81	11,17	1,36
	rCFRP_Method5	7,24	8,64	10,04	11,44	12,84	14,24	15,64	1,40
	vCFRP	4,16	5,76	7,36	8,97	10,57	12,17	13,77	1,60
	Aço	1,76	3,95	6,15	8,34	10,54	12,73	14,93	2,19
	Al	2,96	4,55	6,15	7,74	9,34	10,93	12,53	1,59
Poulikidou et al. [51]	Aço	1,78	3,72	5,66	7,61	9,55	11,49	13,43	1,94
	Al	1,96	3,10	4,23	5,37	6,50	7,64	8,77	1,14
	CFRP	11,83	12,55	13,27	13,99	14,71	15,43	16,14	0,72
	GFRP	13,44	14,60	15,76	16,92	18,08	19,25	20,41	1,16
	PET	5,32	7,72	10,13	12,53	14,93	17,34	19,74	2,40
	SrPET	7,46	8,14	8,83	9,51	10,19	10,88	11,56	0,68
He et al. [53]	Al_60%Sec_EU	0,06	0,12	0,17	0,23	0,28	0,34	0,39	0,055
	rCFRP_40%_EU	0,06	0,10	0,14	0,17	0,21	0,25	0,28	0,037
	rCFRP_20%_EU	0,08	0,12	0,16	0,20	0,24	0,29	0,33	0,041
	rCFRP_60%_EU	0,03	0,07	0,10	0,13	0,17	0,20	0,24	0,034
	Al_85%Sec_US	0,04	0,09	0,15	0,20	0,26	0,32	0,37	0,056
	rCFRP_40%_US	0,07	0,11	0,14	0,18	0,22	0,26	0,29	0,037
	rCFRP_20%_US	0,09	0,13	0,17	0,21	0,25	0,30	0,34	0,041
	rCFRP_60%_US	0,03	0,07	0,10	0,14	0,17	0,21	0,24	0,035
Jhaveri et al. [52]	CCI_RCA	4,01	9,95	15,90	21,84	27,78	33,72	39,66	5,94
	TWDCI_RCA	4,34	9,68	15,02	20,36	25,70	31,04	36,38	5,34
	CAI_RCA	5,67	8,93	12,19	15,45	18,72	21,98	25,24	3,26
	CCI_ERA	2,43	8,36	14,28	20,21	26,14	32,06	37,99	5,93
	TWDCI_ERA	2,19	7,53	12,87	18,20	23,54	28,88	34,22	5,34
	CAI_ERA	2,43	5,69	8,95	12,22	15,48	18,74	22,00	3,26
Delogu et al. [49]	Al_Aço_AHSS - Atual	0,73	2,42	4,12	5,81	7,50	9,20	10,89	1,69
	Al_Aço_AHSS - Futuro	0,48	2,17	3,87	5,56	7,25	8,95	10,64	1,69
	Al_Aço_AHSS_CFRP - Atual	4,27	5,36	6,46	7,55	8,64	9,74	10,83	1,09
	Al_Aço_AHSS_CFRP - Futuro	3,23	4,32	5,42	6,51	7,60	8,70	9,79	1,09
	Aço - Atual	0,20	0,73	1,26	1,78	2,31	2,84	3,36	0,53
	Aço - Futuro	0,20	0,73	1,26	1,78	2,31	2,84	3,36	0,53
	Al_CFRP - Atual	1,65	1,94	2,23	2,53	2,82	3,11	3,41	0,29
	Al_CFRP - Futuro	1,22	1,51	1,80	2,10	2,39	2,68	2,98	0,29
	Al_Aço_Plástico - Atual	9,37	11,50	13,63	15,76	17,89	20,02	22,15	2,13
	Al_Aço_Plástico - Futuro	8,16	10,29	12,42	14,55	16,68	18,81	20,94	2,13
Al_Aço_GFRP - Atual	7,27	8,96	10,64	12,33	14,02	15,70	17,39	1,69	
Al_Aço_GFRP - Futuro	5,32	7,01	8,69	10,38	12,07	13,75	15,44	1,69	
Sun et al. [50]	Aço	0,18	2,09	4,01	5,92	7,84	9,75	11,67	1,91
	AHSS	0,61	2,14	3,66	5,19	6,72	8,24	9,77	1,53
	Al	0,45	1,68	2,91	4,15	5,38	6,61	7,84	1,23
	CFRP	5,01	6,19	7,37	8,55	9,73	10,91	12,09	1,18

O aço (material base/convencional), no geral, mostra-se como a opção menos intensiva ao km 0, isto é, quando excluída a fase de utilização, como comprovado em Tempelman [44], He et al. [48], Poulikidou et al. [51], He et al. [53], Delogu et al. [49] e Sun et al. [50].

O mesmo se constata para o material convencional HSS em Ghosh et al. [47] e para o ferro fundido convencional no cenário de *'cut-off approach'* em Jhaveri et al. [52]. Isto acontece porque as restantes opções apresentam impactes mais baixos quando excluída a fase de utilização do veículo (km 0). Contudo, ao analisar detalhadamente os restantes estudos (Sato and Nakata [45] e Mayyas et al. [46]), verifica-se que os motivos pelos quais os materiais convencionais não apresentam melhores resultados quando excluída da análise a fase de utilização do veículo, comparativamente aos materiais alternativos, são as compensações mais elevadas para a fase de FdV, não estando o baixo impacte relacionado com a etapa produtiva. Consensualmente, todos os materiais convencionais, apresentam um declive mais elevado, ou seja, têm associados consumos energéticos mais elevados na fase de utilização e mostram-se muito sensíveis com o aumento da distância percorrida, dado o seu elevado peso. Contudo, na etapa de produção, têm uma menor energia incorporada comparativamente aos materiais alternativos. De realçar também que os benefícios de FdV não são tão evidentes para o caso dos materiais convencionais, sendo que os leves obtêm maiores compensações.

O Al é um material já com histórico na substituição do aço no setor automóvel. Apesar da redução significativa do peso que este material potencia, e conseqüente redução do CPE, devida à fase de utilização, este material tem associado um consumo energético elevado na etapa de produção, reduzindo, desta forma, os benefícios da fase de utilização do veículo (mais dependente do fator peso). Em Poulidikou et al. [51], Jhaveri et al. [52] e Sun et al. [50], o Al é identificado como a melhor opção aos 300 000 km (baixo declive), sendo que este resultado se deve, sobretudo, à baixa sensibilidade na fase de utilização pelo seu reduzido peso. Em Tempelman [44] e Mayyas et al. [46] o Al também é registado como uma boa alternativa perdendo apenas para os compósitos no primeiro caso e para o Mg no segundo. Quando comparado com fibras de carbono recicladas / *recycled carbon fibers* (rCF) em He et al. [48] e He et al. [53] o seu desempenho vai depender do método produtivo selecionado para os rCFRP, podendo ou não ser superado por estes, assim como pela percentagem de material secundário introduzido no fabrico destes compósitos. Além disso em He et al. [53] é estudada a forma como a quantidade de material secundário (%) introduzido na produção de Al afeta o CPE onde, naturalmente, quanto maior a quantidade de Al reciclado utilizado no novo componente, menor a energia incorporada.

Os compósitos apresentam, geralmente, o menor declive, devendo-se isto ao facto de atingirem as maiores reduções no peso do componente. Todos os artigos que incluem compósitos na sua análise, colocam-nos com a menor sensibilidade à fase de utilização relativamente aos restantes materiais analisados, tendo apenas como exceção Mayyas et al. [46] onde este material perde para o Mg. Também é consensual o facto de os compósitos estarem associados a grandes consumos energéticos na fase de produção, sendo que em estudos como: Mayyas et al. [46], Poulidikou et al. [51] e Sun et al. [50] os benefícios atingidos pela fase de uso são inibidos pelos consumos da fase de produção. Em Ghosh et al. [47], aos 300 000 km, apenas o redimensionamento do sistema de propulsão em conjunto com as reduções secundárias de massa, permitem aos compósitos consumir menos energia no seu CV relativamente ao HSS. He et al. [48]

mostra a importância da produção dos compósitos com materiais secundários, em vez de virgens, na redução no CPE, além de comprovar que a seleção do método produtivo é de máxima importância, realçando os benefícios de um menor número de etapas produtivas, priorizando a pirólise e evitando a solvólise através de água supercrítica. Comprova-se em He et al. [53] que quanto maior a percentagem de material secundário na produção de compósitos, menor a energia incorporada na etapa de produção, assim como também é comprovada a influência pelo contexto, sendo que nos EUA a sua produção é mais intensiva relativamente à EU, tendo sido isto discutido anteriormente.

Em Delogu et al. [49] comprova-se que os materiais alternativos, apesar de associados a benefícios na fase de uso, devido ao seu baixo peso, nem sempre compensam no CPE dada a sua intensidade na fase de fabrico. Sendo que dos três componentes avaliados neste estudo, apenas a secção central do piso apresenta, indiscutivelmente, vantagens para o material alternativo relativamente ao convencional aos 300 000 km, sendo que nos restantes a composição mais benéfica para o componente depende bastante do cenário de FdV selecionado.

Tabela 12. Análise de Sensibilidade do PAG em kg CO₂-eq com variação da distância percorrida para os artigos de Materiais Leves

Artigo	Alternativas	0	50000	100000	150000	200000	250000	300000	Declive
Mayyas et al. [46]	Aço	963	3568	6173	8778	11383	13988	16593	2605
	AçoInoxidável	1013	3307	5601	7895	10189	12483	14777	2294
	AHSS	925	2865	4806	6746	8687	10627	12567	1940
	Al	916	2099	3281	4464	5646	6829	8012	1183
	Mg	928	1798	2667	3537	4407	5277	6146	870
	HSCF + HSGF	2313	3416	4520	5623	6726	7829	8933	1103
Ghosh et al. [47]	HSS	87	233	378	523	668	814	959	145
	CFRP_PR	323	423	524	624	724	824	925	100
	CFRP_NoPR	324	438	553	667	781	895	1010	114
	HSS_SMS	83	229	374	520	666	812	957	146
	CFRP_PR_SMS	318	396	473	551	629	706	784	78
	CFRP_NoPR_SMS	318	419	520	621	722	823	924	101
Poulikidou et al. [51]	Aço	100	270	440	610	780	950	1120	170
	Al	170	271	372	473	574	675	776	101
	CFRP	960	1023	1085	1148	1210	1273	1335	63
	GFRP	720	822	923	1025	1126	1228	1329	102
	PET	300	509	718	927	1136	1345	1554	209
	SrPET	440	573	706	839	972	1105	1238	133
He et al. [53]	Al_60%Sec_EU	3	7	12	16	20	24	29	4,2
	rCFRP_40%_EU	3	6	9	11	14	17	20	2,8
	rCFRP_20%_EU	4	7	10	13	17	20	23	3,1
	rCFRP_60%_EU	2	4	7	10	12	15	18	2,6
	Al_85%Sec_US	2	6	10	14	18	22	26	4,1
	rCFRP_40%_US	4	6	9	12	14	17	20	2,7
	rCFRP_20%_US	5	8	11	14	17	20	23	3,0
	rCFRP_60%_US	2	5	7	10	13	15	18	2,6
Jhaveri et al. [52]	CCI_RCA	305	736	1167	1598	2029	2460	2891	431
	TWDCI_RCA	335	723	1112	1500	1888	2277	2665	388
	CAI_RCA	353	590	827	1064	1301	1537	1774	237

Artigo	Alternativas	0	50000	100000	150000	200000	250000	300000	Declive
Delogu et al. [49]	Al_Aço_AHSS - Atual	72	147	221	296	371	445	520	75
	Al_Aço_AHSS - Futuro	59	134	208	283	358	432	507	75
	Al_Aço_AHSS_CFRP - Atual	202	251	299	347	396	444	492	48
	Al_Aço_AHSS_CFRP - Futuro	129	177	226	274	322	371	419	48
	Aço - Atual	14	38	61	84	107	131	154	23
	Aço - Futuro	14	38	61	84	107	131	154	23
	Al_CFRP - Atual	85	98	111	124	137	150	164	13
	Al_CFRP - Futuro	92	105	118	131	144	157	170	13
	Al_Aço_Plástico - Atual	536	641	746	852	957	1062	1168	105
	Al_Aço_Plástico - Futuro	474	579	685	790	895	1001	1106	105
	Al_Aço_GFRP - Atual	351	434	518	601	684	768	851	83
	Al_Aço_GFRP - Futuro	228	311	395	478	561	645	728	83
Sun et al. [50]	Aço	14	121	229	336	444	552	659	108
	AHSS	19	104	190	276	362	448	534	86
	Al	53	122	192	261	330	399	469	69
	CFRP	201	267	333	399	466	532	598	66

Os materiais convencionais dos artigos analisados, paralelamente ao CPE, apresentam emissões de CO₂ menos intensivas na fase de produção, comprovado por: Ghosh et al. [47], Poulidikou et al. [51], Jhaveri et al. [52], He et al. [53], Sun et al. [50] e, para dois dos três componentes apresentados, em Delogu et al. [49]. No entanto, no estudo de Mayyas et al. [46] a produção de componentes à base de Mg e Al apresentam impactes de produção menores comparativamente ao convencional (aço) e AHSS, devido às compensações induzidas pela reciclagem dos materiais no FdV. Consistentemente, o aço, HSS e AHSS apresentam resultados positivos para o PAG na fase de fabrico, contudo estes resultados são compensados pelos seus elevados declives, reflexo do seu peso elevado e alta sensibilidade aos aumentos das distâncias percorridas na fase de utilização do veículo.

O Al apesar de estar associado a impactes mais elevados na fase produtiva relativamente aos materiais convencionais, proporciona benefícios quando considerado o CV total (Poulidikou et al. [51], Jhaveri et al. [52] e Sun et al. [50]). Isto deve-se ao facto de a fase de uso ter uma menor contribuição para o total de impacte, tendo em conta o seu baixo peso. Nos três artigos mencionados, o Al é identificado como a melhor opção, aos 300 000 km, sendo que em Mayyas et al. [46] é considerada a segunda melhor opção, sendo apenas superada pelo Mg que, apesar de apresentar um PAG na fase de produção superior, tem um menor declive que o torna na opção com menores emissões de CO₂. De notar que em He et al. [53] se comprova que quanto maior a quantidade de Al secundário aplicado, ao invés de material virgem, ao novo componente, menores as emissões libertadas, no entanto, para este estudo, o Al, apesar de menos intensivo na etapa de fabrico, perde para as rCFRP, em particular, para o cenário em que se considera a incorporação de quantidades superiores de materiais secundários.

Os compósitos estão associados a maiores emissões de CO₂ na fase de produção em Mayyas et al. [46], Ghosh et al. [47], Poulidikou et al. [51], He et al. [53] e Sun et al. [50] Nestes estudos, adicionalmente, verifica-se também que estes materiais têm o declive mais baixo ou dos mais baixos, por terem pesos menores, os impactes da fase de uso

são mais reduzidos. Contudo a fase produtiva é de tal forma intensiva que inibe os benefícios da etapa de utilização. Em Ghosh et al. [47] confirma-se a importância do redimensionamento do sistema de propulsão e das reduções secundárias na massa do veículo para atingir benefícios mais elevados na fase de uso. He et al. [53] mostra como a inclusão de material secundário altera o PAG associado à fase de produção, sendo que a inclusão de 20% de rCF para fabrico do novo componente é a pior opção para esta etapa, seguido dos 40% e, como melhor hipótese estão os 60%, refletindo os benefícios da integração de materiais secundários na produção de componentes.

Alinhado com os resultados obtidos para o CPE, em Delogu et al. [49], as alternativas leves são superadas pelos convencionais no capô. Aqui, apesar de o declive dos materiais leves ser mais baixo comparativamente aos materiais convencionais, a intensidade da etapa de produção inibe este resultado positivo.

4.2.2 Análise Complementar

A avaliação que se segue, em que se consideram os impactes de 1 kg de material leve, permite estudar os impactes associados ao tratamento de fabrico e FdV. Na Figura 12 e Figura 13 os impactes para o CPE e PAG, respetivamente, estão quantificados por kg de material, apenas para produção, manufatura e FdV.

Em ambos os indicadores, consumo energético e emissões de CO₂, a análise do gráfico permite concluir que, de uma forma consensual, os materiais leves estão associados a energias incorporadas superiores, em alguns estudos com diferenças significativas (Mayyas et al. [46], Ghosh et al. [47], He et al. [48], Pouligidou et al. [51], Delogu et al. [49] e Sun et al. [50]). No entanto, as compensações atingidas ao tratar 1 kg de material na etapa de FdV são sempre mais evidentes para estes materiais alternativos. A avaliação apenas destas etapas do CV, ou seja, excluindo a fase de uso do veículo, atribui aos materiais leves um impacte mais elevado (tratamento conjunto de fabrico e FdV mais intensivo mesmo com as compensações atingidas). Desta maneira, verifica-se a necessidade da integração de medidas de melhoria na fase de produção e manufatura que minimizem os impactes destes processos, como, a inclusão de uma maior quantidade de materiais secundários. Por exemplo, em todos os estudos avaliados quando considerada a produção e FdV de 1 kg de compósitos, estes apresentam os impactes mais elevados comparativamente aos restantes. Ainda relativamente aos compósitos, confirma-se que a quantidade de material secundário incluído na produção de novos componentes, podem auxiliar na redução do CPE e PAG. O Al e o Mg são outros materiais leves associados a um aumento dos impactes no CV quando vêm substituir 1 kg de materiais associados ao aço (aço, aço inoxidável, HSS, AHSS).

A produção e aplicação de medidas de FdV a 1 kg de aço são menos impactantes, processo de reciclagem implementado atualmente a larga escala, relativamente a opções como HSS, aço inoxidável e AHSS. Isto pode ser explicado pelo facto de a reciclagem do aço ser um processo comum e economicamente rentável.

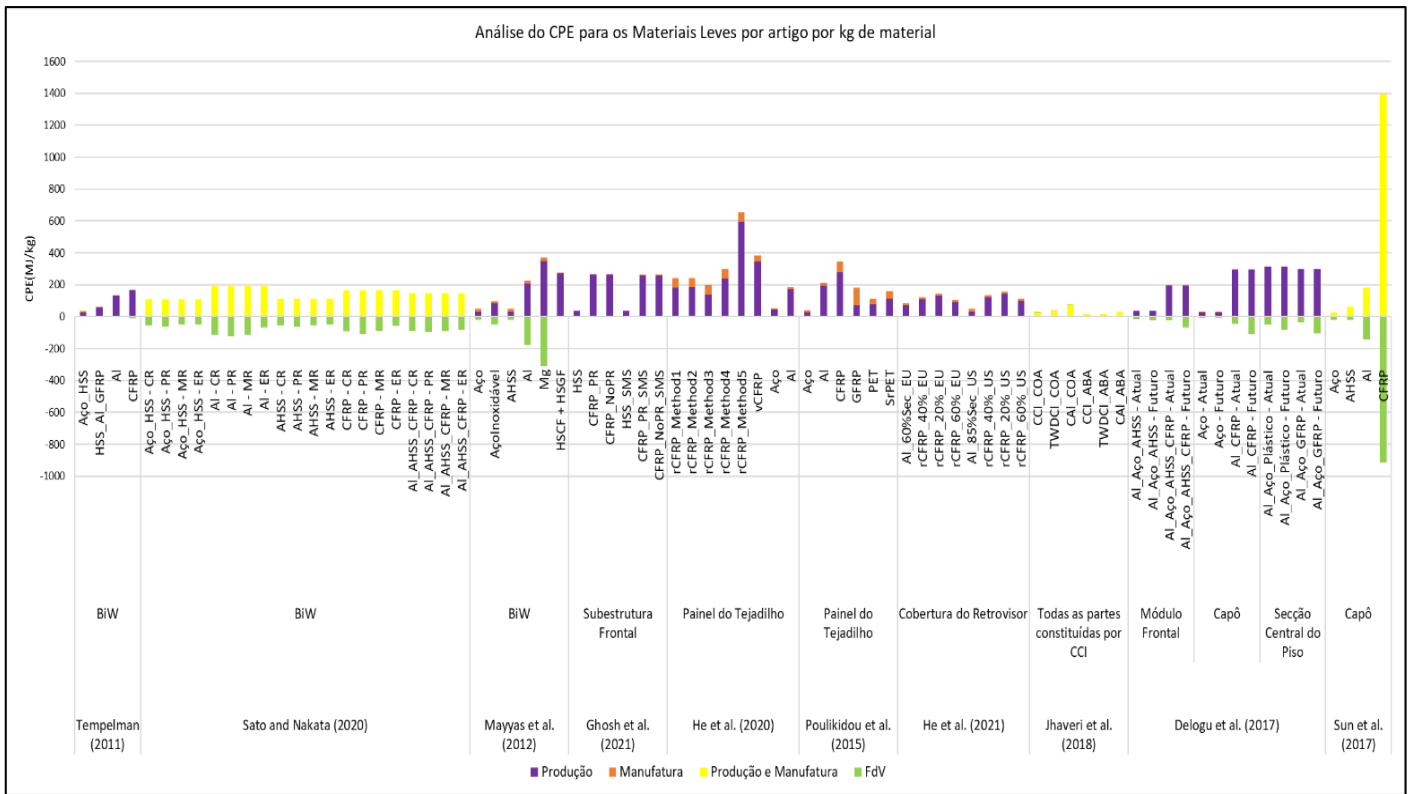


Figura 12. Análise do CPE para a estratégia de Materiais Leves por artigo por kg de material

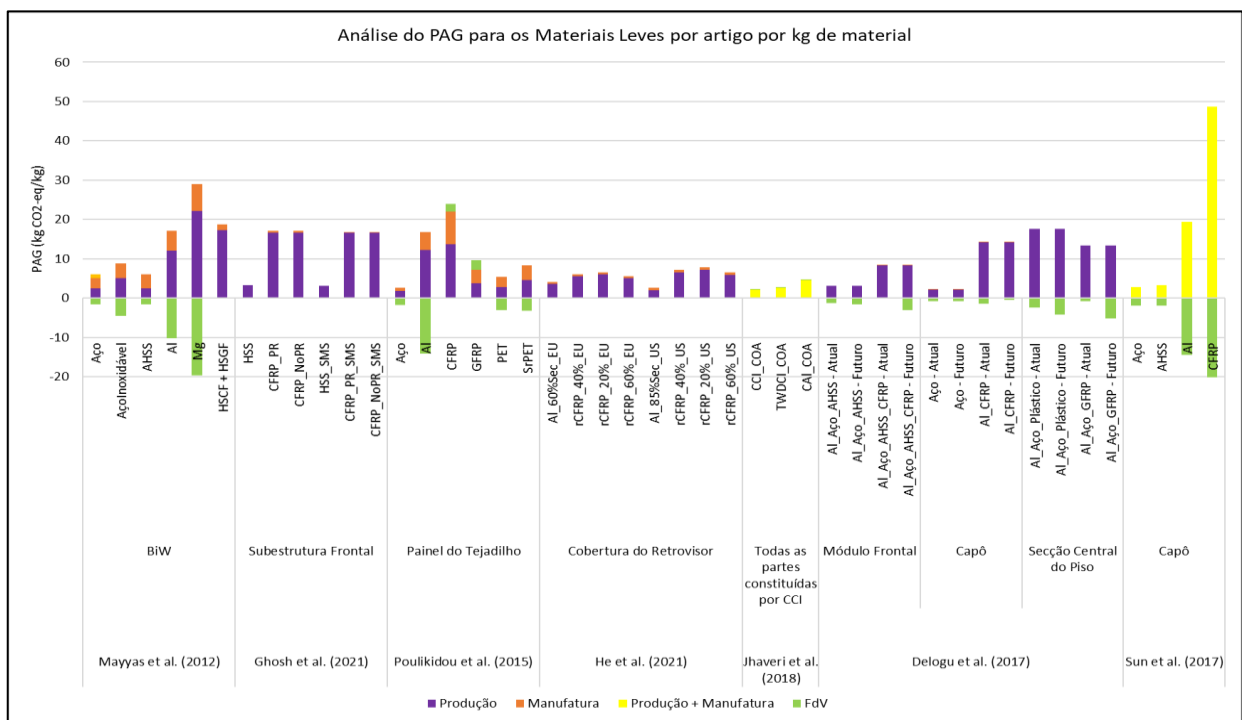


Figura 13. Análise do PAG para a estratégia de Materiais Leves por artigo por kg de material

4.3 Fim-de-Vida

A estratégia de FdV, compila oito artigos para o indicador CPE e seis artigos para o indicador PAG. Geralmente, o caso de estudo refere-se a um componente em estudo, tendo apenas uma exceção onde é analisado todo o veículo substituindo os materiais do BiW e chassi. Também neste capítulo estão incluídos os gráficos com a avaliação das diferentes opções de FdV para a distância percorrida de 200 000 km, para o CPE e PAG. As características de cada artigo estudado estão pormenorizadas no Anexo C, onde são quantificados também os impactes por kg de material.

Paralelamente à estratégia de materiais leves, para ambas as categorias avaliadas, foram criados três grupos de análise em função do fator peso ou da análise efetuada, como pode ser observado na Tabela 13.

Tabela 13. Categorização dos artigos para FdV em função do seu peso/análise

Peso/Análise do componente	Artigos	Categoria de impacte	Figura
100 kg – 518 kg	Mayyas et al. (2012) [46] Raugei et al. (2015) [54] Sato and Nakata (2021) [45]	CPE	Figura 14
	Mayyas et al. (2012) [46] Raugei et al. (2015) [54]	PAG	Figura 17
	6 kg – 38 kg	Sun et al. (2017) [50] Puri et al. (2009) [55] Delogu et al. (2017) [49]	CPE
Sun et al. (2017) [50] Puri et al. (2009) [55] Delogu et al. (2017) [49]		PAG	Figura 18
Análise sem fase de utilização		Koffler and Zahler (2012) [57]	CPE
	PAG		Figura 19

Tal como mencionado no capítulo anterior, o estudo conduzido por Mayyas et al. [46], analisa um BiW, através da aplicação dos seguintes materiais: aço, aço inoxidável, AHSS, Al, Mg e compósitos (HSCF + HSGF). A reciclagem foi o cenário FdV selecionado para todos os materiais em questão. Os resultados comprovam que a fração de reciclagem afeta o CPE, visto que o aço, seguido do AHSS e, por fim, do HSS, têm, ordenadamente, os menores impactes associados à fase produtiva, contudo são superados pelo Mg, seguido do Al, que possuem compensações mais elevadas na etapa de FdV, com uma fração de reciclagem superior em 5%. Ao Mg, onde é obtida a mais elevada compensação para o CPE, segue-se o Al com menos 22,9%, sendo que as fibras se encontram na pior posição sem estar associadas a qualquer compensação. Relativamente a todo o CV, a inclusão destas compensações permite atingir uma redução de 58,7% no consumo energético do CV para o Al e 72,6% para o Mg.

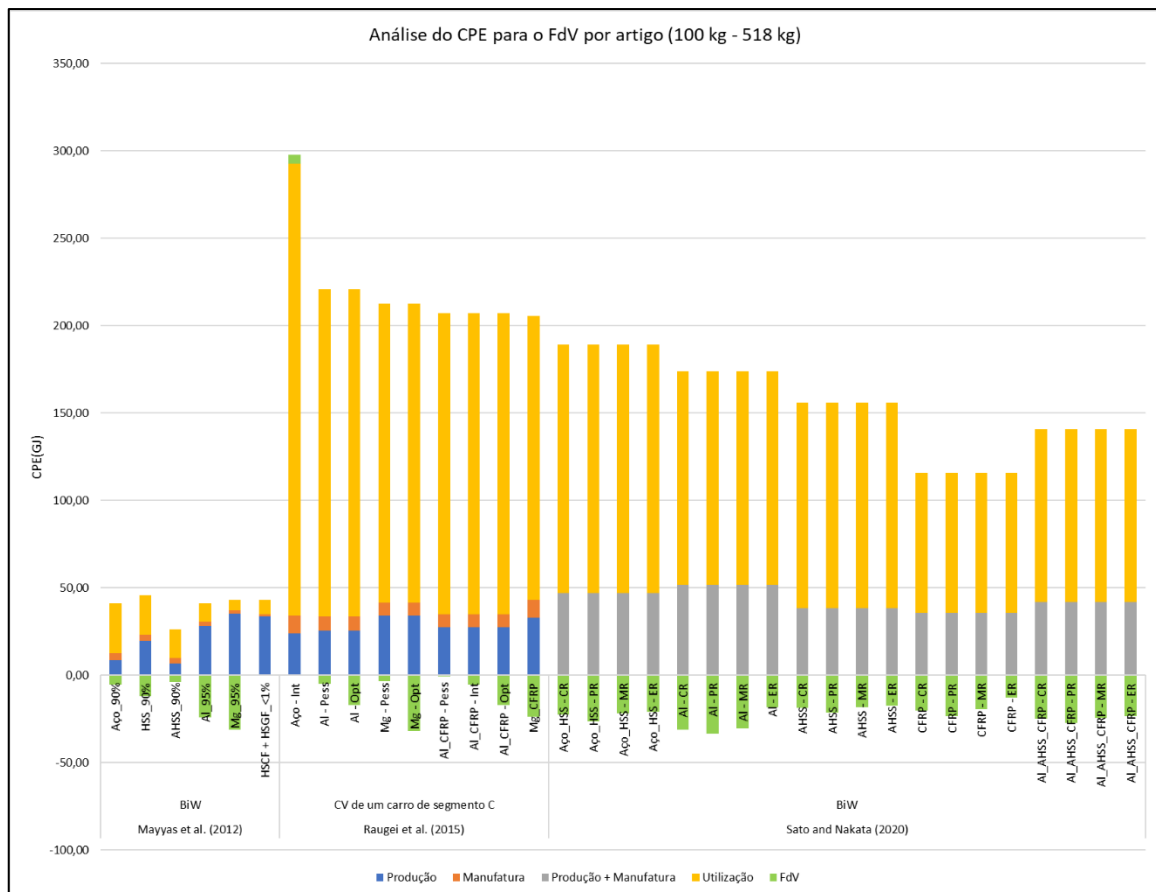


Figura 14. CPE dos artigos para a estratégia de FdV por artigo (100 kg – 518 kg)

Um veículo no seu todo é estudado por Raugui et al. [54], onde são aplicadas as alternativas leves ao BiW e chassi. As opções em avaliação incluem o aço, Al, Mg, mistura de Al e CFRP e mistura de Mg e CFRP, onde cada uma destas alternativas é submetida a determinados cenários de FdV. O aço e a mistura de Mg e CFRP são analisados segundo um cenário, enquanto os restantes comparam cenários de FdV pessimistas e otimistas, sendo que o caso da mistura de Al e CFRP abrange, além destes dois, um cenário intermédio. Os cenários otimistas, pessimistas e, quando considerados, intermédios diferem, sobretudo, na reciclagem em ciclo aberto (pessimista) e ciclo fechado (otimista) com diferentes percentagens, sendo que para os compósitos os cenários envolvem recuperação energética e reciclagem, com diferentes percentagens dependendo se o cenário é otimista, favorecendo a reciclagem, ou pessimista. Estes cenários encontram-se mais detalhados no anexo C. O CV é avaliado quantificando os impactes para as fases de produção, manufatura, utilização e FdV. Como seria expectável, os cenários otimistas de FdV atingem as reduções mais elevadas nesta etapa. Para o caso do Al, o cenário pessimista, tem associadas menos 70,6% de compensações no consumo energético, sendo que para o Mg esta diferença atinge os 89%. Relativamente à opção multi-material (Al e CFRP), o cenário pessimista envolve menos 94,8% de compensações. Considerando o panorama geral, a melhor opção é o cenário de FdV otimista para o Mg, seguido do multi-material Mg e CFRP (-26,2%). Em último lugar encontra-se a opção convencional, aço, onde o cenário de FdV em vez de resultar em compensações acaba por consumir mais energia, isto porque o consumo no tratamento de FdV supera as

compensações atingidas na substituição de material primário por secundário, tendo em conta o fabrico de novos componentes. Para as duas melhores hipóteses, considerando todo o CV, Mg e mistura Mg e CFRP, a redução de impactes no CV através da inclusão das compensações da etapa de FdV atinge os 15,1% e 11,5%, respetivamente.

O estudo efetuado por Sato and Nakata [45], já analisado para a estratégia de materiais leves, considera um BiW constituído pelos seguintes materiais: mistura de aço e HSS, Al, AHSS, CFRP e multi-material (Al, AHSS e CFRP). Cada um destes cenários é sujeito a diferentes cenários FdV, que incluem reciclagem convencional, reutilização de partes, reciclagem mecânica e recuperação energética. Esta análise comprova que as diferentes tecnologias de FdV para cada material afetam amplamente as diferentes compensações atingidas e, conseqüentemente, todo o CPE do material. A reutilização de partes é o cenário mais favorável seguido da reciclagem convencional, reciclagem mecânica e recuperação energética, ordenadamente. As amplitudes obtidas para cada material, tendo em conta o cenário de FdV mais favorável e menos favorável são: 20,5% para o aço, 44,8% para o Al, 16,8% para o AHSS, 44,5% para o CFRP e 14,9% para o multi-material. A reutilização de partes permite compensações a nível de todo o CV de 14% para o aço, 19,3% para o Al, 13,7% para o AHSS, 20,3% para o CFRP e 19,5% para o multi-material.

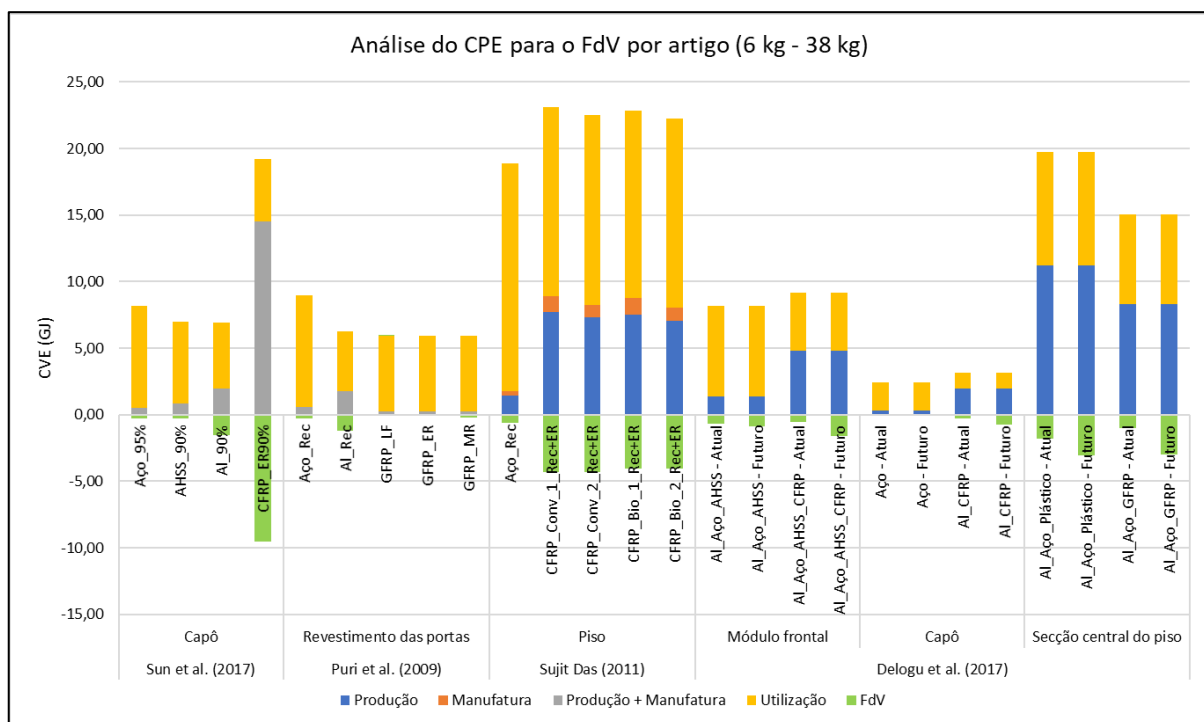


Figura 15. CPE dos artigos para a estratégia de FdV por artigo (6 kg – 38 kg)

Em Sun et al. [50], também já avaliado na prévia estratégia, o caso de estudo selecionado inclui um capô constituído por aço, AHSS, Al e CFRP. Os cenários de FdV incluem reciclagem para todos os materiais, à exceção dos CFRP submetidos a pirólise. Os CFRP atingem uma compensação de FdV bastante elevada comparativamente às restantes hipóteses. Do melhor cenário, CFRP, onde é utilizada a recuperação energética

com fração reciclável de 90%, para o segundo, Al, há uma redução nas compensações do CPE de 83,7%, seguidas do aço e, por fim, AHSS com onde a redução de compensações ultrapassa os 90%. Os CFRP, apesar de mais impactantes relativamente às restantes, atingem uma redução de 49,4% considerando todo o CV pelas compensações de FdV, sendo que a hipótese menos intensiva, Al, atinge 22,4%.

Diferentes cenários de FdV para as GFRP foram estudados por Puri et al. [55] e comparados com o aço e Al, onde o caso de estudo envolve um conjunto de revestimento de portas de um veículo. Os cenários de FdV selecionados incluem a reciclagem para todas as opções materiais e, adicionalmente, os GFRP são analisados também considerando a deposição em aterro e recuperação energética. Os resultados obtidos considerando apenas as GFRP, sugerem a reciclagem mecânica como melhor alternativa na redução do CPE, seguida pela recuperação energética com menos 89,6% de compensações, sendo que a deposição em aterro não está associada a quaisquer compensações. Avaliando o panorama geral, a reciclagem do Al é identificada como a melhor opção, seguida do aço (-75,6%), GFRP recorrendo à reciclagem mecânica (-81,3%) e, finalmente, GFRP recorrendo à recuperação energética (98,1%). A etapa de FdV do Al e GFRP com reciclagem mecânica, conduzem a reduções no CV total de 19,6% e 3,9%, respetivamente.

A reciclagem do aço é comparada com a recuperação energética de diferentes materiais em Sujit Das [56], materiais estes que incluem CFRP produzida através de um precursor têxtil ou precursor de lenhina, sendo cada uma delas sujeita a dois processos produtivos distintos. O aço é submetido a reciclagem, enquanto os CFRP são sujeitos a reciclagem e pirólise com recuperação de 98%. As diferentes tecnologias de manufatura, pelos resultados obtidos, não têm qualquer influência na fase de FdV. Neste caso, as CFRP de origem biológica (lenhina) levam a menores compensações energéticas no FdV relativamente às CFRP de origem têxtil (-5,2%). Contudo é o aço que apresenta piores resultados na fase de FdV com menos 86,6% de compensações no CPE comparativamente aos CFRP têxteis. Realizando uma média entre os processos de manufatura, a fase de FdV para os CFRP de origem têxtil permite uma redução de 18,8% no CV total, sendo que para os CFRP de origem biológica é de 18%.

Tal como na estratégia de materiais leves, Delogu et al. [49], apresenta três componentes distintos, compostos por materiais convencionais ou alternativos, onde cada uma destas opções é sujeita a dois cenários de FdV: atual ou futuro. Para o caso do módulo frontal, o material alternativo submetido ao cenário de reciclagem futuro atinge as compensações mais elevadas no CPE, sendo que na pior posição está o material alternativo com cenário FdV atual, menos 65% de compensações. O capô também apresenta o material alternativo com reciclagem avançada como melhor opção na etapa FdV, e da mesma forma em último lugar o material convencional com FdV atual/avançado (-86,6% de compensações). Contrariamente aos componentes anteriores, a secção central do piso do veículo apresenta o material convencional sujeito ao cenário de FdV futuro como a opção com mais elevadas compensações. Com apenas menos 2% destas compensações está o material alternativo submetido ao cenário de

FdV futuro e, por fim, material alternativo também com as tecnologias de reciclagem atual. Para o CV total e considerando apenas a melhor hipótese de cada componente, que envolve sempre FdV futuro, a inclusão desta etapa conduz a reduções de 11% para o módulo frontal pelo material convencional, 4,1% para o capô também pelo material convencional e 19,8% para a secção central do veículo considerando a opção alternativa.

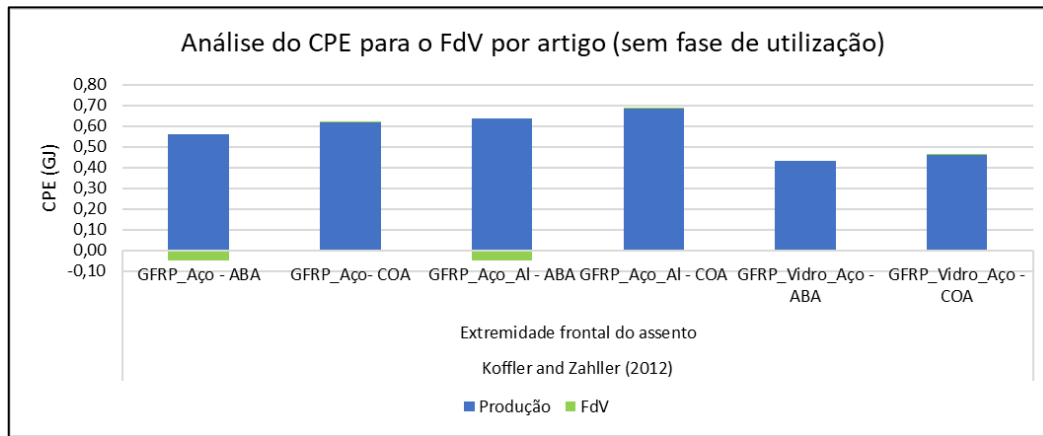


Figura 16. CPE dos artigos para a estratégia de FdV por artigo (sem fase de utilização)

Koffler and Zahller [57] analisam a extremidade frontal de um assento, sendo este constituído por diferentes multi-materiais, abrangendo três opções: 51% de GFRP e 49% aço; 42% GFRP, 57% aço e quantidades residuais de Al e latão; 90% GFRP, 10% vidro; 3% aço. Cada uma destas três opções foi submetida a duas abordagens ACV distintas: 'cut-off approach' e 'avoided burden approach'. Neste estudo foi associada a 'avoided burden approach' a compensações no FdV e a 'cut-off approach' a encargos no CPE pelo FdV. Considerando apenas as opções com compensações associadas ao FdV ('avoided burden approach'), a melhor alternativa é a mistura GFRP, Al e Aço, seguida das misturas: GFRP e Aço (-1,9%) e GFRP, Vidro e Aço (-97,9%). Quando considerado o CV total, as duas melhores opções incluem a mistura GFRP, Vidro e Aço sujeitas a 'avoided burden approach' e 'cut-off approach', sendo que para o primeiro caso, a fase de FdV leva a uma redução de 0,2% no CV, enquanto a segunda opção leva a um aumento dos impactes por 0,1%.

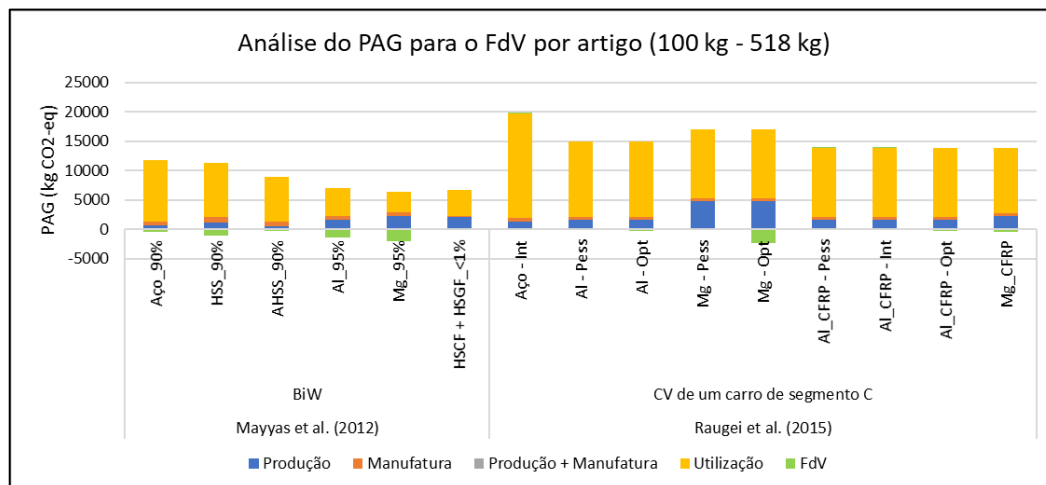


Figura 17. PAG dos artigos para a estratégia de FdV por artigo (100 kg - 518 kg)

Dando início ao PAG, o estudo realizado por Mayyas et al. [46], onde o Mg e Al têm uma fração reciclável superior em 5% relativamente ao aço, AHSS e HSS, atinge resultados semelhantes ao CPE. A opção capaz de atingir as mais elevadas compensações na fase de FdV é o Mg, seguido do Al com uma redução de 29,2% nas compensações e, por fim, os materiais à base de aço. Os compósitos, mais uma vez, não obtêm qualquer compensação dos impactes pelo FdV. A inclusão da etapa de FdV no CV total das duas melhores hipóteses: Mg e Al, leva a uma redução dos impactes totais de 30,9% e 19,8%, respetivamente.

O CV de um carro estudado por Raugei et al. [54], naturalmente, identifica as opções otimistas de FdV como benéficas comparativamente às pessimistas e intermédias. A melhor alternativa inclui também o Mg, com cenário otimista, onde a inclusão do cenário pessimista resulta em menos 99,1% de compensações. O Al é também capaz de reduzir o PAG através da fase de FdV, sendo que considerando o cenário otimista estão envolvidas menos 86,8% de compensações. Tendo em conta os restantes, a mistura de Al e CFRP, com cenário otimista, está associada a menos 88,7% de compensações relativamente à melhor opção e a mistura de Mg e CFRP menos 80,8%. O aço não é associado a compensações. As opções com menores emissões de CO₂ no CV total são ambas multi-materiais, Mg e CFRP e Al e CFRP, sendo que a consideração da fase de FdV permite atingir reduções de 3,2% para a mistura com Mg e 1,9% para a mistura com Al no CV.

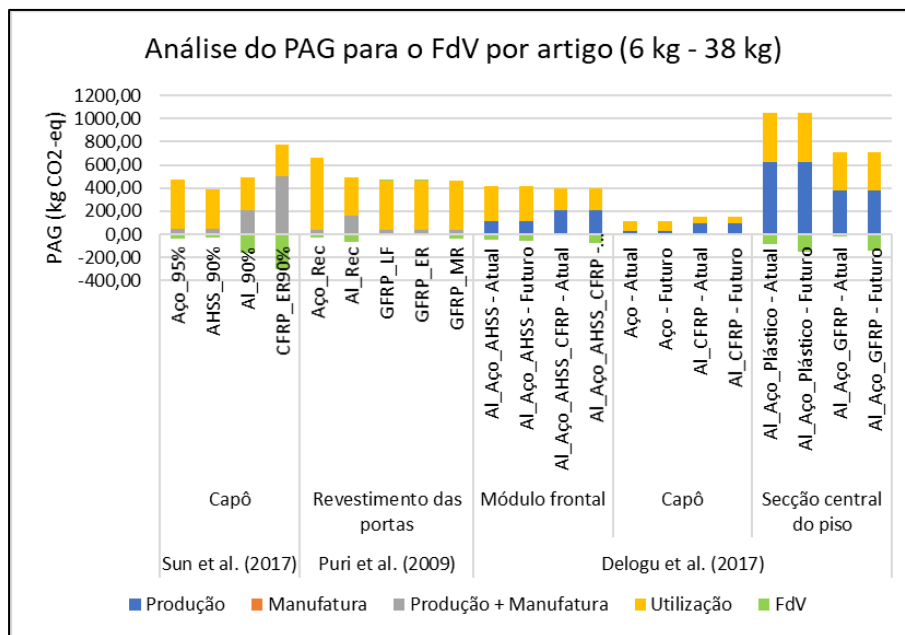


Figura 18. PAG dos artigos para a estratégia de FdV por artigo (6 kg - 38 kg)

O capô analisado por Sun et al. [50] identifica os CFRP submetidas a recuperação energética como a opção capaz de atingir as maiores compensações no FdV para as emissões de CO₂. Em segundo lugar, o Al, com menos 48%, seguido do aço e AHSS com cerca de menos 90% de compensações. A etapa de FdV permite reduções no CV total, sendo que as melhores hipóteses que incluem o Al e o AHSS são alvo de 32,5% e 6,8% de reduções no CV, respetivamente.

O revestimento das portas avaliado por Puri et al [55], regista como melhor alternativa a reciclagem do Al para as emissões de CO₂. Sendo que apenas as GFRP submetidas a reciclagem mecânica e a reciclagem do aço são capazes de atingir compensações no FdV para além do Al. Cada uma destas conduz a menos 47,1% e 63,2% de compensações, respetivamente. Tal como no CPE, as melhores opções relativamente ao CV total são o Al (-13,7% de PAG considerando o FdV no CV) e GFRP com reciclagem mecânica (-7,7% de PAG considerando o FdV no CV).

O módulo frontal analisado por Delogu et al. [49] relativamente ao PAG, tal como para o CPE, identifica o material alternativo sujeito ao cenário FdV futuro como melhor opção e, como pior, o material alternativo com cenário atual (-95,7%). Considerando o capô, o resultado altera-se com o indicador. A melhor opção é o material alternativo com modo de FdV atual, sendo que o material convencional com FdV futuro é a opção mais prejudicial com menos 63,1% de compensações. A melhor alternativa para a secção do piso central do veículo para o indicador PAG volta a coincidir com a do CPE, tratando-se o material futuro com FdV atual. O material convencional com cenários de FdV atuais leva a menos 84,6% de compensações. Tendo em conta a alternativa com menos emissões associadas de cada componente para o CV total, a fase de FdV, que inclui sempre o cenário futuro, permite uma redução de 19,2% nos impactes para o módulo frontal através do material alternativo, 8,4% para o capô através do material convencional e 20,6% para a secção central do veículo pelo material alternativo.

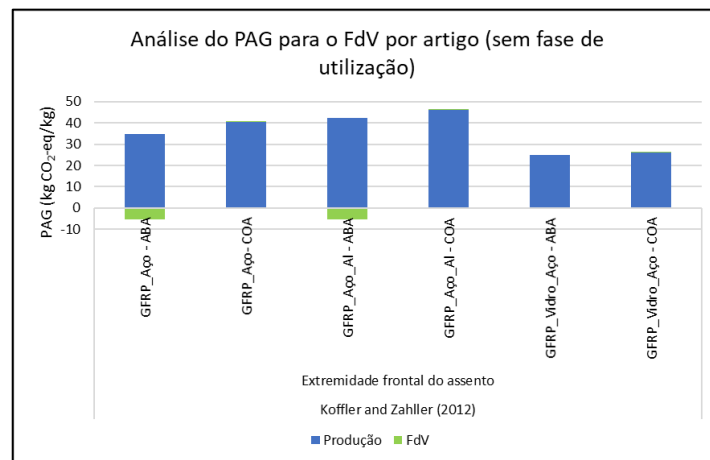


Figura 19. PAG dos artigos para a estratégia de FdV por artigo (sem fase de utilização)

A extremidade frontal do assento analisada regista, para o PAG, em Koffler and Zahller [57] resultados alinhados com o CPE. A melhor alternativa é a mistura GFRP, Aço e Al sujeito à *'avoided burden approach'*, seguida pela alternativa GFRP e Aço com menos 2% de compensações relativas a emissões de CO₂ e, por último, GFRP, Vidro e Aço que conduz a menos 98% de compensações, ambas as opções se referem à *'avoided burden approach'*. A *'cut-off approach'* está associada a consumos e não a compensações no FdV. Alinhado com o indicador CPE, as duas melhores alternativas tendo em conta o CV total incluem apenas GFRP, Vidro e Aço, sujeita a ambas as abordagens de ACV: *'avoided burden approach'* e *'cut-off approach'*. A consideração do FdV leva a reduções no PAG para a primeira opção de 24,7% e a um aumento deste para a segunda opção de 0,3%.

4.3.1 Análise Complementar

No decorrer desta seção são analisados os impactes associados à etapa de produção, manufatura e FdV relativamente à estratégia de FdV, considerando apenas 1 kg de cada material.

Na Figura 20 e Figura 21, considerando a estratégia de FdV, estão os impactes do CPE e PAG, respetivamente, por kg de material, incluindo a produção, manufatura e FdV.

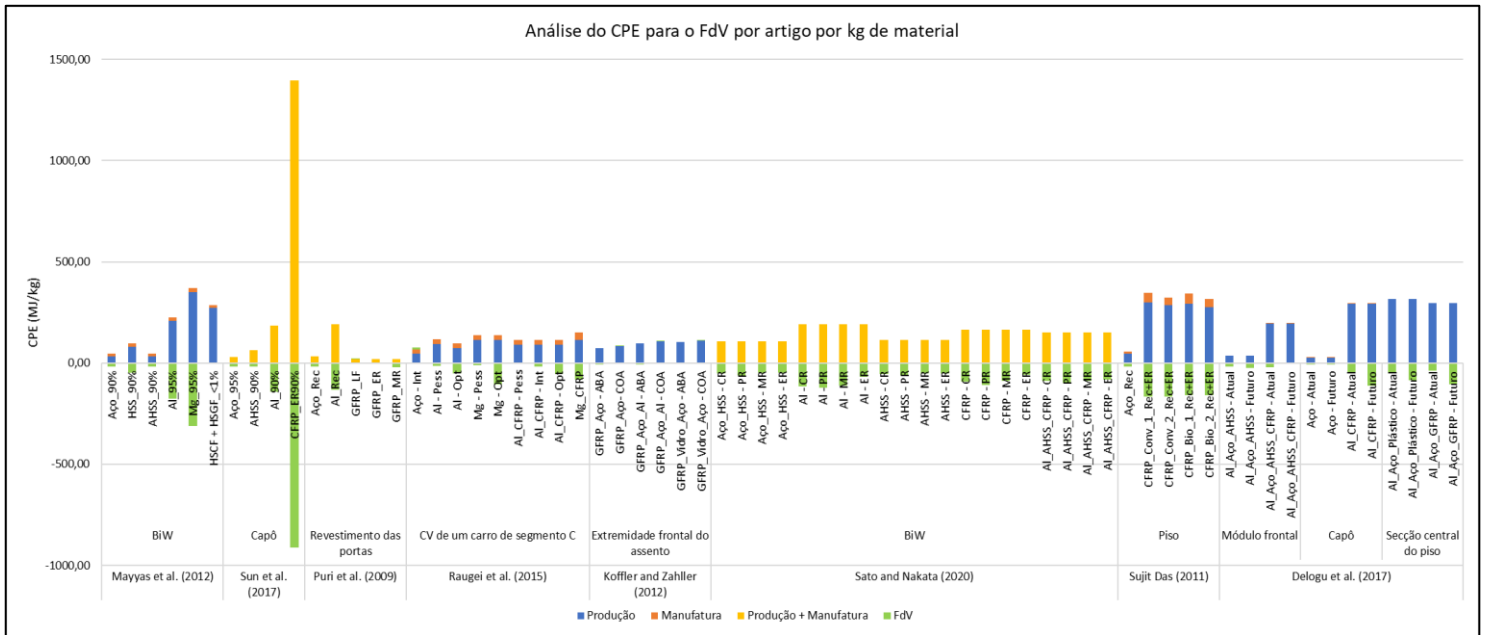


Figura 20. Análise do CPE para a estratégia de FdV por artigo por kg de material

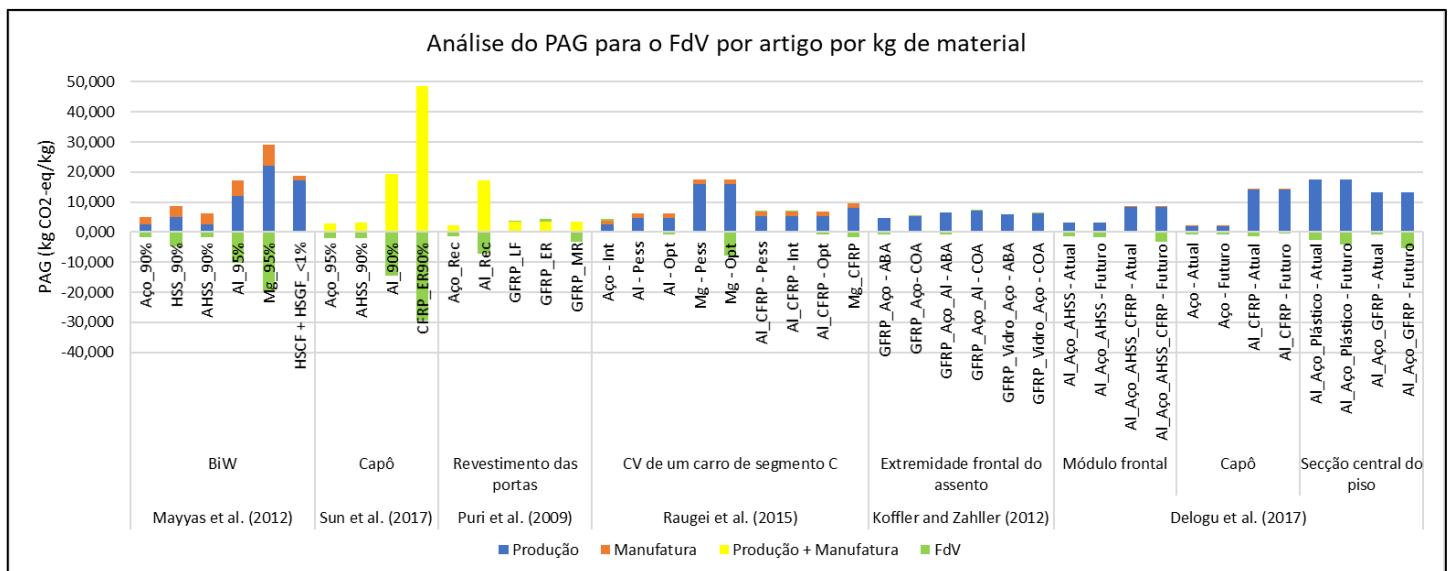


Figura 21. Análise do PAG para a estratégia de FdV por artigo por kg de material

Para a maioria dos artigos, os resultados relativos aos indicadores CPE e PAG mantêm-se. Também nesta estratégia, de uma forma geral, se confirma o facto de 1 kg de

produção e etapa de FdV de materiais leves corresponderem a maiores impactes relativamente aos materiais convencionais, com algumas exceções.

De forma a analisar a etapa de FdV comparativamente à etapa de produção, conclui-se que de uma forma consensual, os materiais leves estão associados a energias incorporadas superiores, em alguns estudos com diferenças significativas. No entanto, as compensações atingidas ao tratar 1 kg de material na etapa de FdV são sempre mais evidentes para estes materiais alternativos. Tendo em conta estas avaliações por etapas, o facto de não contabilizar a fase de utilização resulta num tratamento conjunto de fabrico e FdV mais intensivo para os materiais leves, mesmo com as compensações atingidas, tornando necessária a integração de medidas na fase de produção e manufatura que revertam este processo, como por exemplo, inclusão de uma maior quantidade de materiais secundários.

Os diferentes cenários de FdV têm influência nos impactes finais quantificados, sendo que em Puri et al. [55] se verifica uma elevada amplitude para as GFRP comparando a melhor opção (reciclagem mecânica) com as restantes duas (recuperação energética e deposição em aterro). Esta mesma amplitude é comprovada por Sato and Nakata [45] pelo Al e CFRP, onde a ampla diferença entre a reutilização de partes e recuperação energética é evidente. O mesmo se verifica em Raugei et al. [54] onde os resultados finais diferem entre os dois indicadores em avaliação. Neste estudo, para o caso do CPE, a produção e etapa de FdV de 1 kg de Mg é identificada como a melhor e pior opção em função do cenário de FdV adotado, otimista ou pessimista. Considerando apenas o PAG, a pior opção mantém-se (Mg com FdV pessimista), no entanto a alternativa associada às mais baixas emissões de CO₂ passa a ser o convencional, aço, descendo o Mg com cenário positivo muitos lugares para este indicador. Opções como: Al e o multi-material, Al_CFRP, com FdV otimista ocupam boas posições no CPE e PAG. Mais uma vez se confirma a importância da análise de ACV adotada relativamente ao FdV, dado que os resultados associados à *'avoided burden approach'* superam amplamente os resultados de *'cut-off approach'*.

Contrariamente à análise realizada anteriormente (200 000 km), em Sujit Das [56], o método influencia os resultados da produção e tratamento de FdV de 1 kg de material, sendo que é este o parâmetro que vai influenciar os impactes e não a seleção de materiais (de origem têxtil ou biológica), para este caso a manufatura através do processo Sheet Moulding Compound mostra ser mais intensiva relativamente à manufatura através do processo P4.

Resultados interessantes foram obtidos por Delogu et al. [49], onde ao considerar o CPE o cenário avançado de FdV atinge maiores impactes relativamente ao cenário atual para dois dos três componentes avaliados (módulo frontal e capô). Contudo para o PAG, ambos os componentes estão associados a um aumento das emissões se adotado o cenário de FdV atual e não o futuro.

Esta análise permite concluir que os impactes dependem do cenário de FdV adotado e que os resultados obtidos podem diferir entre os dois indicadores avaliados, devendo

por isso fazer-se um estudo prévio com uma análise cuidadosa equilibrando os impactos de cada categoria.

A avaliação da estratégia de FdV, relativamente às categorias CPE e PAG, também levou à identificação de aspetos importantes na redução dos impactos no CV de um veículo, que são:

1. Repetidamente os materiais alternativos, Mg e Al, mostraram-se favoráveis para a etapa de FdV comparativamente aos convencionais, como aço, HSS e AHSS, quando submetidos ao mesmo processo de tratamento.
2. Os CFRP e GFRP são capazes de proporcionar benefícios no CV de um veículo, dependendo do cenário selecionado para o seu tratamento. Segundo os resultados obtidos deve ser priorizada a reutilização no caso dos CFRP e a reciclagem mecânica no caso dos GFRP.
3. Os materiais alternativos/leves quando sujeitos a diferentes cenários de FdV apresentam elevadas amplitudes de resultados, comprovando assim a sua sensibilidade para esta etapa, devendo esta ser cuidadosamente selecionada de forma a consumir a menor energia possível e emitir a menor quantidade de CO₂.
4. A utilização de materiais de origem biológica na produção de CFRP também mostrou ser uma medida eficaz na redução do CPE de um veículo.
5. A abordagem selecionada (*'avoided burden approach'* e *'cut-off approach'*) para a ACV tem de ser cuidadosamente considerada, visto que provoca alterações nos impactos de FdV e, conseqüentemente, de todo o CV. O ideal seria a seleção da *'avoided burden approach'* onde seriam discutidas as condições em que o produto estaria a substituir outro na prática, porém pode não haver condições para esta abordagem. Os CV são complexos, com vários processos multifuncionais, levando muito tempo se forem consideradas todas as opções além de ser necessária a recolha de informação relativamente aos CV substituídos e prova de que foram tomadas as melhores decisões. Posto isto, muitas vezes são consideradas abordagens mais simples, que apesar de não tão realistas, não de arriscam pressupostos que depois não se verifiquem ou que não estejam devidamente fundamentados, beneficiando ou prejudicando os resultados obtidos. Contudo, tudo isto depende dos objetivos da ACV, sendo este um tema complexo, dependente de cada caso e das condições reunidas [61].
6. A escolha do cenário de FdV tanto pode levar a um aumento das emissões no CV como pode atingir compensações atenuando os impactos, portanto o cenário deve ser criteriosamente selecionado dado o seu potencial de influência.
7. A melhor alternativa depende mais do cenário de FdV, nomeadamente, tecnologias aplicadas, fração reciclável, abordagens ACV, comparativamente à seleção de materiais.

CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

- 5.1 Conclusões
- 5.2 Sugestões de trabalhos futuros

5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

5.1 Conclusões

Esta dissertação teve como foco principal o estudo de medidas com potencial para apoiar o setor rodoviário na redução dos seus impactes ambientais, uma vez que este setor se apresenta como um dos maiores responsáveis pelas alterações climáticas.

Uma revisão inicial da literatura existente, assim como a análise da legislação em vigor, permitiram identificar três estratégias com elevado potencial na mitigação dos impactes associados ao setor rodoviário: seleção do sistema de propulsão, aplicação de materiais leves e cenários de FdV. Deste modo, foi realizada uma revisão sistemática da literatura existente neste setor onde fosse aplicada a ACV a uma das três estratégias mencionadas, avaliando-as por meio de duas categorias de impacte amplamente utilizadas em estudos de ACV: CPE e PAG, onde ambas refletem a intensidade das emissões de GEE associadas às alternativas, emissões estas que são as principais responsáveis pela poluição atmosférica e alterações climáticas.

O valor desta dissertação encontra-se, sobretudo, na análise simultânea de diferentes artigos com diferentes características que de outra forma não seria possível, ultrapassando obstáculos como: diferenças nos casos de estudo, distância percorrida durante o CV, cenários de FdV, limitações do sistema e diferente formatação e aplicação dos resultados que não permitem uma comparação direta das alternativas inseridas em cada estratégia, assim como entre cada uma. Desta forma, foi possível identificar as estratégias mais benéficas e mais prejudiciais para o CV do veículo e os pontos sensíveis em cada uma, disponibilizando impactes quantificados que podem vir a ser aplicados noutros estudos, dados estes difíceis de encontrar sistematizados na literatura.

A avaliação das três estratégias foi conduzida pela quantificação dos impactes identificados em cada artigo, normalizando os seus impactes para os 200 000 km. Uma análise de sensibilidade foi também realizada para as estratégias de sistemas de propulsão e materiais leves de forma a estudar os impactes associados às diferentes etapas do CV dos veículos/componentes. À estratégia de FdV, como também, de materiais leves foi efetuada uma análise complementar onde foram estudados os impactes das etapas do ciclo de vida, excluindo a utilização, independentemente do fator peso, ou seja, os impactes foram quantificados por kg de material.

A seleção do sistema de propulsão demonstra que as alternativas eletrificadas, BEV, HEV, PHEV, estão associadas a menores impactes ambientais relativamente às tecnologias convencionais, devendo-se isto, principalmente à fase de utilização. O contexto (país) da rede elétrica utilizada para alimentação energética mostra uma

elevada relevância, no sentido em que um *mix* com uma parcela superior de combustíveis fósseis comparativamente às energias limpas, prejudica o desempenho do sistema de propulsão alimentado por esta fonte. A tecnologia FCV é amplamente estudada através dos métodos de obtenção de H₂, onde é confirmada a relevância deste método, devendo ser priorizadas fontes como energia eólica e hidroelétrica, separação termoquímica da água e também a biomassa. Em ambas as categorias, CPE e PAG, foram registadas amplitudes elevadas dentro de cada sistema de propulsão, dependendo isto da tecnologia utilizada, vetor energético e fonte energética, devendo estes pontos ser considerados, detalhadamente, em conjunto com a seleção do sistema de propulsão. O bioetanol comprovou ser uma boa alternativa como combustível em diferentes sistemas de propulsão, individualmente, ou complementado com outras fontes, como, energia eólica. A utilização de gás natural como combustível, por sua vez, leva a um aumento dos impactes, o mesmo se verificando para a gasolina e diesel, levando à necessidade da sua substituição por bioetanol, biomassa, ou sistemas de propulsão eletrificados, contudo a gasolina acaba por ser mais prejudicial do que o diesel. O FU é outra característica dos PHEVs responsável por alterações nos resultados, dado que varia proporcionalmente com os impactes. As alternativas eletrificadas, principalmente o BEV, estão associadas a elevados impactes na fase de produção e FdV, comparativamente aos ICEVs que apresentam baixos impactes nestas fases. Isto deve-se à intensidade da produção das baterias Li-ion, onde situações como a necessidade de ser substituída durante o CV aumentam consideravelmente o CPE. Contudo estas tecnologias também comprovam uma baixa influência pela etapa de utilização e D&A onde acabam por recuperar e melhorar o seu desempenho, levando a concluir que estas tecnologias devem ser priorizadas quanto maior for a distância percorrida no CV do veículo. Por sua vez, os veículos convencionais ficam a perder, aumentando significativamente os seus impactes totais com o aumento da distância percorrida.

O estudo da aplicação de materiais leves aos veículos, permitiu concluir que estes apresentam potencial na redução de impactes, ainda assim verificam-se casos onde as opções convencionais superam as inovadoras. Medidas, como, redimensionamento do sistema de propulsão e reduções secundárias de massa podem vir a reduzir os impactes ambientais das alternativas, devendo por isso ser consideradas na produção do componente em questão. O contexto em que o material é produzido também apresenta influência, sendo que diferentes materiais apresentam diferentes relações com este parâmetro, ou seja, um material pode ser mais intensivo num país relativamente a outro material, e o inverso num país distinto. Durante a produção do componente deve priorizar-se a utilização de material secundário, cujo processamento é menos intensivo relativamente às matérias-primas virgens, adicionalmente também se diminui a extração de novas matérias promovendo a economia circular. Ainda relativamente ao FdV associado a esta estratégia, deve ser cuidadosamente selecionado o cenário mais adequado para cada material permitindo a redução dos impactes ambientais nesta etapa, priorizando o cenário de reutilização. Os materiais convencionais registam melhores resultados nas etapas independentes da fase de utilização, com uma etapa de produção associada significativamente menos intensiva, diferença esta que se torna

mais evidente quando há a necessidade de substituição de componentes durante o CV do veículo, aspeto cuja dimensão dos impactes varia conforme o componente a substituir. Contudo, os materiais inovadores atingem compensações mais elevadas no FdV, mitigando assim o bom desempenho dos convencionais nas etapas não influenciadas pelo uso. Contrariamente à fase de produção, os materiais leves, demonstram ser menos influenciados durante a utilização comparativamente aos mais pesados, melhorando o seu desempenho com o aumento da distância percorrida no CV. Em alguns casos, para os materiais alternativos, os impactes associados à fase de produção cobrem o bom desempenho da fase de uso, desvalorizando-os relativamente às opções convencionais. O Al e Mg ficam registados como boas opções, pois apesar de estarem associados a uma etapa produtiva intensiva, mostram o bom desempenho com o aumento da distância percorrida, cobrindo o impacte inicial prejudicial. Já os compósitos, apesar de atingirem os melhores resultados na fase de uso, têm uma fase de produção de tal forma intensiva que inibe os seus bons resultados.

A análise da última estratégia, FdV, permitiu reforçar a potencialidade dos materiais alternativos, nomeadamente Al e Mg, nesta etapa, relativamente aos convencionais, sendo que os compósitos dependem significativamente do cenário selecionado. Também nesta estratégia é verificada uma amplitude evidente dentro de cada caso, dado que para o mesmo material são registadas discrepâncias tendo em conta os diferentes cenários de FdV. Outros parâmetros que abrangem, inclusão de material biológico na produção dos materiais e de material reciclado e abordagem selecionada para a ACV também afetam os resultados obtidos. A análise desta estratégia permite concluir que a melhor alternativa acaba por depender mais do cenário FdV do que do material selecionado.

O ideal será a combinação das três estratégias que, individualmente, comprovaram o seu potencial na mitigação dos impactes ambientais para o setor automóvel, obtendo deste modo, benefícios ainda mais evidentes. De notar que as estratégias de materiais leves e FdV se encontram estreitamente ligadas, sendo muitas vezes dependentes uma da outra, visto que os cenários de FdV, frações recicláveis, potencial de reutilização, entre outros, variam consoante o material em estudo, sendo este um motivo de consideração e aplicação de ambas as estratégias, simultaneamente. Adicionalmente, o sistema de propulsão também tem pontos em comum com a redução do peso do veículo em parâmetros que incluem o redimensionamento do sistema de propulsão e tecnologias que requerem baterias de diferentes capacidades e tamanhos.

Relativamente ao contexto nacional considerando o sistema de propulsão, no ano de 2018, em Portugal, a parcela de renováveis responsável pela produção de eletricidade foi superior a 50%, mais especificamente, 52,2%. Este número é significativamente superior à parcela média de energias renováveis na UE-28, 31,2% [62], [63]. Isto aponta para um maior potencial por parte de Portugal para inclusão das alternativas eletrificadas relativamente à média da UE, sendo positivo um investimento neste sentido. Tendo em conta os materiais, em 2018, foram produzidos mais 67,7% de veículos totais relativamente a 2006, refletindo um crescimento significativo.

Adicionalmente, também em 2018, 3% da produção destinou-se ao mercado interno e 97% ao externo, reforçando a importância da indústria automóvel portuguesa no estrangeiro [64]. Desta forma, Portugal torna-se responsável pela adoção de medidas de apoio à economia circular e integração de materiais leves nos veículos/componentes de forma a reduzir os impactos associados, tendo sempre em vista a eficiência de recursos. O acompanhamento das mudanças neste setor, nomeadamente, limites de emissões, alteração no conceito da mobilidade, aposta no desenvolvimento de tecnologias digitais e alinhamento com os requisitos dos consumidores, além da realocação da produção para países com menores custos associados a esta etapa e ainda a instigação dos sistemas de fabrico a nível global, são os aspetos chave para o sucesso do setor automóvel e respetiva produção em Portugal [65].

5.2 Sugestões de trabalhos futuros

As conclusões permitem identificar pontos chave que devem ser alvo de um estudo mais aprofundado, aumentando o conhecimento na área e permitindo o aperfeiçoamento e seleção fundamentada das melhores alternativas.

A produção é uma fase de extrema complexidade que deve ser estudada e desenvolvida de forma a dar apoio às alternativas inovadoras e benéficas para a fase de utilização, isto porque esta etapa inibe, de uma forma geral, o seu bom desempenho. Relativamente ao sistema de propulsão, apesar de as baterias Li-ion estarem já a ser amplamente estudadas, há a necessidade de redução dos impactos destes componentes, visto que é o principal fator a retardar o potencial das alternativas eletrificadas. A identificação dos contextos onde o *mix* energético tem uma parcela significativa de energias limpas seria favorável no sentido de distinguir os países com capacidade de alimentação de alternativas eletrificadas sem elevados impactos ambientais associados. Alinhada com a estratégia do sistema de propulsão, os materiais leves também precisam de ser estudados a nível da fase de produção, dado que esta acaba por inibir o seu potencial na fase de utilização, principalmente, para os compósitos.

O estudo da perspetiva de CV de um veículo onde fossem aplicadas as três estratégias em simultâneo seria benéfico, considerando a combinação de diferentes tecnologias, de forma a avaliar diferentes caminhos e respetivas compatibilizações de alternativas entre estratégias que permitam as maiores reduções de impactos ambientais.

A nível nacional deve ser estudado e aprofundado o potencial das alternativas eletrificadas. Deste modo, é verificado o potencial na sua adoção, tendo em conta o promissor *mix* energético português que o identifica como um bom contexto para implementação destas tecnologias, mitigando assim os impactos ambientais associados ao setor automóvel. Para além disto deve ser analisada a margem de crescimento de Portugal na produção automóvel, dada a sua dimensão neste âmbito, aumentando a quantidade de materiais leves aplicados, assim como de materiais secundários, promovendo a economia circular.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] “Instituto de Soldadura e Qualidade (ISQ).” <https://www.isq.pt/> (acedido a 8 de outubro de 2021).
- [2] Comissão Europeia, “Causas das Alterações Climáticas,” *Ação Climática*, s.d. https://ec.europa.eu/clima/climate-change/causes-climate-change_pt (acedido a 7 de outubro de 2021).
- [3] REA - Portal do Estado do Ambiente Portugal, “Produção e Consumo de Energia,” *Energia e Clima*, 2019. <https://rea.apambiente.pt/content/produção-e-consumo-de-energia> (acedido a 7 de outubro de 2021).
- [4] Comissão Europeia, *EU Transport in figures - Statistical PocketBook 2020. Mobility and Transport*. 2020.
- [5] Portal Eurocid, “Alterações Climáticas - Rumo a uma União Europeia com impacto neutro no clima,” 2021. <https://eurocid.mne.gov.pt/alteracoes-climaticas> (acedido a 28 de setembro de 2021).
- [6] Comissão Europeia, “Sustainable and Smart Mobility Strategy – Putting European transport on track for the future,” *Comun. da Comissão ao Parlam. Eur. ao Cons. ao Com. Económico e Soc. Eur. e ao Com. das Regiões*, 2020.
- [7] República Portuguesa, “Plano Nacional Energia-Clima 2030,” *Ambiente e Transição Energética*, 2019. <https://participa.pt/contents/consultationdocument/imported/2585/670002.pdf> (acedido a 8 de outubro de 2021).
- [8] Caggemini - Research Institute, “The Automotive Industry in the Era of Sustainability,” 2020.
- [9] Comissão Europeia, “Green propulsion in transport - Mobility and Transport,” 2019.
- [10] U.S. Department of Energy, “Biofuel Basics,” *Bioenergy Technologies Office*, s.d. <https://www.energy.gov/eere/bioenergy/biofuel-basics> (acedido a 30 de setembro de 2021).
- [11] The Automobile Association, “Helping cut carbon and reduce greenhouse gas emissions from transport - Find out the pros and cons of biofuels,” *Biodiesel and Bioethanol*, 2019. <https://www.theaa.com/driving-advice/fuels-environment/biofuels> (acedido a 1 de outubro de 2021).
- [12] U.S. Department of Energy, “Internal Combustion Engine Basics,” *Vehicle Technologies Office*, 2013. <https://www.energy.gov/eere/vehicles/articles/internal-combustion-engine-basics> (acedido a 1 de outubro de 2021).
- [13] Midtronics - Advancing Battery Management, “What is the Battery Differences in EV, HEV, PHEV?,” 2021. <http://www.midtronics.com/2021/06/25/what-is-the-battery-differences-in-ev-hev-phev/> (acedido a 30 de setembro de 2021).
- [14] V. Hudda and A. Kumar, “A Summary of Electric Vehicle Propulsion Technologies,” 2014.
- [15] Honda Portugal Automóveis, “O que são carros híbridos? Saiba como funcionam e vantagens,” 2021. <https://honda-automoveis.pt/blog/o-que-sao-carr-os>

- híbridos/ (acedido a 1 de outubro de 2021).
- [16] X. Wu, M. Aviquzzaman, and Z. Lin, "Analysis of plug-in hybrid electric vehicles' utility factors using GPS-based longitudinal travel data," *Transp. Res. Part C Emerg. Technol.*, vol. 57, pp. 1–12, 2015, doi: 10.1016/j.trc.2015.05.008.
- [17] U.S. Department of Energy, "How Do Fuel Cell Electric Vehicles Work Using Hydrogen?," s.d. *Energy Efficiency and Renewable Energies*. <https://afdc.energy.gov/vehicles/how-do-fuel-cell-electric-cars-work> (acedido a 30 de setembro de 2021).
- [18] U.S. Department of Energy, "Lightweight Materials for Cars and Trucks," *Vehicle Technologies Office*, s.d. <https://www.energy.gov/eere/vehicles/lightweight-materials-cars-and-trucks> (acedido a 30 de setembro de 2021).
- [19] Eccomelt LLC, "Benefits of Using Light Weight Materials When Building Automobiles.," s.d. <https://eccomelt.com/3-benefits-of-lightweight-materials-in-automotive-applications/> (acedido a 30 de setembro de 2021).
- [20] Rairdon's Nissan of Auburn, "3 Advantages of Lightweight Vehicles," 2016. <https://www.nissanofauburn.com/3-advantages-lightweight-vehicles/> (acedido a 30 de setembro de 2021).
- [21] M. Zamari and M. Saman, "End of life vehicles recovery: process description, its impact and direction of research," 2006.
- [22] General Kinematics, "Open-Loop VS Closed-Loop recycling.," s.d. <https://www.generalkinematics.com/blog/open-loop-vs-closed-loop-recycling/> (acedido a 2 de outubro de 2021).
- [23] The Global Development Research Center, "Defining Life cycle Assessment.," s.d. <https://www.gdrc.org/uem/lca/lca-define.html> (acedido a 2 de outubro de 2021).
- [24] D. Maia de Souza, "A Avaliação do Ciclo de Vida - ISO 14040.," s.d. <https://ciclodevida.wordpress.com/> (acedido a 2 de outubro de 2021).
- [25] J. V. R. Ferreira, "Análise de Ciclo de Vida dos Produtos," 2004.
- [26] I. V. Muralikrishna and V. Manickam, "Life Cycle Assessment," *Environ. Manage.*, 2017, doi: 10.1016/B978-0-12-811989-1.00005-1.
- [27] S. S. Muthu, "Estimating the overall environmental impact of textile processing," *Assess. Environ. Impact Text. Cloth. Supply Chain*, 2020, doi: 10.1016/B978-0-12-819783-7.00006-5.
- [28] Ecochain, "Impact Categories (LCA) – Overview," 2019. <https://ecochain.com/knowledge/impact-categories-lca/> (acedido a 7 de outubro de 2021).
- [29] V. Ryan, "Life Cycle Energy Analysis," 2015. https://technologystudent.com/prddes1/life_energy1.html (acedido a 7 de outubro de 2021).
- [30] R. Frischknecht, "LCI modelling approaches applied on recycling of materials in view of environmental sustainability, risk perception and eco-efficiency," *Int. J. Life Cycle Assess.*, vol. 15, no. 7, pp. 666–671, 2010, doi: 10.1007/s11367-010-0201-6.
- [31] "ScienceDirect." [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/>.
- [32] "SpringerLink." [Online]. Available: <https://link.springer.com/>.
- [33] "Rayyan." [Online]. Available: <https://www.rayyan.ai/>.
- [34] "VosViewer." [Online]. Available: <https://www.vosviewer.com/>.
- [35] Elsevier, "Mendeley.," s.d. <https://www.elsevier.com/solutions/mendeley>

- (acedido a 7 de outubro de 2021).
- [36] L. Lombardi, L. Tribioli, R. Cozzolino, and G. Bella, "Comparative environmental assessment of conventional, electric, hybrid, and fuel cell powertrains based on LCA," *Int. J. Life Cycle Assess.*, vol. 22, no. 12, pp. 1989–2006, 2017, doi: 10.1007/s11367-017-1294-y.
- [37] I. Bartolozzi, F. Rizzi, and M. Frey, "Comparison between hydrogen and electric vehicles by life cycle assessment: A case study in Tuscany, Italy," *Appl. Energy*, vol. 101, pp. 103–111, 2013, doi: 10.1016/j.apenergy.2012.03.021.
- [38] D. C. Rosenfeld, J. Lindorfer, and K. Fazeni-Fraisl, "Comparison of advanced fuels—Which technology can win from the life cycle perspective?," *J. Clean. Prod.*, vol. 238, p. 117879, 2019, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.117879.
- [39] S. Xiong, J. Ji, and X. Ma, "Comparative life cycle energy and GHG emission analysis for BEVs and PHEVs: A case study in China," *Energies*, vol. 12, no. 5, pp. 1–17, 2019, doi: 10.3390/en12050834.
- [40] Z. Yang, B. Wang, and K. Jiao, "Life cycle assessment of fuel cell, electric and internal combustion engine vehicles under different fuel scenarios and driving mileages in China," *Energy*, vol. 198, p. 117365, 2020, doi: 10.1016/j.energy.2020.117365.
- [41] B. Marmiroli, M. Venditti, G. Dotelli, and E. Spessa, "The transport of goods in the urban environment: A comparative life cycle assessment of electric, compressed natural gas and diesel light-duty vehicles," *Appl. Energy*, vol. 260, no. October 2019, p. 114236, 2020, doi: 10.1016/j.apenergy.2019.114236.
- [42] N. C. Onat, M. Kucukvar, and O. Tatari, "Conventional, hybrid, plug-in hybrid or electric vehicles? State-based comparative carbon and energy footprint analysis in the United States," *Appl. Energy*, vol. 150, pp. 36–49, 2015, doi: 10.1016/j.apenergy.2015.04.001.
- [43] A. Mayyas, M. Omar, M. Hayajneh, and A. R. Mayyas, "Vehicle's lightweight design vs. electrification from life cycle assessment perspective," *J. Clean. Prod.*, vol. 167, pp. 687–701, 2017, doi: 10.1016/j.jclepro.2017.08.145.
- [44] E. Tempelman, "Multi-parametric study of the effect of materials substitution on life cycle energy use and waste generation of passenger car structures," *Transp. Res. Part D Transp. Environ.*, vol. 16, no. 7, pp. 479–485, 2011, doi: 10.1016/j.trd.2011.05.007.
- [45] F. E. K. Sato and T. Nakata, "Analysis of the impact of vehicle lightweighting on recycling benefits considering life cycle energy reductions," *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 164, no. June 2020, p. 105118, 2021, doi: 10.1016/j.resconrec.2020.105118.
- [46] A. T. Mayyas, A. Qattawi, A. R. Mayyas, and M. A. Omar, "Life cycle assessment-based selection for a sustainable lightweight body-in-white design," *Energy*, vol. 39, no. 1, pp. 412–425, 2012, doi: 10.1016/j.energy.2011.12.033.
- [47] T. Ghosh, H. C. Kim, R. De Kleine, T. J. Wallington, and B. R. Bakshi, "Life cycle energy and greenhouse gas emissions implications of using carbon fiber reinforced polymers in automotive components: Front subframe case study," *Sustain. Mater. Technol.*, vol. 28, p. e00263, 2021, doi: 10.1016/j.susmat.2021.e00263.
- [48] D. He, V. K. Soo, H. C. Kim, P. Compston, and M. Doolan, "Comparative life cycle energy analysis of carbon fibre pre-processing, processing and post-processing recycling methods," *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 158, no. January, 2020, doi: 10.1016/j.resconrec.2020.104794.
- [49] M. Delogu, L. Zanchi, C. A. Dattilo, and M. Pierini, "Innovative composites and hybrid materials for electric vehicles lightweight design in a sustainability

- perspective," *Mater. Today Commun.*, vol. 13, no. September, pp. 192–209, 2017, doi: 10.1016/j.mtcomm.2017.09.012.
- [50] X. Sun, J. Liu, B. Lu, P. Zhang, and M. Zhao, "Life cycle assessment-based selection of a sustainable lightweight automotive engine hood design," *Int. J. Life Cycle Assess.*, vol. 22, no. 9, pp. 1373–1383, 2017, [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1254-y>.
- [51] S. Poulidikou, C. Schneider, A. Björklund, S. Kazemahvazi, P. Wennhage, and D. Zenkert, "A material selection approach to evaluate material substitution for minimizing the life cycle environmental impact of vehicles," *Mater. Des.*, vol. 83, pp. 704–712, 2015, doi: 10.1016/j.matdes.2015.06.079.
- [52] K. Jhaveri, G. M. Lewis, J. L. Sullivan, and G. A. Keoleian, "Life cycle assessment of thin-wall ductile cast iron for automotive lightweighting applications," *Sustain. Mater. Technol.*, vol. 15, no. September 2017, pp. 1–8, 2018, doi: 10.1016/j.susmat.2018.01.002.
- [53] D. He, V. K. Soo, H. C. Kim, and M. Doolan, "Life Cycle Primary Energy Demand and Greenhouse Gas Emission benefits of vehicle lightweighting with recycled carbon fibre," *Procedia CIRP*, vol. 98, pp. 43–48, 2021, doi: 10.1016/j.procir.2021.01.003.
- [54] M. Raugei, D. Morrey, A. Hutchinson, and P. Winfield, "A coherent life cycle assessment of a range of lightweighting strategies for compact vehicles," *J. Clean. Prod.*, vol. 108, pp. 1168–1176, 2015, doi: 10.1016/j.jclepro.2015.05.100.
- [55] P. Puri, P. Compston, and V. Pantano, "Life cycle assessment of Australian automotive door skins," *Int. J. Life Cycle Assess.*, vol. 14, no. 5, pp. 420–428, 2009, [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s11367-009-0103-7>.
- [56] S. Das, "Life cycle assessment of carbon fiber-reinforced polymer composites," *Int. J. Life Cycle Assess.*, vol. 16, no. 3, pp. 268–282, 2011, doi: 10.1007/s11367-011-0264-z.
- [57] C. Koffler and M. Zahller, "Life Cycle Assessment of Polymers in an Automotive Bolster," *PE Int.*, 2012.
- [58] Cascade Collision Repair, "Understanding the Average Lifespan of a Car," 2020. <https://cascadecollision.com/blog/what-is-the-average-life-of-a-car/> (acedido a 7 de novembro de 2021).
- [59] Statista, "Share of energy from renewable sources in electricity generation in Italy from 2007 to 2018," *Energy Environ. - Energy*, 2020.
- [60] Q. Qiao, F. Zhao, Z. Liu, S. Jiang, and H. Hao, "Cradle-to-gate greenhouse gas emissions of battery electric and internal combustion engine vehicles in China," *Appl. Energy*, vol. 204, pp. 1399–1411, 2017, [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261917305433>.
- [61] M. Messagie, D. M. Baumann, and M. S. D. Wehner, "How to understand and perform Life Cycle Assessment of electric vehicles," *Veh. Power Propuls. Conf.*, 2014.
- [62] Statista, "Share of energy from renewable sources in electricity generation in Portugal from 2007 to 2018," *Energy Environ. - Energy*, 2020.
- [63] Statista, "Share of renewable energy in the generation of electricity in the European Union (EU-28) from 2012 to 2018," *Energy Environ. - Energy*, 2020.
- [64] ACAP, "Estatísticas do Sector Automóvel," 2019.
- [65] IAPMEI, "Fabricação de veículos automóveis, reboques, semirreboques e componentes para veículos automóveis," 2017. <https://www.iapmei.pt/PRODUTOS-E-SERVICOS/Industria-e-Sustentabilidade/Informacao->

Setorial/DOCS_InfSetorial/Ficha_SetorAutomovel.aspx (acedido a 6 de novembro de 2021).

NORMAS

NP EN ISO 14044:2010 – Gestão Ambiental – Avaliação de Ciclo de Vida – Princípios e Estrutura.

NP EN ISO 14040:2008 - Gestão Ambiental – Avaliação de Ciclo de Vida – Requisitos e Linhas de Orientação.

LEGISLAÇÃO

CE, "Regulamento (UE) 2019/631 do Parlamento Europeu e do Conselho de 17 de abril de 2019 que estabelece normas de desempenho em matéria de emissões de CO₂ dos automóveis novos de passageiros e dos veículos comerciais ligeiros novos". 2019.

CE, "Diretiva (UE) 2018/ 2001 do Parlamento Europeu e do Conselho - de 11 de dezembro de 2018 - relativa à promoção da utilização de energia de fontes renováveis," 2018.

CE, "Diretiva (UE) 2000/53 do Parlamento Europeu e do Conselho de 18 de setembro de 2000 relativa aos veículos em fim de vida," 2000

República Portuguesa – Ambiente e Transição Energética, "Plano Nacional Energia-Clima 2030 – Portugal, 7 de maio de 2019," 2019

ANEXOS

ANEXO A

ANEXO B

ANEXO C

ANEXO D

7. ANEXOS

Nos anexos desta dissertação encontram-se os impactes para as três estratégias em avaliação: seleção do sistema de propulsão; aplicação de materiais leves e cenários de FdV. Para cada estratégia foram esclarecidos os impactes fornecidos por cada artigo científico, assim como a sua normalização para os 200 000 km. Adicionalmente são também apresentadas as características relevantes de cada estudo analisado.

Para o caso das estratégias relativas ao sistema de propulsão e materiais leves foram ainda apresentados os valores numéricos dos impactes para a análise de sensibilidade, impactes estes normalizados para os 0 km, em intervalos de 50 000 km, até atingir os 300 000 km.

Por fim, está anexado o *extended abstract* do trabalho apresentado na conferência ICEER 2021.

ANEXO A. SISTEMA DE PROPULSÃO

Na Tabela A.1 e A.2 encontram-se as tabelas com os impactes quantificados para o CPE e PAG, respetivamente, para a estratégia de seleção do sistema de propulsão.

Tabela A.1. Impactes do CPE quantificado para a estratégia de Sistema de Propulsão para cada artigo analisado e para cada distância dos 0 km
aos 300 000 km de 50 000 km em 50 000 km

Table with columns: Artigo, Sistema de Propulsão, Distância total percorrida (km), Consumo (Combustível, Eletricidade), Capacidade da Bateria (kWh), FdV, Peso do Veículo (kg), Alternativas, Impactes, CPE (Utilização 0 km, 50 000 km, 100 000 km, 150 000 km, 200 000 km, 250 000 km, 300 000 km), Normalização, and Equação da Retas (Impactos totais em função das diferentes distâncias). Rows include authors like Lombardi et al. (2017), Bartolozzi et al. (2012), SUV - Rosenfeld et al. (2019), Compact - Rosenfeld et al. (2019), Xiong et al. (2019), Yang et al. (2020), Marmiroli et al. (2019), Onat et al. (2015), and Maygas et al. (2017).

Tabela A.2. Impactes do PAG quantificado para a estratégia de Sistema de Propulsão para cada artigo analisado e para cada distância nos 300 000 km de 50 000 km em 50 000 km

Table with columns for Artigo, Sistema de Propulsão, Distância total percorrida (km), Consumo (Combustível, Eficiência), Capacidade da Bateria (kWh), FdV, Peso do Veículo (kg), Alternativas, Impactes (Produção, Utilização, FdV, Total, DBA) for Original, 100 000 km, 50 000 km, 200 000 km, and 300 000 km. Includes sub-headers for Normalização and Equação da Reta.

ANEXO B. MATERIAIS LEVES

Na Tabela B.1 e B.2 encontram-se quantificados os impactes para o CPE e PAG, respetivamente, para a estratégia de aplicação de materiais leves. Já na Tabela B.3 e B.4 estão os impactes quantificados por kg de material, para o CPE e PAG, também, respetivamente.

Tabela B.1. Impactes do CPE quantificado para a estratégia de Materiais Leves para cada artigo analisado e para cada distância dos 0 km aos 300 000 km de 50 000 km em 50 000 km

Artigo	Caso de Estudo	Distância Total Percorrida (km)	Alternativas Materiais	FdV	Peso (kg)		CPE (g)																								Equação da Retas (Impactos totais em função das diferentes distâncias)	
					Componente	Veículo	Original				Normalização				0 km		50 000 km		100 000 km		150 000 km		200 000 km		250 000 km		300 000 km					
							Produção	Manufatura	Utilização	FdV	Total	Produção	Manufatura	Utilização	FdV	Total	Utilização	Total	Utilização	Total	Utilização	Total	Utilização	Total	Utilização	Total	Utilização	Total				
Tempelman (2011)	BIW	225 000	Aço (206 kg) e HSS (169 kg)	Reciclagem/Recuperação	375,0	1250	10,94	0,84	548,00	-	559,80	10,94	0,84	164,4	-	176,18	0,00	11,78	36,53	48,31	73,06666667	84,85	109,6	121,38	146,13333333	157,91	182,66666667	194,45	219,2	230,98	y = 36,533x + 48,313	
		225 000	HSS (70%), Al (20%) e GFRP (10%)	Recuperação Energética	304,0	1144	17,51	0,99	520,10	-0,12	538,50	17,51	0,99	138,2083916	-0,12	156,59	0,00	18,38	30,71	49,09	61,42595183	79,81	92,13892774	110,52	122,8519037	141,23	153,5648796	171,94	184,2778555	202,66	y = 30,713x + 49,093	
		225 000	Al	Reciclagem/Recuperação	268,0	1090	34,88	0,75	506,00	-	541,60	34,88	0,75	124,4110092	-	160,04	0,00	35,63	27,65	63,28	55,29378186	90,92	82,94067278	118,57	110,5875637	146,22	138,2344546	173,86	165,8813456	201,51	y = 27,647x + 63,277	
		225 000	CFRP	Disposição/Recuperação Energética	179,0	956	29,24	0,66	470,70	-1,97	506,40	29,24	0,66	88,133159	-1,97	116,06	0,00	27,93	19,59	47,52	39,17029289	67,10	58,75543933	86,69	78,34058577	106,27	97,92573222	125,86	117,5108787	145,44	y = 19,585x + 47,515	
Sato and Nakata (2020)	BIW	100 000	Aço (328 kg) e HSS (107,9 kg)	Reciclagem Convencional (379 kg reciclagem; 57 kg reutilização de partes)	435,9	1481	160,00		241,00	-77,00	324,00	47,09		70,93	-22,66	95,36	0,00	24,43	35,47	59,90	70,93	95,36	106,40	130,83	141,87	166,30	177,33	201,76	212,80	237,23	y = 35,467x + 59,896	
		Reutilização de partes		435,9	1481	160,00		241,00	-89,62	311,38	47,09		70,93	-26,38	91,65	0,00	20,71	35,47	56,18	70,93	91,65	106,40	127,11	141,87	162,58	177,33	198,05	212,80	233,51	y = 35,467x + 56,181		
		Reciclagem		435,9	1481	160,00		241,00	-73,95	327,05	47,09		70,93	-21,77	96,26	0,00	25,33	35,47	60,79	70,93	96,26	106,40	131,73	141,87	167,19	177,33	202,66	212,80	238,13	y = 35,467x + 60,793		
		Recuperação Energética		435,9	1481	160,00		241,00	-71,27	329,73	47,09		70,93	-20,98	97,05	0,00	26,12	35,47	61,58	70,93	97,05	106,40	132,52	141,87	167,98	177,33	203,45	212,80	238,91	y = 35,467x + 61,582		
		100 000	Al	Reciclagem Convencional	271,5	1045	199,00		235,00	-120,00	314,00	51,70		61,06	-31,18	81,58	0,00	20,52	30,53	51,05	61,06	81,58	91,58	112,11	122,11	142,63	152,64	173,16	183,17	203,69	y = 30,528x + 51,052	
		Reutilização de partes		271,5	1045	199,00		235,00	-129,05	304,95	51,70		61,06	-33,53	79,23	0,00	18,17	30,53	48,70	61,06	79,23	91,58	109,76	122,11	140,28	152,64	170,81	183,17	204,34	y = 30,528x + 48,701		
		Reciclagem		271,5	1045	199,00		235,00	-117,83	316,17	51,70		61,06	-30,61	82,14	0,00	21,09	30,53	51,62	61,06	82,14	91,58	112,67	122,11	143,20	152,64	173,73	183,17	204,25	y = 30,528x + 51,616		
		Recuperação Energética		271,5	1045	199,00		235,00	-71,21	362,79	51,70		61,06	-18,50	94,26	0,00	32,20	30,53	63,73	61,06	94,26	91,58	124,78	122,11	155,31	152,64	185,84	183,17	216,37	y = 30,528x + 63,728		
		100 000	AHSS	Reciclagem Convencional	342,1	1387	156,00		238,00	-76,00	318,00	38,48		58,70	-18,75	78,43	0,00	19,73	29,35	49,08	58,70	78,43	88,05	107,78	117,40	137,14	146,76	166,49	176,11	195,84	y = 29,351x + 49,083	
		Reutilização de partes		342,1	1387	156,00		238,00	-86,33	307,67	38,48		58,70	-21,29	75,89	0,00	17,18	29,35	46,53	58,70	75,89	88,05	105,24	117,40	134,59	146,76	163,94	176,11	193,29	y = 29,351x + 46,535		
		Reciclagem		342,1	1387	156,00		238,00	-73,95	320,05	38,48		58,70	-18,24	78,94	0,00	20,24	29,35	49,59	58,70	78,94	88,05	108,29	117,40	137,64	146,76	166,99	176,11	196,34	y = 29,351x + 49,588		
		Recuperação Energética		342,1	1387	156,00		238,00	-71,82	322,18	38,48		58,70	-17,71	79,46	0,00	20,76	29,35	50,11	58,70	79,46	88,05	108,82	117,40	138,17	146,76	167,52	176,11	196,87	y = 29,351x + 50,114		
		100 000	CFRP	Reciclagem Convencional	217,1	1262	206,00		233,00	-117,00	322,00	35,44		40,08	-20,13	55,39	0,00	15,31	20,04	35,35	40,08	55,39	60,12	75,43	80,17	95,48	100,21	115,52	120,25	135,56	y = 20,041x + 35,352	
		Reutilização de partes		217,1	1262	206,00		233,00	-136,26	302,74	35,44		40,08	-23,44	52,08	0,00	12,00	20,04	32,04	40,08	52,08	60,12	72,12	80,17	92,16	100,21	112,20	120,25	132,25	y = 20,041x + 32,039		
		Reciclagem		217,1	1262	206,00		233,00	-113,72	325,28	35,44		40,08	-19,56	55,96	0,00	15,87	20,04	35,92	40,08	55,96	60,12	76,00	80,17	96,04	100,21	116,08	120,25	136,12	y = 20,041x + 35,916		
		Recuperação Energética		217,1	1262	206,00		233,00	-75,61	363,39	35,44		40,08	-13,01	62,51	0,00	22,43	20,04	42,47	40,08	62,51	60,12	82,55	80,17	102,60	100,21	122,64	120,25	142,68	y = 20,041x + 42,472		
100 000	Al (271 kg), AHSS (4 kg) e CFRP (4 kg)	Reciclagem Convencional	279,0	1324	198,00		235,00	-119,00	314,00	41,72		49,52	-25,08	66,17	0,00	16,65	24,76	41,41	49,52	66,17	74,28	90,93	99,04	115,69	123,80	140,45	148,56	165,21	y = 24,76x + 41,407			
Reutilização de partes		279,0	1324	198,00		235,00	-130,26	302,74	41,72		49,52	-27,45	63,79	0,00	14,27	24,76	39,03	49,52	63,79	74,28	88,56	99,04	113,32	123,80	138,08	148,56	162,84	y = 24,76x + 39,035				
Reciclagem		279,0	1324	198,00		235,00	-117,04	315,96	41,72		49,52	-24,66	66,58	0,00	17,06	24,76	41,82	49,52	66,58	74,28	91,34	99,04	116,10	123,80	140,86	148,56	165,62	y = 24,76x + 41,82				
Recuperação Energética		279,0	1324	198,00		235,00	-110,82	322,18	41,72		49,52	-23,35	67,89	0,00	18,37	24,76	43,13	49,52	67,89	74,28	92,65	99,04	117,41	123,80	142,87	148,56	166,93	y = 24,76x + 43,131				
Mayyas et al. (2012)	BIW	321 869	Aço	Reciclagem	270,0	1470	8,64	3,99	247,88	-5,26	255,25	8,64	3,99	45,53	-5,26	52,90	0,00	7,37	7,07	14,44	14,15	21,52	21,22	28,59	28,29	35,66	35,36	42,73	42,44	49,81	y = 7,0726x + 14,443	
		321 869	Aço Inoxidável	Reciclagem	240,0	1440	19,50	3,68	218,29	-11,99	229,48	19,50	3,68	36,38	-11,99	47,57	0,00	11,19	5,65	16,84	11,30	22,49	16,95	28,14	22,61	33,80	28,26	39,45	33,91	45,10	y = 5,6516x + 16,842	
		321 869	AHSS	Reciclagem	203,0	1403	6,50	3,11	184,64	-3,95	190,30	6,50	3,11	26,72	-3,95	32,38	0,00	5,66	4,15	9,81	8,30	13,96	12,45	18,11	16,60	22,26	20,75	26,41	24,90	30,56	y = 4,1501x + 9,8101	
		321 869	Al	Reciclagem	135,0	907	28,01	2,50	112,52	-24,00	119,03	28,01	2,50	16,75	-24,00	23,26	0,00	6,51	2,60	9,11	5,20	11,71	7,80	14,31	10,41	16,92	13,01	19,52	15,61	22,12	y = 2,6016x + 9,1116	
		321 869	Mg	Reciclagem	100,0	875	35,05	1,95	82,76	-31,13	88,63	35,05	1,95	9,46	-31,13	15,33	0,00	5,87	1,47	7,34	2,94	8,81	4,41	10,28	5,88	11,75	7,35	13,22	8,82	14,69	y = 1,4693x + 7,3393	
		321 869	HSCF + HSGF	Reciclagem	123,0	1021	33,52	1,46	104,98	0,00	139,96	33,52	1,46	12,65	0,00	47,63	0,00	34,98	1,96	36,94	3,93	38,91	5,89	40,87	7,86	42,84	9,82	44,80	11,79	46,77	y = 1,9646x + 36,945	
		Ghosh et al. (2021)	Subestrutura Frontal	257 495	HSS	Cut-off Approach	Reciclagem	26,3	-	1,00	0,00	10,25	0,00	11,30	1,00	0,00	10,25	0,00	11,30	0,00	1,00	1,99	2,99	3,98	4,98	5,97	6,97	7,96	8,96	9,95	10,95	11,94
CFRP com adaptação ao sistema de propulsão	18,9			-			5,00	0,05	7,10	0,00	12,10	5,00	0,05	7,10	0,00	12,10	0,00	5,05	1,38	6,43	2,76	7,81	4,14	9,19	5,51	10,56	6,89	11,94	8,27	13,32	y = 1,3787x + 6,4287	
257 495	CFRP sem adaptação ao sistema de propulsão			Cut-off Approach	Reciclagem	18,9	-	5,00	0,05	8,16	0,00	13,20	5,00	0,05	8,16	0,00	13,20	0,00	5,05	1,58	6,63	3,17	8,22	4,75	9,80	6,34	11,39	7,92	12,97	9,51	14,56	y = 1,5845x + 6,6345
CFRP com adaptação ao sistema de propulsão					26,3	-	1,00	0,00	10,19	0,00	11,20	1,00	0,00	10,19	0,00	11,20	0,00	1,00	1,98	2,98	3,96	4,96	5,94	6,94	7,91	8,91	9,89	10,89	11,87	12,87	y = 1,9787x + 2,9787	
257 495	HSS			Cut-off Approach	Reciclagem	18,9	-	4,92	0,03	5,44	0																					

Tabela B.2. Impactes do PAG quantificado para a estratégia de Materiais Leves para cada artigo analisado e para cada distância dos 0 km aos 300 000 km de 50 000 km em 50 000 km

Artigo	Caso de Estudo	Distância Total Percorrida (km)	Alternativas Materiais	FdV	Peso (kg)		PAG (kg CO ₂ -eq)																					Equação da Reta (Valores totais para diferentes distâncias)																		
							Original					Normalização																																		
							Componente	Veículo	Produção	Manufatura	Utilização	FdV	Total	Componente				0 km				50 000 km				100 000 km				150 000 km				200 000 km				250 000 km				300 000 km				
														Produção	Manufatura	Utilização	FdV	Total	Utilização	Total	Utilização	Total	Utilização	Total	Utilização	Total	Utilização		Total	Utilização	Total	Utilização	Total	Utilização	Total	Utilização	Total	Utilização	Total	Utilização	Total					
Mayyas et al. (2012)	BiW	321 869	Aço	Reciclagem	270,0	1470	671,0	708,21	91301,70	-416,07	92264,79	670,95	708,21	16769,70	-416,07	17732,79	0,00	963,09	2605,05	3568,14	5210,10	6173,19	7815,16	8778,25	10420,21	11383,30	13025,26	13988,35	15630,31	16593,40	$y = 2605,1x + 3568,1$															
		321 869	Aço Inoxidável		240,0	1440	1225,2	890,40	88606,08	-1102,80	89618,88	1225,20	890,40	14767,68	-1102,80	15780,48	0,00	1012,80	2294,05	3306,85	4588,11	5600,91	6882,16	7894,96	9176,21	10189,01	11470,26	12483,06	13764,32	14777,12	$y = 2294,1x + 3306,9$															
		321 869	AHSS		203,0	1403	504,5	504,5	733,44	86329,40	-312,82	87254,47	504,46	733,44	12491,00	-312,82	13416,07	0,00	925,07	1940,39	2865,46	3880,77	4805,84	5821,16	6746,23	7761,55	8686,62	9701,93	10627,00	11642,32	12567,39	$y = 1940,4x + 2865,5$														
		321 869	Al		135,0	907	1620,0	688,64	51146,64	-1392,66	52062,61	1620,00	688,64	7612,79	-1392,66	8528,76	0,00	915,98	1182,59	2098,57	2365,18	3281,16	3547,77	4463,75	4730,37	5646,34	5912,96	6828,93	7095,55	8011,52	$y = 1182,6x + 2098,6$															
		321 869	Mg		100,0	875	2210,0	685,00	48988,63	-1967,00	49916,63	2210,00	685,00	5598,70	-1967,00	6526,70	0,00	928,00	869,72	1797,72	1739,44	2667,44	2609,15	3537,15	3478,87	4406,87	4348,59	5276,59	5218,31	6146,31	$y = 869,72x + 1797,7$															
		321 869	HSCF + HSGF		123,0	1021	2121,8	191,27	58954,58	0,00	61267,60	2121,75	191,27	7102,27	0,00	9415,28	0,00	2313,02	1103,29	3416,30	2206,57	4519,59	3309,86	5622,87	4413,14	6726,16	5516,43	7829,44	6619,72	8932,73	$y = 1103,3x + 3416,3$															
Ghosh et al. (2021)	Subestrutura Frontal	257 495	HSS	Cut-off Approach	26,3	-	1,00	0,00	10,25	0,00	11,30	87,25	0,00	748,29	0,00	835,54	0,00	87,25	145,30	232,55	290,60	377,85	435,91	523,16	581,21	668,46	726,51	813,76	871,81	959,06	$y = 145,3x + 232,55$															
		257 495	CFRP com adaptação ao sistema de propulsão		18,9	-	5,00	0,05	7,10	0,00	12,10	313,11	10,00	516,36	0,00	839,47	0,00	323,11	100,27	423,38	200,53	523,64	300,80	623,91	401,06	724,17	501,33	824,44	601,60	924,71	$y = 100,27x + 423,38$															
		257 495	CFRP sem adaptação ao sistema de propulsão		18,9	-	5,00	0,05	8,16	0,00	13,20	314,11	10,00	588,51	0,00	911,62	0,00	324,11	114,28	438,39	228,55	552,66	342,83	666,94	457,10	781,21	571,38	895,49	685,66	1009,77	$y = 114,28x + 438,39$															
		257 495	HSS		26,3	-	1,00	0,00	10,19	0,00	11,20	82,94	0,00	750,45	0,00	833,39	0,00	82,94	145,72	228,66	291,44	374,38	437,16	520,10	582,89	665,83	728,61	811,55	874,33	957,27	$y = 145,72x + 228,66$															
		257 495	CFRP com adaptação ao sistema de propulsão		18,9	-	4,92	0,03	5,44	0,00	10,40	313,11	5,00	400,00	0,00	718,11	0,00	318,11	77,67	395,78	155,34	473,45	233,01	551,12	310,69	628,80	388,36	706,47	466,03	784,14	$y = 77,67x + 395,78$															
		257 495	CFRP sem adaptação ao sistema de propulsão		18,9	-	4,92	0,03	7,00	0,00	12,00	313,11	5,00	520,29	0,00	838,40	0,00	318,11	101,03	419,14	202,06	520,17	303,09	621,20	404,12	722,23	505,15	823,26	606,17	924,28	$y = 101,03x + 419,14$															
Poulidou et al. (2015)	Painel do Tejadilho	1 000 000	Aço	Reciclagem	108,4	40 000	3,02	1,25	38,84	-2,49	40,62	186,45	103,55	3400,00	-190,00	3500,00	0,00	100,00	170,00	270,00	340,00	440,00	510,00	610,00	680,00	780,00	850,00	950,00	1020,00	1120,00	$y = 170x + 270$															
		1 000 000	Alumínio	Reciclagem	64,3	39 956	12,47	1,20	22,71	-11,71	24,67	784,46	295,54	2020,00	-910,00	2190,00	0,00	170,00	101,00	271,00	202,00	372,00	303,00	473,00	404,00	574,00	505,00	675,00	606,00	776,00	$y = 101x + 271$															
		1 000 000	C/VE	Incineração	40,0	39 932	11,28	2,55	14,38	-2,00	26,21	548,00	332,00	1250,00	80,00	2210,00	0,00	960,00	62,50	1022,50	125,00	1085,00	187,50	1147,50	250,00	1210,00	312,50	1272,50	375,00	1335,00	$y = 62,5x + 1022,5$															
		1 000 000	G/VE	Incineração	74,3	39 966	5,27	8,17	23,23	0,00	36,67	282,34	247,66	2030,00	190,00	2750,00	0,00	720,00	101,50	821,50	203,00	923,00	304,50	1024,50	406,00	1126,00	507,50	1227,50	609,00	1329,00	$y = 101,5x + 821,5$															
		1 000 000	PET	Reciclagem	133,9	40 026	10,50	4,59	48,06	-9,77	53,38	361,53	348,47	4180,00	-410,00	4480,00	0,00	300,00	209,00	509,00	418,00	718,00	627,00	927,00	836,00	1136,00	1045,00	1345,00	1254,00	1554,00	$y = 209x + 509$															
		1 000 000	SrPET	Reciclagem	85,1	39 977	9,70	3,97	13,67	-6,21	21,13	382,95	327,05	2660,00	-270,00	3100,00	0,00	440,00	133,00	573,00	266,00	706,00	399,00	899,00	532,00	972,00	665,00	1105,00	798,00	1238,00	$y = 133x + 573$															
		223 945	Al (60% Al secundário)	Cut-off Approach	0,773	-	2,75	0,3865	18,94	-	22,08	2,7519	0,3865	18,9400	-	22,0784	0,00	3,14	4,23	7,37	8,46	11,60	12,69	15,82	16,91	20,05	21,14	24,28	25,37	28,51	$y = 4,2287x + 7,3671$															
223 945	rCF+PA66 (40wt% rCF)	0,453	-		2,53	0,2265	12,63	-	15,38	2,7361	0,2265	12,6300	-	16,6671	0,00	2,96	2,82	5,78	5,64	8,60	8,46	11,42	11,28	14,24	14,10	17,06	16,92	19,88	$y = 2,8199x + 6,857$																	
223 945	rCF+PA66 (20wt% rCF)	0,664	-		4,01	0,3320	13,97	-	18,31	3,7051	0,3320	13,9700	-	16,9326	0,00	4,04	3,12	7,16	6,24	10,28	9,36	13,39	12,48	16,51	15,60	19,63	18,71	22,75	$y = 3,1191x + 6,0817$																	
223 945	rCF+PA66 (60wt% rCF)	0,310	-		1,59	0,1550	11,80	-	13,54	1,5872	0,1550	11,8000	-	13,5422	0,00	1,74	2,63	4,38	5,27	7,01	7,90	9,65	10,54	12,28	13,17	14,92	15,81	17,55	$y = 2,6346x + 4,3768$																	
363 494	Al (85% Al secundário)	0,773	-		1,50	0,5411	29,45	-	31,49	1,5035	0,5411	29,4500	-	31,4946	0,00	2,04	4,05	6,10	8,10	10,15	12,15	14,20	16,20	18,25	20,25	22,30	24,31	26,35	$y = 4,051x + 6,0955$																	
363 494	rCF+PA66 (40wt% rCF)	0,453	-		2,94	0,3171	19,54	-	22,80	3,2163	0,3171	19,5400	-	24,3208	0,00	3,53	2,69	6,22	5,38	8,91	8,06	11,60	10,75	14,28	13,44	16,97	16,13	19,66	$y = 2,6878x + 7,4686$																	
363 494	rCF+PA66 (20wt% rCF)	0,664	-		4,71	0,4648	21,71	-	26,89	4,3160	0,4648	21,7100	-	25,2434	0,00	4,78	2,99	7,77	5,97	10,75	8,96	13,74	11,95	16,73	14,93	19,71	17,92	22,70	$y = 2,9863x + 6,5197$																	
363 494	rCF+PA66 (60wt% rCF)	0,31	-		1,83	0,2170	19,23	-	21,28	1,8290	0,2170	19,2300	-	21,2760	0,00	2,05	2,65	4,69	5,29	7,34	7,94	9,98	10,58	12,63	13,23	15,27	15,87	17,92	$y = 2,6452x + 4,6912$																	
Jhaveri et al. (2018)	ICEV de médio porte	257 495	CCI		Cut-off Approach	141,0	1369	3,98		30,60	0,03	34,61	300		2220	5	2525	0,00	305,00	431,08	736,08	862,15	1167,15	1293,23	1598,23	1724,31	2029,31	2155,38	2460,38	2586,46	2891,46	$y = 431,08x + 736,08$														
		257 495	TWDCI			126,9	1355	4,31		27,50	0,03	31,84	330		2000	5	2335	0,00	335,00	388,36	723,36	776,71	1111,71	1165,07	1500,07	1553,43	1888,43	1941,79	2276,79	2330,14	2665,14	$y = 388,36x + 723,36$														
		257 495	CAI	77,6		1306	5,65		16,80	0,02	22,47	350		1220	3	1573	0,00	353,00	236,90	589,90	473,80	826,80	710,69	1063,69	947,59	1300,59	1184,49	1537,49	1421,39	1774,39	$y = 236,9x + 589,9$															
Delogu et al. (2017)	Módulo frontal	150 000	Referência (5,71 kg Al; 28,35 kg aço; 3,07 kg HSS)	Atual	37,1	-	1,38	0,00	5,08	-0,65	5,81	118,00	0,00	224,00	-46,00	296,00	0,00	72,00	74,67	146,67	149,33	221,33	224,00	296,00	298,67	370,67	373,33	445,33	448,00	520,00	$y = 74,667x + 146,67$															
		Futuro		37,1	-	1,38	0,00	5,08	-0,90	5,56	118,00	0,00	224,00	-58,90	283,10	0,00	59,10	74,67	133,77	149,33	208,43	224,00	283,10	298,67	357,77	373,33	432,43	448,00	507,10	$y = 74,667x + 133,77$																
		150 000		Leve (7,71 kg Al; 2,06 kg aço; 1,93 kg HSS; 7,74 kg CF; 5,16 kg PA410)	Atual	24,6	-	4,82	0,01	3,28	-0,56	7,55	205,00	0,50	145,00	-3,28	347,22	0,00	202,22	48,33	250,55	96,67	298,89	145,00	347,22	193,33	395,55	241,67	443,89	290,00	492,22	$y = 48,333x$														

Tabela B.3. Impactes do CPE quantificado para a estratégia de Materiais Leves para cada artigo analisado por kg de material

Artigo	Caso de Estudo	Alternativas Materiais	FdV	Peso (kg)		CPE (GJ)				CPE (MJ/kg)			
				Componente	Veículo	Original				Normalização			
						Produção	Manufatura	FdV	Total	Produção	Manufatura	FdV	Total
Tempelman (2011)	BiW	Aço (206 kg) e HSS (169 kg)	Reciclagem/Recuperação	375,0	1250	10,94	0,84	-	11,78	29,17	2,24	-	31,41
		HSS (70%), Al (20%) e GFRP (10%)	Recuperação Energética	304,0	1144	17,51	0,99	-0,12	18,38	57,60	3,26	-0,39	60,46
		Al	Reciclagem/Recuperação	268,0	1090	34,88	0,75	-	35,63	130,15	2,80	-	132,95
		CFRP	Disposição/Recuperação Energética	179,0	956	29,24	0,66	-1,97	27,93	163,35	3,69	-11,01	156,03
Sato and Nakata (2020)	BiW	Aço (328 kg) e HSS (107,9 kg)	Reciclagem Convencional (379 kg reciclagem; 57 kg reutilização de partes)	435,9	1481	160,00		-77,00	83,00	108,04		-51,99	56,04
			Reutilização de partes	435,9	1481	160,00		-89,62	70,38	108,04		-60,51	47,52
			Reciclagem	435,9	1481	160,00		-73,95	86,05	108,04		-49,93	58,10
			Recuperação Energética	435,9	1481	160,00		-71,27	88,73	108,04		-48,12	59,91
		Al	Reciclagem Convencional	271,5	1045	199,00		-120,00	79,00	190,43		-114,83	75,60
			Reutilização de partes	271,5	1045	199,00		-129,05	69,95	190,43		-123,49	66,94
			Reciclagem	271,5	1045	199,00		-117,83	81,17	190,43		-112,76	77,67
			Recuperação Energética	271,5	1045	199,00		-71,21	127,79	190,43		-68,14	122,29
		AHSS	Reciclagem Convencional	342,1	1387	156,00		-76,00	80,00	112,47		-54,79	57,68
			Reutilização de partes	342,1	1387	156,00		-86,33	69,67	112,47		-62,24	50,23
			Reciclagem	342,1	1387	156,00		-73,95	82,05	112,47		-53,32	59,16
			Recuperação Energética	342,1	1387	156,00		-71,82	84,18	112,47		-51,78	60,69
		CFRP	Reciclagem Convencional	217,1	1262	206,00		-117,00	89,00	163,23		-92,71	70,52
			Reutilização de partes	217,1	1262	206,00		-136,26	69,74	163,23		-107,97	55,26
			Reciclagem	217,1	1262	206,00		-113,72	92,28	163,23		-90,11	73,12
			Recuperação Energética	217,1	1262	206,00		-75,61	130,39	163,23		-59,91	103,32
		Al (271 kg), AHSS(4 kg) e CFRP (4 kg)	Reciclagem Convencional	279,0	1324	198,00		-119,00	79,00	149,55		-89,88	59,67
			Reutilização de partes	279,0	1324	198,00		-130,26	67,74	149,55		-98,38	51,16
			Reciclagem	279,0	1324	198,00		-117,04	80,96	149,55		-88,40	61,15
			Recuperação Energética	279,0	1324	198,00		-110,82	87,18	149,55		-83,70	65,85
Mayyas et al. (2012)	BiW	Aço	Reciclagem	270,0	1470	8,64	3,99	-5,26	7,37	32,00	14,78	-19,48	27,30
		Aço Inoxidável	Reciclagem	240,0	1440	19,50	3,68	-11,99	11,19	81,25	15,33	-49,96	46,63
		AHSS	Reciclagem	203,0	1403	6,50	3,11	-3,95	5,66	32,02	15,32	-19,46	27,88
		Al	Reciclagem	135,0	907	28,01	2,50	-24,00	6,51	207,48	18,52	-177,78	48,22
		Mg	Reciclagem	100,0	875	35,05	1,95	-31,13	5,87	350,50	19,50	-311,30	58,70
		HSCF + HSGF	Reciclagem	123,0	1021	33,52	1,46	0,00	34,98	272,52	0,01	0,00	272,53
Ghosh et al. (2021)	Subestrutur a Frontal	Sem reduções secundárias de massa	HSS	26,3	-	1,00	0,00	0,00	1,00	38,02	0,00	0,00	38,02
			CFRP com adaptação ao sistema de propulsão	18,9	-	5,00	0,05	0,00	5,05	264,55	2,65	0,00	267,20
		50% reduções secundárias de massa	CFRP sem adaptação ao sistema de propulsão	18,9	-	5,00	0,05	0,00	5,05	264,55	2,65	0,00	267,20
			HSS	26,3	-	1,00	0,00	0,00	1,00	38,02	0,00	0,00	38,02
			CFRP com adaptação ao sistema de propulsão	18,9	-	4,92	0,03	0,00	4,95	260,32	1,59	0,00	261,90
			CFRP sem adaptação ao sistema de propulsão	18,9	-	4,92	0,03	0,00	4,95	260,32	1,59	0,00	261,90
He et al. (2020)	Painel do Tejadinho	rCFRP	Fragmentação, pirólise, fabricação de papel	11,1	-	2,04	0,65	-	2,69	183,78	58,56	-	242,34
			Triagem, fragmentação, pirólise, fabricação de papel	10,9	-	2,01	0,64	-	2,65	184,40	58,72	-	243,12
			Pirólise	10,0	-	1,40	0,59	-	1,99	140,00	59,00	-	199,00
			Fragmentação, pirólise, realinhamento	10,1	-	2,41	0,59	-	3,00	238,61	58,42	-	297,03
			Fragmentação, solvólise supercrítica de água, fabricação de papel	11,1	-	6,59	0,65	-	7,24	593,69	58,56	-	652,25
			vCFRP	10,8	-	3,71	0,45	-	4,16	343,52	41,67	-	385,19
Poulkidou et al. (2015)	Painel do Tejadinho	rCFRP	Aço	31,9	-	1,43	0,33	-	1,76	44,83	10,34	-	55,17
			Al	16,0	-	2,80	0,16	-	2,96	175,00	10,00	-	185,00
			Aço	108,4	40 000	3,02	1,25	-2,49	1,78	27,90	11,49	-	39,39
			Alumínio	64,3	39 956	12,47	1,20	-11,71	1,96	194,00	18,60	-	212,60
			C/VE	40,0	39 932	11,28	2,55	-2,00	11,83	282,00	63,75	-	345,75
			G/VE	74,3	39 966	5,27	8,17	0,00	13,44	70,90	109,96	-	180,86
He et al. (2021)	Suporte de Retrovisor	rCFRP	PET	133,9	40 026	10,50	4,59	-9,77	5,32	78,40	34,30	-	112,70
			SPET	85,1	39 977	9,70	3,97	-6,21	7,46	114,00	46,63	-	160,63
			Al (60% Al secundário)	0,773	-	0,05	0,01	-	0,06	68,64	13,10	-	81,74
			rCF+PA66 (40wt% rCF)	0,453	-	0,05	0,01	-	0,06	110,62	12,50	-	123,12
			rCF+PA66 (20wt% rCF)	0,664	-	0,09	0,01	-	0,09	130,36	12,50	-	142,86
			rCF+PA66 (60wt% rCF)	0,310	-	0,03	0,00	-	0,03	90,88	12,50	-	103,38
Jhaveri et al. (2018)	ICEV de médio porte	Todas as partes do veículo constituídas por CCI	Al (85% Al secundário)	0,773	-	0,03	0,01	-	0,04	32,37	14,60	-	46,97
			rCF+PA66 (40wt% rCF)	0,453	-	0,05	0,01	-	0,06	119,80	13,20	-	133,00
			rCF+PA66 (20wt% rCF)	0,664	-	0,09	0,01	-	0,10	141,30	13,20	-	154,50
			rCF+PA66 (60wt% rCF)	0,31	-	0,03	0,00	-	0,03	98,30	13,20	-	111,50
			CCI	141,0	1369	3,98		0,03	4,01	28,23		0,23	28,45
			TWDCI	126,9	1355	4,31		0,03	4,34	33,96		0,22	34,18
Delogu et al. (2017)	Módulo frontal	Referência (5,71 kg Al; 28,35 kg aço; 3,07 kg HSS)	Atual	37,1	-	1,38	0,00	-0,65	0,73	37,17	0,00	-17,51	19,66
			Futuro	37,1	-	1,38	0,00	-0,90	0,48	37,17	0,00	-24,24	12,93
			Atual	24,6	-	4,82	0,01	-0,56	4,27	195,93	0,39	-22,76	173,56
			Futuro	24,6	-	4,82	0,01	-1,60	3,23	195,93	0,39	-65,04	131,28
	Capô	Referência (11,54 kg aço)	Atual	11,5	-	0,30	0,00	-0,10	0,20	26,00	0,07	-8,58	17,49
			Futuro	11,5	-	0,30	0,00	-0,10	0,20	26,00	0,07	-8,58	17,49
			Atual	6,7	-	1,95	0,01	-0,31	1,65	292,35	1,11	-46,48	246,99
			Futuro	6,7	-	1,95	0,01	-0,74	1,22	292,35	1,11	-110,94	182,52
	Secção central do piso	Referência (27,2 kg Al; 5,30 kg aço; 3,00 kg plástico)	Atual	35,5	-	11,20	0,00	-1,83	9,37	315,49	0,00	-51,55	263,94
			Futuro	35,5	-	11,20	0,00	-3,04	8,16	315,49	0,00	-85,63	229,86
			Atual	28,1	-	8,30	0,00	-1,03	7,27	295,37	0,00	-36,65	258,72
			Futuro	28,1	-	8,30	0,00	-2,98	5,32	295,37	0,00	-106,05	189,32
Sun et al. (2017)	Capô	Aço	Reciclagem	17,1	1325	0,49		-0,31	0,18	28,72		-18,17	10,55
		AHSS	Reciclagem	13,6	1320	0,86		-0,25	0,61	63,24		-18,38	44,85
		Al	Reciclagem	10,9	1313	2,00		-1,55	0,45	182,98		-141,81	41,17
		CFRP	Pirólise	10,4	1304	14,51		-9,50	5,01	1395,19		-913,46	481,73

Tabela B.4. Impactes do PAG quantificado para a estratégia de Materiais Leves para cada artigo analisado por kg de material

Artigo	Caso de Estudo	Alternativas Materiais		FdV	Peso (kg)		PAG (kg CO ₂ -eq)				PAG (kg CO ₂ -eq/kg)			
					Componente	Veículo	Original				Normalização			
							Produção	Manufatura	FdV	Total	Produção	Manufatura	FdV	Total
Mayyas et al. (2012)	BiW	Aço		Reciclagem	270,0	1470	670,95	708,21	-416,07	92264,79	2,49	2,62	-1,54	3,57
		Aço Inoxidável			240,0	1440	1225,20	890,40	-1102,80	89618,88	5,11	3,71	-4,60	4,22
		AHSS			203,0	1403	504,46	733,44	-312,82	87254,47	2,49	3,61	-1,54	4,56
		Al			135,0	907	1620,00	688,64	-1392,66	52062,61	12,00	5,10	-10,32	6,79
		Mg			100,0	875	2210,00	685,00	-1967,00	49916,63	22,10	6,85	-19,67	9,28
		HSCF + HSGF			123,0	1021	2121,75	191,27	0,00	61267,60	17,25	1,56	0,00	18,81
Ghosh et al. (2021)	Subestrutura Frontal	Sem reduções secundárias de massa	HSS	Cut-off Approach	26,3	-	87,25	0,00	0,00	835,54	3,32	0,00	0,00	3,32
			CFRP com adaptação ao sistema de propulsão		18,9	-	313,11	10,00	0,00	839,47	16,57	0,53	0,00	17,10
			CFRP sem adaptação ao sistema de propulsão		18,9	-	314,11	10,00	0,00	911,62	16,62	0,53	0,00	17,15
		50% reduções secundárias de massa	HSS		26,3	-	82,94	0,00	0,00	833,39	3,15	0,00	0,00	3,15
			CFRP com adaptação ao sistema de propulsão		18,9	-	313,11	5,00	0,00	718,11	16,57	0,26	0,00	16,83
			CFRP sem adaptação ao sistema de propulsão		18,9	-	313,11	5,00	0,00	838,40	16,57	0,26	0,00	16,83
Poulidikou et al. (2015)	Painel do Tejadilho	Aço		Reciclagem	108,4	40 000	186,45	103,55	-190,00	3500,00	1,72	0,96	-1,75	0,92
		Alumínio		Reciclagem	64,3	39 956	784,46	295,54	-910,00	2190,00	12,20	4,60	-14,15	2,64
		C/VE		Incineração	40,0	39 932	548,00	332,00	80,00	2210,00	13,70	8,30	2,00	24,00
		G/VE		Incineração	74,3	39 966	282,34	247,66	190,00	2750,00	3,80	3,33	2,56	9,69
		PET		Reciclagem	133,9	40 026	361,53	348,47	-410,00	4480,00	2,70	2,60	-3,06	2,24
		SrPET		Reciclagem	85,1	39 977	382,95	327,05	-270,00	3100,00	4,50	3,84	-3,17	5,17
He et al. (2021)	Suporte de Retrovisor	rCFRP	Al (60% Al secundário)	Cut-off Approach	0,773	-	2,75	0,39	-	22,08	3,56	0,50	-	4,06
			rCF+PA66 (40wt% rCF)		0,453	-	2,74	0,23	-	16,67	5,58	0,50	-	6,08
			rCF+PA66 (20wt% rCF)		0,664	-	3,71	0,33	-	16,93	6,04	0,50	-	6,54
			rCF+PA66 (60wt% rCF)		0,310	-	1,59	0,16	-	13,54	5,12	0,50	-	5,62
		rCFRP	Al (85% Al secundário)		0,773	-	1,50	0,54	-	31,49	1,95	0,70	-	2,65
			rCF+PA66 (40wt% rCF)		0,453	-	3,22	0,32	-	24,32	6,50	0,70	-	7,20
			rCF+PA66 (20wt% rCF)		0,664	-	4,32	0,46	-	25,24	7,10	0,70	-	7,80
			rCF+PA66 (60wt% rCF)		0,31	-	1,83	0,22	-	21,28	5,90	0,70	-	6,60
Jhaveri et al. (2018)	ICEV de médio porte	Todas as partes do veículo	CCI	Cut-off Approach	141,0	1369	300,00	5,00	2525,00	2,13	0,04	0,04	2,16	
			TWDCI		126,9	1355	330,00	5,00	2335,00	2,60	0,04	0,04	2,64	
			CAI		77,6	1306	350,00	3,00	1573,00	4,51	0,04	0,04	4,55	
Delogu et al. (2017)	Módulo frontal	Referência (5,71 kg Al; 28,35 kg aço; 3,07 kg HSS)		Atual	37,1	-	118,00	0,00	-46,00	296,00	3,18	0,00	-1,24	1,94
		Leve (7,71 kg Al; 2,06 kg aço; 1,93 kg HSS; 7,74 kg CF; 5,16 kg PA410)		Futuro	37,1	-	118,00	0,00	-58,90	283,10	3,18	0,00	-1,59	1,59
				Atual	24,6	-	205,00	0,50	-3,28	347,22	8,33	0,02	-0,13	8,22
				Futuro	24,6	-	205,00	0,50	-76,50	274,00	8,33	0,02	-3,11	5,24
	Capô	Referência (11,54 kg aço)		Atual	11,5	-	24,10	0,04	-9,87	84,07	2,09	0,00	-0,86	1,24
		Leve (3,32 kg Al; 2,21 kg CF; 0,95 resina de epoxi)		Futuro	11,5	-	24,10	0,04	-9,87	84,07	2,09	0,00	-0,86	1,24
				Atual	6,7	-	94,90	0,35	-9,95	124,40	14,23	0,05	-1,49	12,79
				Futuro	6,7	-	94,90	0,35	-3,67	130,68	14,23	0,05	-0,55	13,73
	Secção central do piso	Referência (27,2 kg Al; 5,30 aço; 3,00 kg plástico)		Atual	35,5	-	624,00	0,00	-88,30	851,70	17,58	0,00	-2,49	15,09
		Leve (13,10 kg Al; 2,90 kg aço; 7,26 kg GF; 4,84 kg PA410)		Futuro	35,5	-	624,00	0,00	-150,00	790,00	17,58	0,00	-4,23	13,35
		Atual	28,1	-	374,00	0,00	-23,10	600,90	13,31	0,00	-0,82	12,49		
		Futuro	28,1	-	374,00	0,00	-146,00	478,00	13,31	0,00	-5,20	8,11		
Sun et al. (2017)	Capô	Aço		Reciclagem	17,1	1325	46,74	-33,22	25085,18	2,74	-1,95	0,79		
		AHSS			13,6	1320	45,10	-26,48	25017,50	3,32	-1,95	1,37		
		Al			10,9	1313	211,91	-158,69	24996,27	19,39	-14,52	4,87		
		CFRP			10,4	1304	505,56	-304,98	25132,49	48,61	-29,33	19,29		

ANEXO C. FIM-DE-VIDA

Na Tabela C.1 e C.2 encontram-se quantificados os impactes para o CPE e PAG, respetivamente, para a estratégia de cenários de FdV. Já na tabela C.3 e C.4 estão as os impactes quantificados por kg de material, para o CPE e PAG, também, respetivamente.

Tabela C.1. Impactes do CPE quantificados para a estratégia de FdV para cada artigo analisado para os 200 000 km

Artigo	Caso de Estudo	Alternativas	Distância Total Percorrida (km)	Peso (kg)		FdV	CVE (GJ)										
				Componente	Veículo		Original					Normalização (200 000 km)					
							Produção	Manufatura	Utilização	FdV	Total	Produção	Manufatura	Utilização	FdV	Total	
Mayyas et al. (2012)	BiW	Aço	321 869	270,0	1470	Fração reciclável: 90%	8,64	3,99	247,88	-5,26	255,25	8,64	3,99	28,29	-5,26	35,66	
		Aço Inoxidável	321 869	240,0	1440	Fração reciclável: 90%	19,50	3,68	218,29	-11,99	229,48	19,50	3,68	22,61	-11,99	33,80	
		AHSS	321 869	203,0	1403	Fração reciclável: 90%	6,50	3,11	184,64	-3,95	190,30	6,50	3,11	16,60	-3,95	22,26	
		Al	321 869	135,0	907	Fração reciclável: 95%	28,01	2,50	112,52	-24,00	119,03	28,01	2,50	10,41	-24,00	16,92	
		Mg	321 869	100,0	875	Fração reciclável: 95%	35,05	1,95	82,76	-31,13	88,63	35,05	1,95	5,88	-31,13	11,75	
		HSCF + HSGF	321 869	123,0	1021	Fração reciclável: <1%	33,52	1,46	104,98	0,00	139,96	33,52	1,46	7,86	0,00	42,84	
Sun et al. (2017)	Capô	Aço	150 000	17,1	1325	Fração reciclável: 95%	0,49	446,06	-0,31	0,18	0,49	0,49	7,66	-0,31	7,84		
		AHSS	150 000	13,6	1320	Fração reciclável: 90%	0,86	444,76	-0,25	0,61	0,86	0,86	6,11	-0,25	6,72		
		Al	150 000	10,9	1313	Fração reciclável: 90%	2,00	443,77	-1,55	0,45	2,00	2,00	4,93	-1,55	5,38		
		CFRP	150 000	10,4	1304	Pirólise. Fração reciclável: 90%	14,51	443,57	-9,50	5,01	14,51	14,51	4,72	-9,50	9,73		
Puri et al. (2009)	Revestimento das portas (conjunto)	Aço	150 000	17,0	1381	Reciclagem	0,58	6,29	-0,30	0,27	0,58	0,58	8,39	-0,30	8,66		
		Al	150 000	9,4	1374	Reciclagem	1,78	3,38	-1,23	0,54	1,78	1,78	4,50	-1,23	5,05		
			150 000	11,7		Disposição	0,23	4,26	0,00	0,23	0,23	0,23	5,68	0,00	5,92		
		GFRP	150 000	11,7	1376	Recuperação Energética	0,23	4,26	-0,02	0,21	0,23	0,23	5,68	-0,02	5,89		
			150 000	11,7		Reciclagem	0,23	4,26	-0,23	0,00	0,23	0,23	5,68	-0,23	5,69		
Raugei et al. (2015)	Veículo de passageiros com materiais leves aplicados ao corpo e chassi.	Aço	150 000	518,1	1100	85% reciclagem em ciclo aberto	50,25	21,97	411,87	5,05	494,19	23,67	10,35	258,65	5,05	297,72	
			150 000	343,1	925	Pessimista: 75% reciclagem em ciclo aberto	68,69	21,97	378,54	-5,05	459,09	25,48	8,15	187,21	-5,05	215,78	
		Al	150 000	343,1	925	Otimista: 90% reciclagem em ciclo fechado	68,69	21,97	378,54	-17,17	434,85	25,48	8,15	187,21	-17,17	203,66	
			150 000	304,1	886	Pessimista: 75% reciclagem em ciclo aberto	99,24	21,97	373,23	-3,54	487,37	34,06	7,54	170,81	-3,54	208,87	
			150 000	304,1	886	Otimista: 90% reciclagem em ciclo fechado	99,24	21,97	373,23	-32,07	430,30	34,06	7,54	170,81	-32,07	180,34	
			150 000	308,1	890	Pessimista: CFRP - recuperação energética; Al - 75% reciclagem em ciclo aberto	78,77	21,97	373,51	-0,88	472,50	27,27	7,61	172,40	-0,88	206,40	
		Al + CFRP	150 000	308,1	890	Intermediária: CFRP - 10% recuperação energética + 90% reciclagem em ciclo aberto; Al - 90% reciclagem em ciclo fechado	78,77	21,97	373,51	-5,26	463,72	27,27	7,61	172,40	-5,26	202,01	
			150 000	308,1	890	Otimista: CFRP - 10% recuperação energética + 90% reciclagem em ciclo aberto; Al - 90% reciclagem em ciclo fechado	78,77	21,97	373,51	-17,00	440,25	27,27	7,61	172,40	-17,00	190,28	
	150 000	286,1	868	CFRP - 10% recuperação energética + 90% reciclagem em ciclo fechado; Mg - 90% reciclagem em ciclo fechado	99,12	21,97	370,00	-23,68	443,72	32,67	10,35	162,61	-23,68	181,94			
Koffler and Zahler (2012)	Extremidade frontal do assento	51% GFRP + 49% Aço	241 401,6	7,6	1652	Avoided burden approach (aço: 98% taxa de recuperação e disposição do plástico)	0,56	-	-	-0,05	0,51	0,56	-	-	-0,05	0,51	
				7,6		Cut-off approach	0,62	-	-	0,00	0,62	0,62	-	-	0,00	0,62	
		42,4% GFRP + 57,1% Aço + 0,1% Al + 0,4% Latão		6,5	1500	Avoided burden approach (aço: 98% taxa de recuperação e disposição do plástico)	0,64	-	-	-0,05	0,59	0,64	-	-	-0,05	0,59	
				6,5		Cut-off approach	0,68	-	-	0,00	0,68	0,68	-	-	0,00	0,68	
		(Uma peça) 90% GFRP + 10% Vidro + 3% Aço		4,1	1821	Avoided burden approach (aço: 98% taxa de recuperação e disposição do plástico)	0,43	-	-	0,00	0,43	0,43	-	-	0,00	0,43	
			4,1		Cut-off approach	0,46	-	-	0,00	0,46	0,46	-	-	0,00	0,46		
Sato and Nakata (2020)	BiW	Aço (328 kg) e HSS (107,9 kg)	100 000	435,9	1481	Reciclagem Convencional (379 kg reciclagem; 57 kg reutilização de	160,00	241,00	241,00	-77,00	324,00	47,09	141,87	141,87	-22,66	166,30	
				100 000	435,9	1481	Reutilização de partes	160,00	241,00	-89,62	311,38	47,09	141,87	-26,38	162,58		
				100 000	435,9	1481	Reciclagem	160,00	241,00	-73,95	327,05	47,09	141,87	-21,77	167,19		
				100 000	435,9	1481	Recuperação Energética	160,00	241,00	-71,27	329,73	47,09	141,87	-20,98	167,98		
		Aço	100 000	271,5	1045	Reciclagem Convencional	199,00	235,00	-120,00	314,00	51,70	122,11	-31,18	142,63			
				100 000	271,5	1045	Reutilização de partes	199,00	235,00	-129,05	304,95	51,70	122,11	-33,53	140,28		
				100 000	271,5	1045	Reciclagem	199,00	235,00	-117,83	316,17	51,70	122,11	-30,61	143,20		
				100 000	271,5	1045	Recuperação Energética	199,00	235,00	-71,21	362,79	51,70	122,11	-18,50	155,31		
		AHSS	100 000	342,1	1387	Reciclagem Convencional	156,00	238,00	-76,00	318,00	38,48	117,40	-18,75	137,14			
				100 000	342,1	1387	Reutilização de partes	156,00	238,00	-86,33	307,67	38,48	117,40	-21,29	134,59		
				100 000	342,1	1387	Reciclagem	156,00	238,00	-73,95	320,05	38,48	117,40	-18,24	137,64		
				100 000	342,1	1387	Recuperação Energética	156,00	238,00	-71,82	322,18	38,48	117,40	-17,71	138,17		
		CFRP	100 000	217,1	1262	Reciclagem Convencional	206,00	233,00	-117,00	322,00	35,44	80,17	-20,13	95,48			
				100 000	217,1	1262	Reutilização de partes	206,00	233,00	-136,26	302,74	35,44	80,17	-23,44	92,16		
				100 000	217,1	1262	Reciclagem	206,00	233,00	-113,72	325,28	35,44	80,17	-19,56	96,04		
				100 000	217,1	1262	Recuperação Energética	206,00	233,00	-75,61	363,39	35,44	80,17	-13,01	102,60		
		Al (271 kg), AHSS(4 kg) e CFRP (4 kg)	100 000	279,0	1324	Reciclagem Convencional	198,00	235,00	-119,00	314,00	41,72	99,04	-25,08	115,69			
				100 000	279,0	1324	Reutilização de partes	198,00	235,00	-130,26	302,74	41,72	99,04	-27,45	113,32		
				100 000	279,0	1324	Reciclagem	198,00	235,00	-117,04	315,96	41,72	99,04	-24,66	116,10		
				100 000	279,0	1324	Recuperação Energética	198,00	235,00	-110,82	322,18	41,72	99,04	-23,35	117,41		
Sujit Das (2011)	Piso	CFRP (têxtil vs. lenhina renovável)	Aço	200 000	30,8	1595	Reciclagem	1,44	0,32	17,13	-0,58	18,31	1,44	0,32	17,13	-0,58	18,31
				200 000	25,6	1587	Reciclagem e pirólise (recuperação 98%)	7,70	1,18	14,22	-4,29	18,80	7,70	1,18	14,22	-4,29	18,80
				200 000	25,6	1587	Reciclagem e pirólise (recuperação 98%)	7,31	0,92	14,30	-4,29	18,23	7,31	0,92	14,30	-4,29	18,23
				200 000	25,6	1587	Reciclagem e pirólise (recuperação 98%)	7,49	1,26	14,13	-4,07	18,80	7,49	1,26	14,13	-4,07	18,80
Delogu et al. (2017)	Módulo frontal	Referência (5,71 kg Al; 28,35 kg aço; 3,07 kg HSS)	150 000	37,1	-	Atual	1,38	0,00	5,08	-0,65	5,81	1,38	0,00	6,77	-0,65	7,50	
			150 000	37,1	-	Futuro	1,38	0,00	5,08	-0,90	5,56	1,38	0,00	6,77	-0,90	7,25	
		Leve (7,71 kg Al; 2,06 kg aço; 1,93 kg HSS; 7,74 kg CF; 5,16 kg PA410)	150 000	24,6	-	Atual	4,82	0,01	3,28	-0,56	7,55	4,82	0,01	4,37	-0,56	8,64	
			150 000	24,6	-	Futuro	4,82	0,01	3,28	-1,60	6,51	4,82	0,01	4,37	-1,60	7,60	
	Capô	Referência (11,54 kg aço)	150 000	11,5	-	Atual	0,30	0,00	1,58	-0,10	1,78	0,30	0,00	2,11	-0,10	2,31	
			150 000	11,5	-	Futuro	0,30	0,00	1,58	-0,10	1,78	0,30	0,00	2,11	-0,10	2,31	
		Leve (3,32 kg Al; 2,21 kg CF; 0,95 resina de epoxi)	150 000	6,7	-	Atual	1,95	0,01	0,88	-0,31	2,53	1,95	0,01	1,17	-0,31	2,82	
			150 000	6,7	-	Futuro	1,95	0,01	0,88	-0,74	2,10	1,95	0,01	1,17	-0,74	2,39	
	Secção central do piso	Referência (27,2 kg Al; 5,30 aço; 3,00 kg plástico)	150 000	35,5	-	Atual	11,20	0,00	6,39	-1,83	15,76	11,20	0,00	8,52	-1,83	17,89	
			150 000	35,5	-	Futuro	11,20	0,00	6,39	-3,04	14,55	11,20	0,00	8,52	-3,04	16,68	
		Leve (13,10 kg Al; 2,90 kg aço; 7,26 kg GF; 4,84 kg PA410)	150 000	28,1	-	Atual	8,30	0,00	5,06	-1,03	12,33	8,30	0,00	6,75	-1,03	14,02	
			150 000	28,1	-	Futuro	8,30	0,00	5,06	-2,98	10,38	8,30	0,00	6,75	-2,98	12,07	

Tabela C.2. Impactes do PAG quantificados para a estratégia de FdV para cada artigo analisado para os 200 000 km

Artigo	Caso de Estudo	Alternativas	Distância Total Percorrida (km)	Peso (kg)		FdV	PAG (kg CO2-eq)									
				Componente	Veículo		Original					Normalização (200 000 km)				
							Produção	Manufatura	Utilização	FdV	Total	Produção	Manufatura	Utilização	FdV	Total
Mayyas et al. (2012)	BiW	Aço	321 869	270,0	1470	Fração reciclável: 90%	670,95	708,21	91301,70	-416,07	92264,79	670,95	708,21	10420,21	-416,07	11383,30
		Aço Inoxidável	321 869	240,0	1440	Fração reciclável: 90%	1225,20	890,40	88606,08	-1102,80	89618,88	1225,20	890,40	9176,21	-1102,80	10189,01
		AHSS	321 869	203,0	1403	Fração reciclável: 90%	504,46	733,44	86329,40	-312,82	87254,47	504,46	733,44	7761,55	-312,82	8686,62
		Al	321 869	135,0	907	Fração reciclável: 95%	1620,00	688,64	51146,64	-1392,66	52062,61	1620,00	688,64	4730,37	-1392,66	5646,34
		Mg	321 869	100,0	875	Fração reciclável: 95%	2210,00	685,00	48988,63	-1967,00	49916,63	2210,00	685,00	3478,87	-1967,00	4406,87
		HSCF + HSGF	321 869	123,0	1021	Fração reciclável: <1%	2121,75	191,27	58954,58	0,00	61267,60	2121,75	191,27	4413,14	0,00	6726,16
Sun et al. (2017)	Capô	Aço	150 000	17,1	1325	Fração reciclável: 95%	46,74	25071,66	-33,22	25085,18	46,74	430,41	-33,22	443,93		
		AHSS	150 000	13,6	1320	Fração reciclável: 90%	45,10	24998,88	-26,48	25017,50	45,10	343,29	-26,48	361,91		
		Al	150 000	10,9	1313	Fração reciclável: 90%	211,91	24943,05	-158,69	24996,27	211,91	276,95	-158,69	330,17		
		CFRP	150 000	10,4	1304	Pirólise. Fração reciclável: 90%	505,56	24931,91	-304,98	25132,49	505,56	265,15	-304,98	465,73		
Puri et al. (2009)	Revestimento das portas (conjunto)	Aço	150 000	17,0	1381	Reciclagem	41,00	467,00	-25,00	16,00	41,00	622,67	-25,00	508,00		
		Al	150 000	9,4	1374	Reciclagem	162,00	250,00	-68,00	94,00	162,00	333,33	-68,00	412,00		
			150 000	11,7		Disposição	42,00	317,00	1,00	43,00	42,00	422,67	1,00	359,00		
		GFRP	150 000	11,7	1376	Recuperação Energética	42,00	317,00	11,00	53,00	42,00	422,67	11,00	359,00		
			150 000	11,7		Reciclagem	42,00	317,00	-36,00	6,00	42,00	422,67	-36,00	359,00		
Raugei et al. (2015)	Veículo de passageiros com materiais leves aplicados ao corpo e chassi.	Aço	150 000	518,1	1100	85% reciclagem em ciclo aberto	2938,69	1289,64	28139,52	655,39	4883,72	1384,12	607,42	17671,62	308,69	19971,85
			150 000	343,1	925	Pessimista: 75% reciclagem em ciclo aberto	4418,60	1289,64	25898,52	-105,71	5602,53	1638,94	478,35	12808,33	-39,21	14886,42
		Al	150 000	343,1	925	Otimista: 90% reciclagem em ciclo fechado	4418,60	1289,64	25898,52	-824,52	4883,72	1638,94	478,35	12808,33	-305,83	14619,80
			150 000	304,1	886	mista: 75% reciclagem em ciclo aberto	14186,00	1289,64	25771,63	-63,43	15412,21	4869,03	442,64	11794,06	-21,77	17083,96
		Mg	150 000	304,1	886	Otimista: 90% reciclagem em ciclo fechado	14186,00	1289,64	25771,63	-6765,32	8710,32	4869,03	442,64	11794,06	-2322,05	14783,69
			150 000	308,1	890	Pessimista: CFRP - recuperação energética; Al - 75% reciclagem em ciclo aberto	4714,59	1289,64	25475,70	359,41	6363,64	1632,10	446,45	11758,90	124,42	13961,86
			150 000	308,1	890	Intermediária: CFRP - 10% recuperação energética + 90% reciclagem em ciclo aberto; Al - 90% reciclagem em ciclo fechado	4714,59	1289,64	25475,70	190,27	6194,50	1632,10	446,45	11758,90	65,87	13903,31
			150 000	308,1	890	Otimista: CFRP - 10% recuperação energética + 90% reciclagem em ciclo aberto; Al - 90% reciclagem em ciclo fechado	4714,59	1289,64	25475,70	-761,00	5243,23	1632,10	446,45	11758,90	-263,44	13574,00
			150 000	286,1	868	CFRP - 10% recuperação energética + 90% reciclagem em ciclo fechado; Mg - 90% reciclagem em ciclo fechado	6997,89	1289,64	25306,55	-1353,07	6934,46	2306,56	425,08	11121,67	-445,98	13407,32
		Koffler and Zahller (2012)	Extremidade frontal do assento	51% GFRP + 49% Aço	241 401,6	7,6	1652	Avoided burden approach (aço: 98% taxa de recuperação e disposição do plástico)	34,83	-	-	-5,32	29,51	34,83	-	-
	7,6					Cut-off approach	40,56	-	-	0,08	40,64	40,56	-	-	0,08	40,64
42,4% GFRP + 57,1% Aço + 0,1% Al + 0,4% Latão	241 401,6			6,5	1500	Avoided burden approach (aço: 98% taxa de recuperação e disposição do plástico)	42,28	-	-	-5,43	36,85	42,28	-	-	-5,43	36,85
				6,5		Cut-off approach	46,28	-	-	0,06	46,34	46,28	-	-	0,06	46,34
(Uma peça) 90% GFRP + 10% Vidro + 3% Aço	241 401,6			4,1	1821	Avoided burden approach (aço: 98% taxa de recuperação e disposição do plástico)	24,76	-	-	-0,10	24,66	24,76	-	-	-0,10	24,66
				4,1		Cut-off approach	25,94	-	-	0,08	26,02	25,94	-	-	0,08	26,02
Delogu et al. (2017)	Módulo frontal	Referência (5,71 kg Al; 28,35 kg aço; 3,07 kg HSS)	150 000	37,1	-	Atual	118,00	0,00	224,00	-46,00	296,00	118,00	0,00	298,67	-46,00	370,67
			150 000	37,1	-	Futuro	118,00	0,00	224,00	-58,90	283,00	118,00	0,00	298,67	-58,90	357,77
		Leve (7,71 kg Al; 2,06 kg aço; 1,93 kg HSS; 7,74 kg CF; 5,16 kg PA410)	150 000	24,6	-	Atual	205,00	0,50	145,00	-3,28	347,00	205,00	0,50	193,33	-3,28	395,55
			150 000	24,6	-	Futuro	205,00	0,50	145,00	-76,50	274,00	205,00	0,50	193,33	-76,50	322,33
	Capô	Referência (11,54 kg aço)	150 000	11,5	-	Atual	24,10	0,04	69,80	-9,87	84,10	24,10	0,04	93,07	-9,87	107,33
			150 000	11,5	-	Futuro	24,10	0,04	69,80	-9,87	84,10	24,10	0,04	93,07	-9,87	107,33
		Leve (3,32 kg Al; 2,21 kg CF; 0,95 resina de epoxi)	150 000	6,7	-	Atual	94,90	0,35	39,10	-9,95	124,00	94,90	0,35	52,13	-9,95	137,43
			150 000	6,7	-	Futuro	94,90	0,35	39,10	-3,67	97,70	94,90	0,35	52,13	-3,67	143,71
	Secção central do piso	Referência (27,2 kg Al; 5,30 kg aço; 3,00 kg plástico)	150 000	35,5	-	Atual	624,00	0,00	316,00	-88,30	852,00	624,00	0,00	421,33	-88,30	957,03
			150 000	35,5	-	Futuro	624,00	0,00	316,00	-150,00	790,00	624,00	0,00	421,33	-150,00	895,33
		Leve (13,10 kg Al; 2,90 kg aço; 7,26 kg GF; 4,84 kg PA410)	150 000	28,1	-	Atual	374,00	0,00	250,00	-23,10	601,00	374,00	0,00	333,33	-23,10	684,23
			150 000	28,1	-	Futuro	374,00	0,00	250,00	-146,00	478,00	374,00	0,00	333,33	-146,00	561,33

Tabela C.3. Impactes do CPE quantificado para a estratégia de FdV para cada artigo analisado por kg de material

Artigo	Caso de Estudo	Alternativas	Peso (kg)		FdV	CPE							
			Componente	Veículo		Original (GJ)				Normalização (MJ/kg)			
						Produção	Manufatura	FdV	Total	Produção	Manufatura	FdV	Total
Mayyas et al. (2012)	BiW	Aço	270,0	1470	Fração reciclável: 90%	8,64	3,99	-5,26	255,25	32,00	14,78	-19,48	27,30
		Aço Inoxidável	240,0	1440	Fração reciclável: 90%	19,50	3,68	-11,99	229,48	81,25	15,33	-49,96	46,63
		AHSS	203,0	1403	Fração reciclável: 90%	6,50	3,11	-3,95	190,30	32,02	15,32	-19,46	27,88
		Al	135,0	907	Fração reciclável: 95%	28,01	2,50	-24,00	119,03	207,48	18,52	-177,78	48,22
		Mg	100,0	875	Fração reciclável: 95%	35,05	1,95	-31,13	88,63	350,50	19,50	-311,30	58,70
		HSCF + HSGF	123,0	1021	Fração reciclável: <1%	33,52	1,46	0,00	139,96	272,52	11,87	0,00	284,39
Sun et al. (2017)	Capô	Aço	17,1	1325	Fração reciclável: 95%	0,49	-0,31	0,18		28,72	-18,17	10,55	
		AHSS	13,6	1320	Fração reciclável: 90%	0,86	-0,25	0,61		63,24	-18,38	44,85	
		Al	10,9	1313	Fração reciclável: 90%	2,00	-1,55	0,45		182,98	-141,81	41,17	
		CFRP	10,4	1304	Pirólise. Fração reciclável: 90%	14,51	-9,50	5,01		1395,19	-913,46	481,73	
Puri et al. (2009)	Revestimento das portas (conjunto)	Aço	17,0	1381	Reciclagem	0,58	-0,30	0,27		33,82	-17,71	16,12	
		Al	9,4	1374	Reciclagem	1,78	-1,23	0,54		190,05	-131,87	58,18	
			11,7		Disposição	0,23	0,00	0,23		19,83	0,09	19,91	
		GFRP	11,7	1376	Recuperação Energética	0,23	-0,02	0,21		19,83	-2,05	17,78	
			11,7		Reciclagem	0,23	-0,23	0,00		19,83	-19,66	0,17	
Raugei et al. (2015)	Veículo de passageiros com materiais leves aplicados ao corpo e chassi.	Aço	518,1	1100	85% reciclagem em ciclo aberto	50,25	21,97	5,05	77,27	45,68	19,97	9,75	75,40
		Al	343,1	925	Pessimista: 75% reciclagem em ciclo aberto	68,69	21,97	-5,05	85,61	94,36	23,75	-14,72	103,39
			343,1	925	Otimista: 90% reciclagem em ciclo fechado	68,69	21,97	-17,17	73,48	74,26	23,75	-50,05	47,96
		Mg	304,1	886	Pessimista: 75% reciclagem em ciclo aberto	99,24	21,97	-3,54	117,68	112,01	24,80	-11,63	125,18
			304,1	886	Otimista: 90% reciclagem em ciclo fechado	99,24	21,97	-32,07	89,14	112,01	24,80	-105,46	31,35
			308,1	890	Pessimista: CFRP - recuperação energética; Al - 75% reciclagem em ciclo aberto	78,77	21,97	-0,88	99,86	88,51	24,69	-2,85	110,35
		Al + CFRP	308,1	890	Intermediário: CFRP - 10% recuperação energética + 90% reciclagem em ciclo aberto; Al - 90% reciclagem em ciclo fechado	78,77	21,97	-5,26	95,48	88,51	24,69	-17,08	96,11
			308,1	890	Otimista: CFRP - 10% recuperação energética + 90% reciclagem em ciclo aberto; Al - 90% reciclagem em ciclo fechado	78,77	21,97	-17,00	83,74	88,51	24,69	-55,18	58,02
	Mg + CFRP	286,1	868	CFRP - 10% recuperação energética + 90% reciclagem em ciclo fechado; Mg - 90% reciclagem em ciclo fechado	99,12	21,97	-23,68	97,41	114,20	36,17	-82,78	67,58	
Koffler and Zahller (2012)	Extremidade frontal do assento	51% GFRP + 49% Aço	7,6	1652	Avoided burden approach (aço: 98% taxa de recuperação e disposição do plástico)	0,56	-	-0,05	0,51	73,56	-	-6,61	66,95
			7,6		Cut-off approach	0,62	-	0,00	0,62	81,62	-	0,08	81,71
		42,4% GFRP + 57,1% Aço + 0,1% Al + 0,4% Latão	6,5	1500	Avoided burden approach (aço: 98% taxa de recuperação e disposição do plástico)	0,64	-	-0,05	0,59	98,37	-	-7,88	90,50
			6,5		Cut-off approach	0,68	-	0,00	0,68	105,25	-	0,07	105,32
		(Uma peça) 90% GFRP + 10% Vidro + 3% Aço	4,1	1821	Avoided burden approach (aço: 98% taxa de recuperação e disposição do plástico)	0,43	-	0,00	0,43	105,06	-	-0,26	104,80
	4,1		Cut-off approach	0,46	-	0,00	0,46	111,70	-	0,16	111,86		
Sato and Nakata (2020)	BiW	Aço (328 kg) e HSS (107,9 kg)	435,9	1481	Reciclagem Convencional (379 kg reciclagem; 57 kg reutilização de partes)	160,00	-77,00	83,00		108,04	-	-51,99	56,04
			435,9	1481	Reutilização de partes	160,00	-89,62	70,38		108,04	-	-60,51	47,52
			435,9	1481	Reciclagem	160,00	-73,95	86,05		108,04	-	-49,93	58,10
			435,9	1481	Recuperação Energética	160,00	-71,27	88,73		108,04	-	-48,12	59,91
			271,5	1045	Reciclagem Convencional	199,00	-120,00	79,00		190,43	-	-114,83	75,60
			271,5	1045	Reutilização de partes	199,00	-129,05	69,95		190,43	-	-123,49	66,94
		Aç	271,5	1045	Reciclagem	199,00	-117,83	81,17		190,43	-	-112,76	77,67
			271,5	1045	Recuperação Energética	199,00	-71,21	127,79		190,43	-	-68,14	122,29
			342,1	1387	Reciclagem Convencional	156,00	-76,00	80,00		112,47	-	-54,79	57,68
			342,1	1387	Reutilização de partes	156,00	-86,33	69,67		112,47	-	-62,24	50,23
			342,1	1387	Reciclagem	156,00	-73,95	82,05		112,47	-	-53,32	59,16
			342,1	1387	Recuperação Energética	156,00	-71,82	84,18		112,47	-	-51,78	60,69
		CFRP	217,1	1262	Reciclagem Convencional	206,00	-117,00	89,00		163,23	-	-92,71	70,52
			217,1	1262	Reutilização de partes	206,00	-136,26	69,74		163,23	-	-107,97	55,26
			217,1	1262	Reciclagem	206,00	-113,72	92,28		163,23	-	-90,11	73,12
			217,1	1262	Recuperação Energética	206,00	-75,61	130,39		163,23	-	-59,91	103,32
			279,0	1324	Reciclagem Convencional	198,00	-119,00	79,00		149,55	-	-89,88	59,67
			279,0	1324	Reutilização de partes	198,00	-130,26	67,74		149,55	-	-98,38	51,16
Al (271 kg), AHSS(4 kg) e CFRP (4 kg)	279,0	1324	Reciclagem	198,00	-117,04	80,96		149,55	-	-88,40	61,15		
	279,0	1324	Recuperação Energética	198,00	-110,82	87,18		149,55	-	-83,70	65,85		
	30,8	1595	Reciclagem	1,44	0,32	-0,58	18,31	46,67	10,38	-18,73	38,32		
	Precursor têxtil às CFRP combinada com a tecnologia de manufatura SMC	25,6	1587	Reciclagem e pirólise (recuperação 98%)	7,70	1,18	-4,29	18,80	300,72	45,96	-167,73	178,95	
		7,31			0,92	-4,29	18,23	285,36	36,05	-167,73	153,67		
		7,49			1,26	-4,07	18,80	292,39	49,12	-158,95	182,56		
7,08		0,99			-4,07	18,19	276,45	38,63	-158,95	156,14			
Delogu et al. (2017)	Módulo frontal	Referência (5,71 kg Al; 28,35 kg aço; 3,07 kg HSS)	37,1	-	Atual	1,38	0,00	-0,65	0,73	37,17	0,00	-17,51	19,66
			37,1		Futuro	1,38	0,00	-0,90	0,48	37,17	0,00	-24,24	12,93
		Leve (7,71 kg Al; 2,06 kg aço; 1,93 kg HSS; 7,74 kg CF; 5,16 kg PA410)	24,6	-	Atual	4,82	0,01	-0,56	4,27	195,93	0,39	-22,76	173,56
			24,6		Futuro	4,82	0,01	-1,60	3,23	195,93	0,39	-1,60	194,72
	Capô	Referência (11,54 kg aço)	11,5	-	Atual	0,30	0,00	-0,10	0,20	26,00	0,07	-8,58	17,49
			11,5		Futuro	0,30	0,00	-0,10	0,20	26,00	0,07	-8,58	17,49
		Leve (3,32 kg Al; 2,21 kg CF; 0,95 resina de epoxi)	6,7	-	Atual	1,95	0,01	-0,31	1,65	292,35	1,11	-46,48	246,99
			6,7		Futuro	1,95	0,01	-0,74	1,22	292,35	1,11	-110,94	182,52
	Secção central do piso	Referência (27,2 kg Al; 5,30 kg aço; 3,00 kg plástico)	35,5	-	Atual	11,20	0,00	-1,83	9,37	315,49	0,00	-51,55	263,94
			35,5		Futuro	11,20	0,00	-3,04	8,16	315,49	0,00	-85,63	229,86
		Leve (13,10 kg Al; 2,90 kg aço; 7,26 kg GF; 4,84 kg PA410)	28,1	-	Atual	8,30	0,00	-1,03	7,27	295,37	0,00	-36,65	258,72
			28,1		Futuro	8,30	0,00	-2,98	5,32	295,37	0,00	-106,05	189,32

Tabela C.4. Impactes do PAG quantificado para a estratégia de FdV para cada artigo analisado por kg de material

Artigo	Caso de Estudo	Alternativas	Peso (kg)		FdV	PAG									
			Componente	Veículo		Original (kg CO2-eq)				Normalização (kg CO2-eq/kg)					
						Produção	Manufatura	FdV	Total	Produção	Manufatura	FdV	Total		
Mayyas et al. (2012)	BIW	Aço	270,0	1470	Fração reciclável: 90%	670,95	708,21	-416,07	963,09	2,49	2,62	-1,54	3,57		
		Aço Inoxidável	240,0	1440	Fração reciclável: 90%	1225,20	890,40	-1102,80	1012,80	5,11	3,71	-4,60	4,22		
		AHSS	203,0	1403	Fração reciclável: 90%	504,46	733,44	-312,82	925,07	2,49	3,61	-1,54	4,56		
		Al	135,0	907	Fração reciclável: 95%	1620,00	688,64	-1392,66	915,98	12,00	5,10	-10,32	6,79		
		Mg	100,0	875	Fração reciclável: 95%	2210,00	685,00	-1967,00	928,00	22,10	6,85	-19,67	9,28		
		HSCF + HSGF	123,0	1021	Fração reciclável: <1%	2121,75	191,27	0,00	2313,02	17,25	1,56	0,00	18,81		
Sun et al. (2017)	Capô	Aço	17,1	1325	Fração reciclável: 95%	46,74	-33,22	13,52		2,74	-1,95	0,79			
		AHSS	13,6	1320	Fração reciclável: 90%	45,10	-26,48	18,62		3,32	-1,95	1,37			
		Al	10,9	1313	Fração reciclável: 90%	211,91	-158,69	53,22		19,39	-14,52	4,87			
		CFRP	10,4	1304	Pirólise. Fração reciclável: 90%	505,56	-304,98	200,58		48,61	-29,33	19,29			
		Aço	17,0	1381	Reciclagem	41,00	-25,00	16,00		2,41	-1,47	0,94			
Puri et al. (2009)	Revestimento das portas (conjunto)	Al	9,4	1374	Reciclagem	162,00	-68,00	94,00		17,33	-7,27	10,05			
		GFRP	11,7	1376	Disposição	42,00	1,00	43,00		3,59	0,09	3,68			
		GFRP	11,7	1376	Recuperação Energética	42,00	11,00	53,00		3,59	0,94	4,53			
		GFRP	11,7	1376	Reciclagem	42,00	-36,00	6,00		3,59	-3,08	0,51			
		Aço	518,1	1100	85% reciclagem em ciclo aberto	2938,69	1289,64	655,39	4883,72	2,67	1,17	0,60	4,44		
Raugei et al. (2015)	Veículo de passageiros com materiais leves aplicados ao corpo e chassis.	Al	343,1	925	Pessimista: 75% reciclagem em ciclo aberto	4418,60	1289,64	-105,71	5602,53	4,78	1,39	-0,11	6,06		
		Al	343,1	925	Otimista: 90% reciclagem em ciclo fechado	4418,60	1289,64	-824,52	4883,72	4,78	1,39	-0,89	5,28		
		Mg	304,1	886	Pessimista: 75% reciclagem em ciclo aberto	14186,00	1289,64	-63,43	15412,21	16,01	1,46	-0,07	17,40		
		Mg	304,1	886	Otimista: 90% reciclagem em ciclo fechado	14186,00	1289,64	-6765,32	8710,32	16,01	1,46	-7,64	9,83		
		Al + CFRP	308,1	890	Pessimista: CFRP - recuperação energética; Al - 75% reciclagem em ciclo aberto	4714,59	1289,64	359,41	6363,64	5,30	1,45	0,40	7,15		
		Al + CFRP	308,1	890	Intermediária: CFRP - 10% recuperação energética + 90% reciclagem em ciclo aberto; Al - 90% reciclagem em ciclo fechado	4714,59	1289,64	190,27	6194,50	5,30	1,45	0,21	6,96		
		Al + CFRP	308,1	890	Otimista: CFRP - 10% recuperação energética + 90% reciclagem em ciclo aberto; Al - 90% reciclagem em ciclo fechado	4714,59	1289,64	-761,00	5243,23	5,30	1,45	-0,86	5,89		
		Mg + CFRP	286,1	868	CFRP - 10% recuperação energética + 90% reciclagem em ciclo fechado; Mg - 90% reciclagem em ciclo fechado	6997,89	1289,64	-1353,07	6934,46	8,06	1,49	-1,56	7,99		
		Koffler and Zahler (2012)	Extremidade frontal do assento	51% GFRP + 49% Aço	7,6	1652	Avoided burden approach (aço: 98% taxa de recuperação e disposição do plástico)	34,83	-	-5,32	29,51	4,58	-	-0,70	3,88
				51% GFRP + 49% Aço	7,6	1652	Cut-off approach	40,56	-	0,08	40,64	5,34	-	0,01	5,35
42,4% GFRP + 57,1% Aço + 0,1% Al + 0,4% Latão	6,5			1500	Avoided burden approach (aço: 98% taxa de recuperação e disposição do plástico)	42,28	-	-5,43	36,85	6,51	-	-0,84	5,67		
42,4% GFRP + 57,1% Aço + 0,1% Al + 0,4% Latão	6,5			1500	Cut-off approach	46,28	-	0,06	46,34	7,12	-	0,01	7,13		
(Uma peça) 90% GFRP + 10% Vidro + 3% Aço	4,1			1821	Avoided burden approach (aço: 98% taxa de recuperação e disposição do plástico)	24,76	-	-0,10	24,66	6,02	-	-0,02	5,99		
Delogu et al. (2017)	Módulo frontal	Referência (5,71 kg Al; 28,35 kg aço; 3,07 kg HSS)	37,1	-	Atual	118,00	0,00	-46,00	296,00	3,18	0,00	-1,24	1,94		
		Leve (7,71 kg Al; 2,06 kg aço; 1,93 kg HSS; 7,74 kg CF; 5,16	24,6	-	Futuro	118,00	0,00	-58,90	283,00	3,18	0,00	-1,59	1,59		
		Leve (7,71 kg Al; 2,06 kg aço; 1,93 kg HSS; 7,74 kg CF; 5,16	24,6	-	Atual	205,00	0,50	-3,28	347,00	8,33	0,02	-0,13	8,22		
		Leve (7,71 kg Al; 2,06 kg aço; 1,93 kg HSS; 7,74 kg CF; 5,16	24,6	-	Futuro	205,00	0,50	-76,50	274,00	8,33	0,02	-3,11	5,24		
	Capô	Referência (11,54 kg aço)	11,5	-	Atual	24,10	0,04	-9,87	84,10	2,09	0,00	-0,86	1,24		
		Leve (3,32 kg Al; 2,21 kg CF; 0,95 resina de epoxi)	6,7	-	Futuro	24,10	0,04	-9,87	84,10	2,09	0,00	-0,86	1,24		
		Leve (3,32 kg Al; 2,21 kg CF; 0,95 resina de epoxi)	6,7	-	Atual	94,90	0,35	-9,95	124,00	14,23	0,05	-1,49	12,79		
		Leve (3,32 kg Al; 2,21 kg CF; 0,95 resina de epoxi)	6,7	-	Futuro	94,90	0,35	-3,67	97,70	14,23	0,05	-0,55	13,73		
	Secção central do piso	Referência (27,2 kg Al; 5,30 aço; 3,00 kg plástico)	35,5	-	Atual	624,00	0,00	-88,30	852,00	17,58	0,00	-2,49	15,09		
		Leve (13,10 kg Al; 2,90 kg aço; 7,26 kg GF; 4,84 kg PA410)	35,5	-	Futuro	624,00	0,00	-150,00	790,00	17,58	0,00	-4,23	13,35		
		Leve (13,10 kg Al; 2,90 kg aço; 7,26 kg GF; 4,84 kg PA410)	28,1	-	Atual	374,00	0,00	-23,10	601,00	13,31	0,00	-0,82	12,49		
		Leve (13,10 kg Al; 2,90 kg aço; 7,26 kg GF; 4,84 kg PA410)	28,1	-	Futuro	374,00	0,00	-146,00	478,00	13,31	0,00	-5,20	8,11		

ANEXO D. EXTENDED ABSTRACT

www.iceer.net



E131

17:30-17:45

Life Cycle Energy of Vehicles on Lightweighting and Alternative Powertrain Strategies – A ReviewDr. Helena Monteiro¹, R. Alonso², M. Gonçalves³, M. Iten¹, N. S. Caetano^{2,4}¹ Instituto de Soldadura e Qualidade, 4415-491 Grijó, Portugal² Porto School of Engineering, 4249-015 Porto, Portugal,³ Instituto de Soldadura e Qualidade, 2740-120 Porto Salvo, Portugal⁴ LEPABE - Laboratory for Process Engineering, Environment, Biotechnology and Energy, Faculty of Engineering, University of Porto, Rua Dr. Roberto Frias, 4200-465 Porto, Portugal**ABSTRACT**

To improve vehicles environmental performance, different strategies have been explored namely to reduce the use stage energy. To avoid problem shifting, a life cycle perspective should be used to compare alternative solutions. This paper aims to compare existing studies focused on life cycle energy (LCE) of vehicles to analyze the impacts and benefits regarding two trending improvement strategies: lightweight materials and alternative powertrain selection. A literature review was performed to systematize quantitatively the LCE results of different studies (e.g. presented among figures, tables, and literature text). The LCE results were compiled and normalized for the same driving distance, 200 000 km, per life cycle stage. Moreover, the study discusses research findings on the application of the two strategies to improve overall vehicles' LCE. As lightweight materials have generally higher embodied energy, the material selection is highly influenced by end-of-life scenarios. It was observed that carbon/glass fiber composites generally have the highest embodied energy, being a preferable option for vehicles that last longer driving distances. Innovative powertrains sourced by renewable energy sources, electric mixes, can significantly reduce vehicles' LCE use stage, counteracting the benefit of lightweight design. Thus, the benefit of both strategies should be studied together.

Keywords: automotive; life cycle energy; lightweight material; powertrain; primary energy; vehicle

1. INTRODUCTION

The transport sector is responsible for around 25% of carbon dioxide (CO₂) emissions in European Union, and road transport represents more than 70% of those emissions. There are currently two trending strategies to reduce energy consumption and CO₂ emissions of a vehicle's use phase: a) lightweight vehicles, and b) alternative vehicle powertrains. Measures to improve a vehicle energy consumption should be analyzed based on a Life Cycle Assessment methodology (ISO 14040/ 14044), which tracks the life cycle (LC) potential environmental impacts of a product or service.

This paper aims to compare the existing studies focused on cumulative energy demand (life cycle energy - LCE- in GJ) of vehicles, analyzing the main impacts and benefits regarding the two above mentioned strategies.

2. MATERIALS AND METHODS

A search for recent literature published in the past 10 years was undertaken with the goal of selecting a sample of articles presenting LCE results: a) eight studies on lightweight materials were selected and analyzed [1-8] and; b) for the alternative powertrain scenarios, LCE results were gathered from four studies [9-12]. The LC results were computed for the same lifetime driving distance (200 000 km).

3. RESULTS AND DISCUSSION

Most studies for passenger vehicle with conventional powertrain (ICEV) show that lightweighting is a worthwhile strategy to reduce vehicles LCE for a 200 000 km driving distance. Nevertheless, depending on End of Life (EoL) scenario, the preferable lightweight material may change. Results showed that improvements in material recovery and recycling technologies of aluminium, magnesium and composites could promote an offset of their production impact (through avoided burdens). Given that, lightweight materials with high embodied energy (e.g. composites) are generally more advantageous for longer driving distance vehicles (e.g. trucks) and should see future improvements through the incorporation of recycled materials in their production. Vehicles with innovative powertrains, namely battery electric vehicle (BEV) and fuel cell electric vehicles (FCEV), sourced by renewable energy sources (or electric mixes), can highly reduce use stage LCE when compared to ICEV. However, depending on the primary energy sources of the BEVs and, FCEVs (e.g., regional electric mix; or other fossil fuel-based) these powertrains may end up having higher LCE.

4. CONCLUSION

This work presents an uniformized review of LCE studies focused on two trending strategies to reduce vehicles

energy consumption: alternative lightweight material and powertrain selection.

Overall, the authors conclude that both strategies have the potential to reduce the LCE of the reference scenarios, i.e. steel in the lightweight strategy and ICEV in the powertrain. However hot-spots for improvements are identified regarding the lightweight materials' EoL and powertrains' energy sources.

The development of better EoL scenarios (feasible disassembly, material recovery, and recycling strategies) may be more beneficial than lightweighting, specially for electric vehicles. The authors recommend that, the embodied energy of alternative lightweight solutions for electric vehicles should always be considered to avoid problem-shifting, since an increase in embodied impact may not be offset by mass-induced energy savings at use stage. To complete, both strategies should be studied together through a life cycle perspective and including EoL.

FUNDING

European Union's Horizon 2020 research and innovation programme: grant "No. 810764". Regional European and development fund: grant POCI-01-0247-FEDER-046095. Project Base Funding: UIDB/04730/2020 of CIETI; UIDB/00511/2020 of LEPABE - FCT/MCTES (PIDDAC).

REFERENCES

- [1] E. Tempelman, 2011. Multi-parametric study of the effect of materials substitution on life cycle energy use and waste generation of passenger car structures, *Transp. Res. Part D Transp. Environ.*, 16(7), 479–485.
- [2] F. E. K. Sato, T. Nakata, 2020. Analysis of the impact of vehicle lightweighting on recycling benefits considering life cycle energy reductions, *Resour. Conserv. Recycl.*, 164, 105-118.
- [3] A. T. Mayyas, A. Qattawi, A. R. Mayyas, M. A. Omar, 2012. Life cycle assessment-based selection for a sustainable lightweight body-in-white design, *Energy*, 39 (1), 412–425.
- [4] T. Ghosh, H. C. Kim, R. De Kleine, T. J. Wallington, B. R. Bakshi, 2021. Life cycle energy and greenhouse gas emissions implications of using carbon fiber reinforced polymers in automotive components: Front subframe case study, *Sustain. Mater. Technol.*, 28, e00263.
- [5] D. He, V. K. Soo, H. C. Kim, P. Compston, M. Doolan, 2020. Comparative life cycle energy analysis of carbon fibre pre-processing, processing and post-processing recycling methods, *Resour. Conserv. Recycl.*, 158, 104794.
- [6] S. Poulidikidou, C. Schneider, A. Björklund, S. Kazemahvazi, P. Wennhage, D. Zenkert, 2015. A material selection approach to evaluate material substitution for minimizing the life cycle environmental impact of vehicles, *Mater. Des.*, 83, 704–712.
- [7] K. Jhaveri, G. M. Lewis, J. L. Sullivan, G. A. Keoleian, 2018. Life cycle assessment of thin-wall ductile cast iron for automotive lightweighting applications, *Sustain. Mater. Technol.*, 15, 1–8.
- [8] M. Delogu, L. Zanchi, C. A. Dattilo, M. Pierini, 2017. Innovative composites and hybrid materials for electric vehicles lightweight design in a sustainability perspective, *Mater. Today Commun.*, 13, 192–209.
- [9] L. Lombardi, L. Tribioli, R. Cozzolino, G. Bella, 2017. Comparative environmental assessment of conventional, electric, hybrid, and fuel cell powertrains based on LCA, *Int. J. Life Cycle Assess.*, 22 (12), 1989–2006.
- [10] I. Bartolozzi, F. Rizzi, M. Frey, 2013. Comparison between hydrogen and electric vehicles by life cycle assessment: A case study in Tuscany, Italy, *Appl. Energy*, 101, 103–111.
- [11] D. C. Rosenfeld, J. Lindorfer, K. Fazeni-Fraisl, 2019. Comparison of advanced fuels—Which technology can win from the life cycle perspective?, *J. Clean. Prod.*, 238, 117879.
- [12] S. Xiong, J. Ji, X. Ma, 2019. Comparative life cycle energy and GHG emission analysis for BEVs and PHEVs: A case study in China, *Energies*, 12 (5), 1–17.