

UNIVERSIDADE DE LISBOA
FACULDADE DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOGRÁFICA, GEOFÍSICA E ENERGIA



Comparação entre carro elétrico e carro convencional em ciclo de vida

André Filipe Barradas Serrano

Mestrado em Engenharia da Energia e Ambiente

Dissertação orientada por:
Doutora Carla Silva

2024

“A tua vida começa, quando a tua zona de conforto acaba.”

Uma lição de vida que vou levar comigo para sempre.

“Everything is theoretically impossible until it is done.”

Robert A. Heinlein

Agradecimentos

à Professora Carla Silva por ter introduzido este tema e por confiar em mim para o desenvolver; por acompanhar a minha curiosidade e ser exímia a ensinar-me investigação e desenvolvimento de matérias; pelo acompanhamento, interesse e dedicação, o meu muito obrigado;

às minhas avós que sempre me apoiaram e me incentivaram a seguir em frente, perante todas as dificuldades, sou eternamente grato;

aos meus pais que desde o primeiro instante lutaram pela minha felicidade e pelos meus sonhos, são inalcançáveis e o seu amor eterno;

ao meu irmão João, e meu companheiro de vida, sempre estiveste ao meu lado nos meus melhores e piores momentos, estaremos sempre juntos;

à minha namorada Bárbara que será sempre o meu porto seguro e que me apoia incondicionalmente;

A todos os meus professores e colegas de curso, que me abriram os olhos para o futuro que me espera, e ajudaram a moldar a minha forma de pensar, nunca vos esquecerei;

Resumo

O principal objetivo desta dissertação é analisar os impactos energéticos e ambientais dos veículos elétricos (EVs) em comparação com os veículos convencionais com motor de combustão interna (ICEVs), para o consumo energético e emissões de GEE. O estudo foca-se nos veículos Renault Clio TCe100 (Gasolina), Renault Clio dCi 85 (Diesel), Nissan Leaf (edição de 2020) e Nissan Leaf e+ (edição de 2020).

Foi realizada uma avaliação abrangente do ciclo de vida (LCA), cobrindo as fases *Well-to-Tank* (WTT), *Tank-to-Wheel* (TTW) e o ciclo de vida dos materiais (MLC).

Diversos cenários foram avaliados, incluindo um cenário padrão (PDR), um cenário de materiais 100% reciclados (REC), um cenário de vida útil de 300.000 km, um cenário de energia 100% renovável (REW) e uma projeção para o ano 2050. O cenário REW demonstrou as reduções mais significativas nas emissões de CO₂ para os EVs, alcançando uma diminuição de 63-69% em comparação com os ICEVs.

O cenário padrão (PDR) resultou nas menores reduções de emissões. Neste cenário, o Nissan Leaf registou emissões de 122 gCO₂/km, representando uma redução de 31% em comparação com o ICEV a gasolina (176 gCO₂/km) e de 28% em comparação com o ICEV a diesel (169 gCO₂/km). O Nissan Leaf+ apresentou emissões de 134 gCO₂/km, refletindo reduções de 24% e 20% em comparação com os ICEVs a gasolina e diesel, respetivamente.

O estudo conclui que, embora a extensão da vida útil dos veículos e a utilização de materiais reciclados proporcionem benefícios ambientais significativos, a adoção de energias renováveis e os avanços tecnológicos são essenciais para alcançar reduções substanciais nas emissões de gases com efeito de estufa.

Palavras-chave: veículos elétricos, veículos com motor de combustão interna, avaliação do ciclo de vida, emissões de gases com efeito de estufa, ciclo de vida dos materiais.

Abstract

The main objective of this dissertation is to analyze the energy and environmental impacts of electric vehicles (EVs) compared to conventional internal combustion engine vehicles (ICEVs) in terms of energy consumption and CO₂ emissions in the metropolitan areas of Lisbon and Porto. The study focuses on the Renault Clio TCe100 (gasoline), Renault Clio dCi 85 (diesel), Nissan Leaf (2020 edition), and Nissan Leaf e+ (2020 edition), selected based on their sales figures in Portugal in 2019.

A comprehensive life cycle assessment (LCA) was conducted, covering the *Well-to-Tank* (WTT), *Tank-to-Wheel* (TTW), and Materials Life Cycle (MLC) stages.

Several scenarios were evaluated, including a standard scenario (PDR), a 100% recycled materials scenario (REC), a 300,000 km lifetime scenario, a 100% renewable energy scenario (REW), and a projection for the year 2050. The REW scenario demonstrated the most significant reductions in CO₂ emissions for EVs, achieving a 63-69% decrease compared to ICEVs.

In contrast, the standard scenario (PDR) resulted in the smallest reductions in emissions. Under this scenario, the Nissan Leaf recorded emissions of 122 gCO₂/km, representing a 31% reduction compared to the gasoline ICEV (176 gCO₂/km) and a 28% reduction compared to the diesel ICEV (169 gCO₂/km). The Nissan Leaf+ exhibited emissions of 134 gCO₂/km, reflecting reductions of 24% and 20% compared to the gasoline and diesel ICEVs, respectively.

The study concludes that, while extending vehicle lifespan and utilizing recycled materials provides notable environmental benefits, the adoption of renewable energy and advancements in technology is crucial for achieving significant reductions in greenhouse gas emissions.

Keywords: electric vehicles, internal combustion engine vehicles, life cycle assessment, greenhouse gas emissions, materials life cycle assessment.

Índice

Agradecimentos	iv
Resumo	v
Abstract	vi
Índice	vii
Índice de tabelas	ix
Índice Figuras	xi
Nomenclatura	xii
1. Introdução.....	1
1.1 Enquadramento	2
1.2 Análise do ciclo de vida (ACV).....	2
1.3 Tecnologias de Propulsão	5
2. Objetivos	6
3. Revisão Bibliográfica.....	8
3.1 Introdução aos Veículos Elétricos e a sua Origem.....	8
3.2 Introdução à Avaliação do Ciclo de Vida na Indústria Automóvel.....	10
3.3 Avaliação Comparativa do Ciclo de Vida de ICEVs e EVs	11
3.4 Consumo de Energia e Perfil de Emissões durante a fase operacional	12
3.4.1 Análise do Mix Energético	13
3.4.2 Cenários de projeção para 2050	14
3.4.3 Período de Carregamento.....	15
3.4.4 Ciclos de Condução	15
3.5.1 Produção das Baterias dos EVs.....	16
3.5.2 Fim de Vida das Baterias dos EVs	17
3.5.3 Gestão do Fim de Vida e Aplicações Secundárias	18
3.6 GREET, Análise <i>Cradle-to-Grave</i>	18
3.7 Avanços Tecnológicos dos Veículos.....	20
3.8 Implicações Políticas com Base nos Resultados da ACV	21
3.9 Desafios e Limitações da ACV no Setor Automóvel.....	22
3.10 Revisão Bibliográfica – Considerações Finais.....	23
4. Métodos e Casos de Estudo 4.1 Mercado automóvel português.....	24
4.2 Padrões de mobilidade das áreas metropolitanas de Lisboa e Porto	26
4.3 Etapas da avaliação do ciclo de vida (ACV) dos automóveis.....	27
4.3.2 Análise <i>Well-to-Wheels</i> (ICEV)	28

4.3.3	Análise <i>Well-to-Wheels</i> (EV).....	30
4.3.4	Análise do ciclo de vida (CV) dos materiais.....	32
4.4	Análise do mix de geração de energia elétrica de Portugal entre 2015 e 2019.....	35
4.4.1	Projeção do mix de geração de eletricidade português para 2050.....	38
4.5	Análise da geração de energia elétrica de França e Reino Unido, para o ano de 2019.....	39
4.5.1	Análise da geração de energia elétrica da França e Reino Unido, para o ano de 2050.....	42
5.	Resultados e Discussão	45
5.1	Análise <i>Well-to-Wheels</i> Cenário Padrão.....	45
5.1.2	Análise WTW para os cenários REW e 2050	48
5.2	Análise Ciclo de Vida dos Materiais.....	50
5.2.2	Análise dos componentes CVM para diversos cenários	51
5.2.4	Análise ADR para diversos cenários	54
5.2.5	Análise das baterias dos EVs	55
5.2.6	Análise das baterias dos EVs para todos os cenários.....	58
5.2.7	Análise dos fluídos para diversos cenários	58
5.3	Análise CVM para os diferentes cenários.....	59
5.4	Análise LCA para todos os cenários	61
5.5	Análise dos resultados e comparação com os resultados da revisão bibliográfica.....	62
5.5.1	Análise Wheel-to-Wheels (WTW)	62
5.5.2	Análise ciclo de vida dos materiais (CVM)	63
5.5.2	Análise ciclo de vida completo dos veículos (LCA)	64
6.	Conclusão.....	66
7.	Referências Bibliográficas.....	68
8.	Anexos	73

Índice de tabelas

Tabela 4.1 - Automóveis ligeiros de passageiros ICEV e BEV comercializados por tipo de marca, entre 2017 e 2020. [20]	25
Tabela 4.2 - Massa dos automóveis selecionados e respetivas baterias de apoio e propulsão [50], [53].	25
Tabela 4.3 - Massas dos fluídos constituintes dos veículos, em quilogramas [48].....	26
Tabela 4.4 - Dados do Inquérito á mobilidade realizado em Portugal, para um condutor automóvel a residir nas áreas metropolitanas de Lisboa e Porto [57].	27
Tabela 4.5 - Fator de emissão da gasolina e gasóleo e respetiva densidade energética dos dois combustíveis [58].....	29
Tabela 4.6 - Consumo energético da gasolina e gasóleo e respetiva eficiência dos combustíveis [58].	29
Tabela 4.7 - Fatores de emissão da produção de eletricidade, por tipo de fonte de energia [59].	30
Tabela 4.8 - Emissões de CO2 resultantes da produção de eletricidade em Portugal, entre 2015 e 2019.	30
Tabela 4.9 - Perdas de Energia durante a fase operacional WTW, para os EVs.	31
Tabela 4.10 - Consumo energético dos EVs por quilómetro percorrido.	32
Tabela 4.11 - Perdas de energia, associadas aos processos de transmissão e distribuição, para França e Reino Unido [63], [64].....	33
Tabela 4.12 - Parâmetros dos automóveis introduzidos no software GREET 2.7_2020.	33
Tabela 4.13 - Manutenção e substituição dos componentes e fluídos, para os ICEVs.	34
Tabela 4.14 - Número de substituições dos componentes e fluídos, para os EVs.	34
Tabela 4.15 - Produção de eletricidade em Portugal, por tipo de fonte energética, em GWh [59].....	35
Tabela 4.16 - Projeção da produção de eletricidade, por tipo de central, em TWh, para o ano de 2050.	38
Tabela 4.17 - Mix energético da França e Reino Unido, por fonte de energia em 2019 [64], [69].	39
Tabela 4.18 - Fatores de Emissão por fonte de energia.....	40
Tabela 4.19 - Consumo energético dos veículos elétricos a circular em França e no Reino Unido.	41
Tabela 4.20 - Projeção da produção de eletricidade em França, por tipo de central, em TWh, para o ano de 2050 [70]......	42
Tabela 4.21 - Produção de eletricidade, por tipo de central, em TWh, para o ano de 2050, no Reino Unido [71].	43
Tabela 5.1 - Emissões de GEE (CVM), associadas à extração e produção dos componentes dos veículos.	50
Tabela 5.2 - Emissões de GEE (CVM), associadas aos processos de montagem, descarte e reciclagem.	53
Tabela 5.3 - Emissões de GEE (CVM), associadas aos processos de produção dos materiais, montagem e reciclagem das baterias dos EVs.....	55
Tabela 5.4 - Análise comparativa com a revisão bibliográfica (WTW).....	63
Tabela 5.5 - Análise comparativa com a revisão bibliográfica (CVM).	64
Tabela 5.6 - Análise comparativa das emissões de GEE com a revisão bibliográfica (LCA).....	65
Tabela 8.1 - Emissões de gases com efeito de estufa referentes ao ciclo do combustível (WTT) e o ciclo de utilização (TTW), para o Renault Clio Tce100 e Renault Clio Blue dCi 85, para a área metropolitana de Lisboa	70

Tabela 8.2 - Emissões de gases com efeito de estufa referentes ao ciclo do combustível (WTT) e o ciclo de utilização (TTW), para o Renault Clio Tce100 e Renault Clio Blue dCi 85, para a área metropolitana do Porto.....	70
Tabela 8.3 - Produção energética em Portugal entre 2015 e 2019, por tipo de fonte de energia.....	73
Tabela 8.4 - Emissões de gases com efeito de estufa, em gCO ₂ , por tipo de produção energética em Portugal..	71

Índice Figuras

Figura 1.1 - Esquema do ciclo de vida dos materiais.....	3
Figura 1.2 - Esquema representativo da análise <i>Well-to-Wheels</i> , que engloba as fases do ciclo do combustível (WTT) e de utilização (TTW) dos automóveis. [11].....	4
Figura 1.3 - Esquema representativo da análise <i>Cradle-to-Grave</i> ao ciclo de vida dos materiais. [12] ..	4
Figura 1.4 - Esquema representativo dos componentes de um automóvel convencional (ICEV). [13]..	5
Figura 1.5 - Esquema representativo dos componentes de um automóvel elétrico (EV). [15]	6
Figura 3.1 - Primeiro automóvel elétrico a quebrar o recorde de 100 km/h "La Jamais Contente". [17].	9
Figura 3.2 - Protótipo do avião elétrico da Eviation Aircraft (ALICE).	10
Figura 3.3 - Inputs mix energético software GREET 2020, fontes que implicam combustão. [25]	19
Figura 3.4 - Inputs mix energético software GREET 2020, fontes de energia renováveis. [25]	20
Figura 4.1 - Distribuição do mix energético português, durante o período de 2015 a 2019	36
Figura 4.2 - Fatores de Emissão das Centrais de Energia, por kWh de eletricidade gerada.....	37
Figura 4.3 - Intensidade carbónica da produção de eletricidade em Portugal, França e Reino Unido, para o ano de 2019.....	41
Figura 4.4 - Composição do mix energético Francês em 2050	43
Figura 4.5 - Composição do mix energético do Reino Unido em 2050.....	44
Figura 4.6 - Fatores de Emissão de GEE resultantes da produção de eletricidade, em 2019 e 2050, para Portugal, França e Reino Unido.	45
Figura 5.1 - Emissões de GEE durante a fase operacional (WTW).	46
Figura 5.2 - Consumo energético durante a fase operacional (WTW).....	47
Figura 5.3 - Emissões de GEE durante a fase operacional (WTW), considerando diferentes fontes de energia para abastecimento dos veículos elétricos.....	48
Figura 5.4 - Emissões de GEE durante a fase operacional (WTW), para o cenário padrão, 100% renovável e o cenário de projeção para 2050.	49
Figura 5.5 - Distribuição das emissões de GEE por tipo de componente integrado nos veículos.	51
Figura 5.6 - Emissões de GEE associados à extração e produção dos componentes, para os diversos cenários em análise.	52
Figura 5.7 - Distribuição das Emissões de GEE associadas aos processos de ADR.	53
Figura 5.8 - Emissões de GEE associadas aos processos de ADR, para diversos cenários em análise.	54
Figura 5.9 - Distribuição das emissões de GEE associadas aos processos de produção dos materiais, montagem e reciclagem das baterias dos EVs.....	56
Figura 5.10 - Emissões de GEE associadas aos métodos de reciclagem das baterias dos EVs.	56
Figura 5.11 - Emissões de GEE associadas ao ciclo de vida das baterias dos veículos, para diversos cenários em análise.	58
Figura 5.12 - Emissões de GEE associadas ao ciclo de vida dos fluídos utilizados nos veículos.	59
Figura 5.13 - Consumo energético (CVM) para os diversos cenários em análise.	60
Figura 5.14 - Emissões de GEE (CVM) para os diversos cenários em análise.	60
Figura 5.15 - Consumo energético (LCA), para os diversos cenários em análise.	61
Figura 5.16 - Emissões de GEE (LCA), para os diversos cenários em análise.	62

Nomenclatura

ACAP – Associação Comércio Automóvel de Portugal
ACV – Análise ao ciclo de vida
ADR – Montagem, Desmontagem e Reciclagem (*Assembly, Disposal, Recycling*)
Al - Alumínio
BEV – *Battery Electric Vehicle*
CCGT – Turbina a gás de ciclo combinado (*Combined Cycle Gas Turbine*)
CCS - *Carbon Capture and Storage*
CO₂ – Dióxido de carbono
CO_{2eq} – Gases com efeito de estufa (GEE)
CV – Ciclo de Vida
CVC – Ciclo de Vida Completo
CVM – Ciclo de Vida dos Materiais
DIE – *Diesel*
EV – *Electric Vehicle*
GAS – *Gasoline*
GEE – Gases com efeito de estufa
GREET - *Greenhouse gases, Regulated Emissions, and Energy use in Transportation model.*
GWP – *Global Warming Potential*
HEV – *Hybrid Electric Vehicle*
ICEV – Veículo com motor de combustão interna (*Internal Combustion Engine Vehicle*)
IEA – *International Energy Agency*
INE – Inquérito Nacional de Estatísticas
LCA – *Life Cycle Assessment*
LCI – *Life Cycle Inventory*
LCIA – *Life Cycle Impacts Assessment*
Li-ion - *Lithium-ion*
Mg - Magnesium
Pb-Ac – *Lead-Acid*
REC – Cenário 100% Reciclagem
REW – Cenário 100% Renovável
TTW – *Tank-to-Wheels*
WLTP - *Worldwide harmonized Light-duty vehicles Test Procedure*
WTT – *Well-to-tank*
ZEV - *Zero Emission Vehicle*

1. Introdução

A necessidade de reduzir as emissões de CO₂ associadas ao transporte rodoviário obriga a uma reflexão profunda da situação atual, em que se verifica o uso predominante de veículos abastecidos por combustíveis derivados do petróleo (i.e. gasóleo e gasolina). Recentemente a mobilidade elétrica afirma-se como uma alternativa de transporte viável que permite reduzir significativamente as emissões de CO₂ ao longo do período de operação, tendo-se por isso assistido a um aumento significativo da integração de veículos elétricos [1]. No entanto, as atuais tecnologias de baterias elétricas ainda não conseguem fornecer uma solução efetiva e atrativa em termos económicos. Acresce ainda que a quantidade de matérias-primas necessárias para produzir as baterias para alimentar todos os veículos automóveis, põe em causa a viabilidade de uma solução de transporte rodoviário apoiada no veículo elétrico [2]. Recentemente vários estudos foram realizados para aferir a pegada carbónica de um veículo 100% elétrico e os seus consumos de energia de modo a aferir as vantagens e desvantagens deste novo tipo de mobilidade elétrica, em comparação com as tecnologias dominantes presentes no momento (i.e., gasóleo e gasolina).

A economia global está dependente do setor do transporte rodoviário, que ano após ano demonstra índices de crescimento substanciais, nomeadamente para os veículos de passageiros [3]. A penetração dos veículos elétricos (EV) no mercado automóvel representa uma grande oportunidade para atingir as metas climáticas definidas para 2030 e 2050 respetivamente, ao reduzir as emissões de gases com efeito de estufa e prevenir a população á exposição de gases de escape nocivos. Um dos argumentos que apoia a penetração dos veículos elétricos é a ausência de emissões durante a fase de utilização do veículo que o tornam bastante atrativo á primeira impressão, contudo será necessário realizar uma análise completa ao ciclo de vida para ter uma perceção precisa do que os veículos emitem, nas diferentes fases do seu tempo de vida [4].

Na última década, muitos estudos têm sido levados a cabo sobre este tópico, a grande maioria compartilha a conclusão de que a produção de eletricidade é a principal causa do impacto ambiental verificado na utilização deste tipo de veículos, ou seja, durante a fase de “*Well-to-Tank*” (WTT) [3],[5]. Se, e apenas se, a eletricidade utilizada para o carregamento for produzida por fontes renováveis e outras com emissões de carbono fóssil muito reduzidas, os veículos elétricos podem atingir o seu verdadeiro potencial em prevenir o aquecimento global. Como tal, fará sentido realizar uma análise global ao ciclo de vida dos veículos e comparar diferentes tecnologias, veículos convencionais a combustão (GAS e DIE) e veículos 100% elétricos (EVs).

1.1 Enquadramento

A União Europeia no âmbito do Pacto Ecológico Europeu, decidiu empenhar-se em desenvolver uma política climática ambiciosa, de tal forma que para 2050 pretende-se atingir a neutralidade carbónica, por forma a eliminar mais emissões de CO₂ do que aquelas que são produzidas. Atualmente os métodos de remoção e armazenamento do carbono, resumem-se ao solo, florestas e os oceanos. De notar, que as emissões globais em 2019 atingiram os 38 GtCO₂ [6].

O Parlamento Europeu, no dia 7 de outubro de 2020, votou a favor da neutralidade climática com o objetivo claro de redução das emissões em 60% até 2030 e atingir a neutralidade carbónica em 2050. Atualmente são cinco os estados-membros que se comprometeram a legislar com o propósito de atingir esse objetivo, a Suécia definiu que pretende reduzir totalmente as emissões de gases com efeito de estufa até 2045, ao passo que a Dinamarca, Hungria, França e Alemanha estão empenhados em alcançar a neutralidade climática em 2050 [6].

Posto isto, serão necessárias alterações profundas na estrutura da rede elétrica e do respetivo mix elétrico, bem como o setor da mobilidade existente. Isto pode ser obtido através do investimento nas energias renováveis, em eficiência energética ou implementação de outras tecnologias com menor impacto ambiental. Com a descarbonização da rede elétrica, os EVs assumem-se como uma excelente alternativa aos veículos convencionais (ICEV), visto que passam a emitir pouco ou nada durante a fase de carregamento, num cenário hipotético em que a distribuição do mix elétrico é 100% renovável [4]. Neste momento, um dos problemas associado à penetração dos veículos elétricos é a produção de eletricidade ser obtida através de fontes de combustíveis fósseis, o que resulta em elevadas emissões durante o ciclo do combustível dos veículos.

1.2 Análise do ciclo de vida (ACV)

A análise do ciclo de vida (ACV) é uma metodologia que permite avaliar os impactos ambientais associados a um produto ao longo da duração do seu tempo de vida. Esta análise tem como objetivo perceber a contribuição das diversas fases do ciclo de vida, de modo a desenvolver e melhorar os pontos negativos acerca desse produto ou serviço, tornando-se um método bastante útil para momentos de decisão, pois são apoiados com uma diversidade de resultados e cenários que facilitam a escolha final [3].

O *Life Cycle Inventory* (LCI) representa um registo que permite quantificar todos os *inputs* e *outputs* das fronteiras do sistema previamente definidas e engloba as fases de produção, utilização e fim-de-vida desse produto específico. Os *inputs* representam as matérias-primas e a energia envolvida nos processos, enquanto os *outputs* correspondem a todas as substâncias que são expelidas para o meio ambiente, nomeadamente emissões de poluentes e geração de resíduos e subprodutos, que resultam das fases de produção e consumo energético associado aos processos [7].

Na figura [1.1] está representado um esquema com o ciclo de vida dos materiais e os respetivos processos que englobam o LCI, extração dos materiais, produção e manufatura, distribuição, utilização e reciclagem/eliminação [8].

A ACV é uma metodologia que assenta em quatro pontos fulcrais [3] que a caracterizam:

1. Definição do propósito do estudo, objetivos, unidade funcional e fronteiras do sistema.
2. Recolha de informação acerca de todos os processos envolvidos, identificando os fluxos de inputs e outputs existentes.
3. Caracterização dos resultados e classificação dos mesmos em impactos ambientais.
4. Análise e interpretação dos resultados, formulando questões fulcrais.

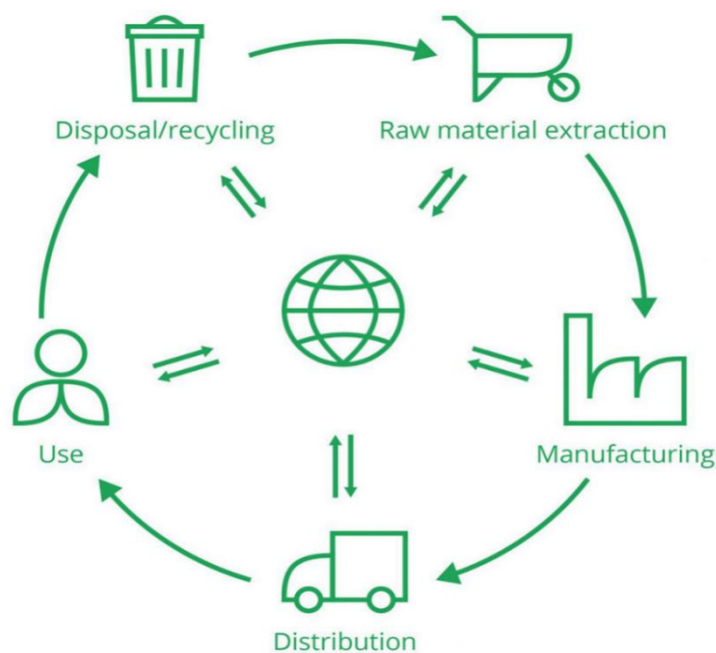


Figura 1.1 - Esquema do ciclo de vida dos materiais.

A análise WTW, em inglês *Well-to-Wheels*, é uma metodologia muito similar á ACV e foi desenvolvida com o propósito de analisar o setor dos transportes e avaliar os seus impactos ambientais através do consumo energético e emissões de poluentes.

Esta metodologia divide-se em duas partes fundamentais, *Well-to-Tank* (WTT) que representa a fase do ciclo do combustível que irá abastecer/carregar os veículos. O WTT é a análise do conjunto de processos desde a extração, produção e distribuição do combustível, para os EVs durante esta fase é analisada a produção de eletricidade e o respetivo mix energético. A fase *Tank-to-Wheels* (TTW) representa o ciclo de condução e utilização dos automóveis, onde são analisados os poluentes emitidos durante a sua utilização [9].

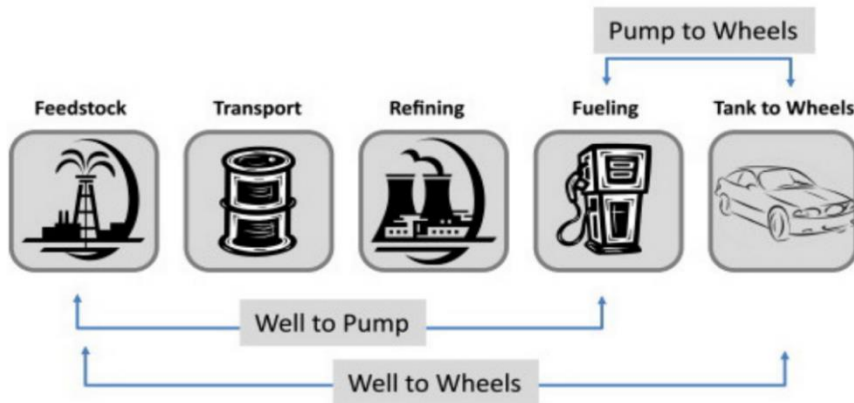


Figura 1.2 - Esquema representativo da análise *Well-to-Wheels*, que engloba as fases do ciclo do combustível (WTT) e de utilização (TTW) dos automóveis [10].

De notar, que a principal diferença entre as duas metodologias, no que diz respeito á análise WTW [10], esta não engloba o ciclo de vida dos materiais, pelo que é prática comum, em conjunto, realizar uma análise “*Cradle-to-grave*” (CTG), que considera todos os impactos em cada fase do ciclo de vida de um produto, incluindo o ciclo de vida dos materiais, desde a extração, transporte, produção dos componentes, montagem e posterior reciclagem e eliminação dos veículos [9]. Nas figuras [1.2; 1.3] estão representados os esquemas representativos de todos os processos referentes á análise WTW e CTG.

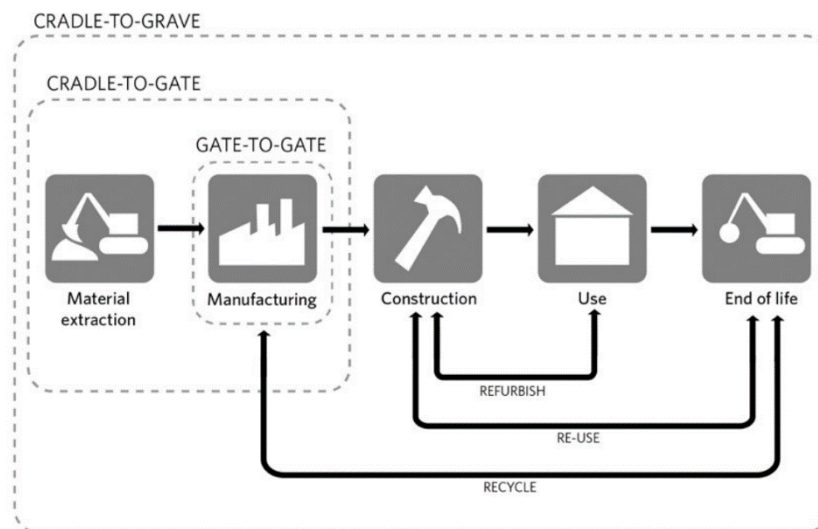


Figura 1.3 - Esquema representativo da análise *Cradle-to-Grave* ao ciclo de vida dos materiais [11].

A metodologia aplicada nesta dissertação foi uma análise WTW e CTG, em conjunto, pois permite facilmente analisar os impactos referentes ao ciclo do combustível e de utilização e agregar esses dados com o ciclo de vida dos materiais (CTG) [11], para diversas tecnologias disponíveis no mercado automóvel. Este tipo de análise favorece e muito a fase de desenvolvimento de tecnologias emergentes, como os veículos a pilhas de combustível ou elétricos. É sem dúvida uma ferramenta essencial para auxiliar a penetração deste tipo de veículos na frota automóvel, sendo bastante útil não só para os fabricantes automóveis como para os consumidores [4].

1.3 Tecnologias de Propulsão

Os veículos convencionais com motor de combustão (ICEV) é a tecnologia automóvel mais estabelecida atualmente, contém um motor de combustão/explosão interna que utiliza a energia libertada da reação de combustão, proveniente de uma mistura composta por combustível (gasolina ou gasóleo) e ar.

Para o motor de combustão alimentado a gasolina, a ignição do combustível é despoletada pela vela de ignição que gera uma faísca, enquanto para o motor alimentado a gasóleo a ignição do combustível resulta das elevadas temperaturas da compressão do ar no interior do cilindro [12]. Ambas as tecnologias automóveis, consomem bastante energia e são fontes emissoras de gases de efeito de estufa, especialmente durante a sua fase de utilização (TTW) [13].

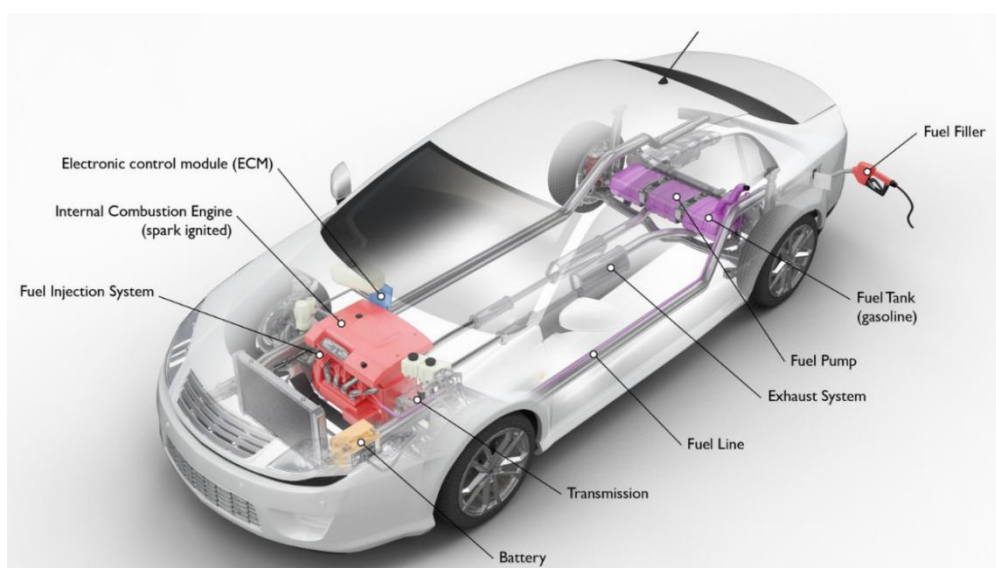


Figura 1.4 - Esquema representativo dos componentes de um automóvel convencional (ICEV) [12].

Os veículos elétricos também conhecidos como veículos elétricos a bateria, possuem um motor elétrico ao invés dos motores de combustão interna utilizados nos veículos convencionais. A bateria de tração utilizada neste tipo de tecnologias é de maior dimensão e tem como função alimentar o motor elétrico. Nestes veículos existe uma bateria auxiliar que

fornece energia para o funcionamento de todos os acessórios, assim como uma tomada de carregamento que se conecta à rede elétrica, para carregar o veículo. A bateria pode também ser recarregada pelo sistema de regenerativo de travagem do próprio automóvel [14].

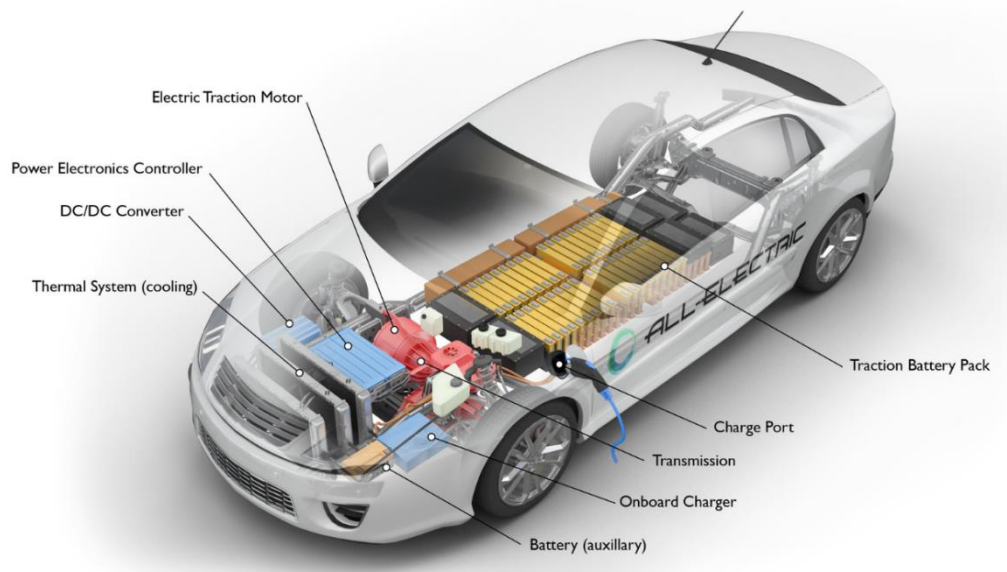


Figura 1.5 - Esquema representativo dos componentes de um automóvel elétrico (EV) [14].

A disparidade entre tecnologias automóveis verifica-se durante a sua fase de utilização, em que os EVs não emitem gases nocivos pelo tubo de escape, visto que são alimentados a eletricidade, não possuem os componentes usuais dos veículos convencionais, como a bomba de combustível ou o próprio depósito de combustível [14].

2. Objetivos

O objetivo desta dissertação é destacar, por comparação, as vantagens e desvantagens associadas à difusão dos veículos elétricos (EVs) no setor da mobilidade em Portugal, particularmente nas áreas metropolitanas de Lisboa e Porto. Para este fim, optou-se por comparar os desempenhos de dois modelos de veículos elétricos, o Nissan Leaf e o Nissan Leaf e+, com os veículos de motor de combustão interna (ICEVs), nomeadamente o Renault Clio TCe100 (Gasolina) e o Renault Clio dCi 85 (Diesel). A produção de eletricidade que irá carregar os EVs e o ciclo dos materiais foram especialmente considerados. Para tal, aplicou-se um estudo de Avaliação do Ciclo de Vida (Life Cycle Assessment - LCA) para cinco cenários distintos:

- Um cenário referente ao ano de 2020.
- Um cenário de 100% de reciclagem dos materiais utilizados no fabrico;
- Um cenário que contempla a substituição das baterias dos EVs durante o período de vida útil;

- Um cenário com uma distribuição do mix elétrico 100% renovável;
- Um cenário de projeção do mix energético para o ano de 2050.

Estes cenários foram concebidos para analisar as limitações dos EVs em comparação com os ICEVs, em diferentes contextos energéticos, e para avaliar como os EVs podem ser uma solução eficiente e sustentável no processo de transição energética. Assim, a investigação conduzida nesta dissertação está diretamente alinhada com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), que sublinham a importância da mobilidade sustentável e do combate à crise climática. Em particular, a análise irá abordar os seguintes ODS:

ODS 7 - Energia Limpa e Acessível: A tese investiga como garantir um acesso universal a energia sustentável nos setores da mobilidade, realçando a importância de aumentar a penetração das energias renováveis na matriz energética e, ao mesmo tempo, assegurar uma rede elétrica que permita um carregamento eficaz dos EVs, garantindo um uso eficiente e acessível desta energia.

ODS 13 - Ação Contra a Mudança Global do Clima: Este objetivo destaca a necessidade urgente de combater as alterações climáticas e seus impactos. Nesta dissertação, avaliar-se-ão as emissões de gases com efeito de estufa (GEE) ao longo do ciclo de vida dos veículos selecionados e a eficiência energética em diversos contextos, com o intuito de compreender os contributos de diferentes soluções de mobilidade para a redução da pegada ambiental.

Perguntas de Investigação:

- a) Qual o impacto das emissões de GEE dos veículos elétricos e convencionais em diferentes cenários em Portugal?
- b) Como os diferentes métodos de reciclagem de baterias de veículos elétricos afetam as emissões de GEE durante o ciclo de vida dos materiais?
- c) De que forma a eficiência energética dos veículos, tanto na fase *Well-to-Tank* (WTT) quanto na *Tank-to-Wheel* (TTW), influencia as emissões de GEE no ciclo de vida completo em diferentes contextos energéticos em Portugal, França e Reino Unido?
- d) Quais componentes específicos dos veículos elétricos e convencionais são os principais contribuintes para o consumo energético e as emissões de GEE durante a fase do ciclo de vida dos materiais?
- e) Como as previsões dos mixes energéticos para 2050 em Portugal, França e Reino Unido podem alterar as emissões de GEE associadas ao uso de veículos elétricos e convencionais, relativamente ao cenário atual?

Estas questões de investigação proporcionam uma base sólida para uma análise aprofundada dos contributos dos EVs para os objetivos da mobilidade sustentável e da transição energética, enquadrando-se nas metas globais de ação climática delineadas pelos ODS.

3. Revisão Bibliográfica

Inicialmente foi realizada uma revisão extensa da bibliografia, relacionada com a análise completa do ciclo de vida dos veículos, e as diferentes fases que compõem esse mesmo ciclo, de uma perspetiva ambiental. Primeiramente procurou-se obter respostas relativamente às especificações dos veículos, em estudo, como o seu tempo de vida em quilómetros, tipo de bateria (massa, composição), consumo energético e respetivas emissões de gases com efeito de estufa. Foi também crucial nesta fase inicial entender qual o mix energético utilizado para carregamento das baterias dos EVs, por forma a determinar os impactos e emissões da produção da eletricidade. Foi realizada uma breve discussão das diversas transições energéticas e da origem dos veículos elétricos e as razões para o seu aparecimento tardio, como solução para resolver os problemas ambientais existentes atualmente.

Nesta dissertação, a revisão bibliográfica tem como objetivo explorar a trajetória e o impacto ambiental dos veículos elétricos em comparação com os veículos de combustão interna, em Portugal. A crescente urgência em abordar as mudanças climáticas e a transição energética motiva uma análise detalhada dos ciclos de vida dos veículos, desde a fase de produção até ao seu fim de vida, utilizando a metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV).

Esta análise permite não apenas compreender as vantagens e desvantagens de cada tipo de veículo em termos de consumo energético e emissões de GEE, mas também explorar as políticas, os avanços tecnológicos e os desafios que moldam o setor automóvel. Ao longo desta secção, será dada especial atenção ao impacto dos diferentes mixes energéticos e práticas de reciclagem no desempenho ambiental dos veículos, assim como as implicações a longo prazo da mobilidade elétrica.

Ao abordar estes temas, esta secção proporciona uma base robusta para a análise subsequente dos dados recolhidos e para a formulação de recomendações políticas e práticas que possam apoiar a implementação eficaz de soluções de mobilidade sustentável. Com a finalidade de oferecer uma perspetiva compreensiva e multidimensional, a revisão bibliográfica abrange estudos relevantes que refletem o desenvolvimento no campo da mobilidade elétrica e de avaliação de ciclo de vida.

3.1 Introdução aos Veículos Elétricos e a sua Origem

Os veículos elétricos não é um conceito propriamente novo ou recente, embora encontrem-se esquecidos no tempo. O primeiro veículo elétrico foi desenvolvido em 1980, em Iowa nos Estados Unidos da América, sendo que a sua expansão só iria a verificar-se aquando das melhorias das baterias de chumbo-ácido, em meados do século XIX. Por volta de 1900, esta modalidade atingiu o seu pico de popularidade, pois eram veículos que aos olhos dos consumidores, representavam maior fiabilidade, menos emissões de fumos de escape e ausência de vibrações ou mesmo ruído [15]. Em abril de 1899, um veículo elétrico concebido por Camille Jenatzy (La Jamais Contente) [16] quebrou o recorde de velocidade dos 100 km/h [17].

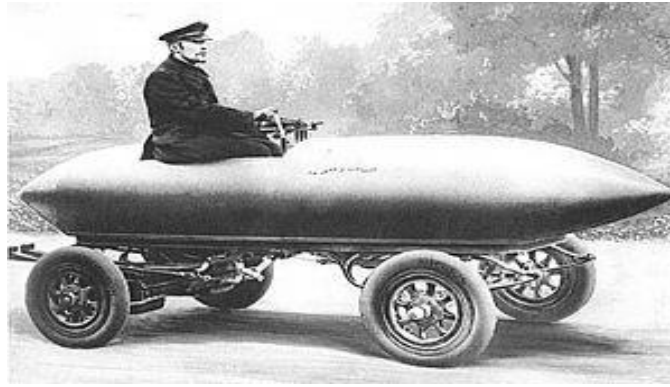


Figura 3.1 - Primeiro automóvel elétrico a quebrar o recorde de 100 km/h "La Jamais Contente" [16].

Com a transição energética em curso, foram descobertos novos poços de petróleo, o que refletiu numa redução significativa do preço da gasolina. Em meados do século XX, Henry Ford implementou o seu sistema de produção em massa de veículos com motores de combustão que se tornou bastante apelativo ao público-alvo (Model T), aliado a um aumento da autonomia dos veículos a gasolina que impediu a expansão dos automóveis elétricos [15].

Anos mais tarde, em meados dos anos 70, o interesse pelo desenvolvimento dos veículos elétricos reacendeu, com as crises de petróleo que vigoravam na época. A empresa pioneira na criação e venda dos carros elétricos para o mercado automóvel foi a General Motors, que entre 1996 e 1999, comercializou as primeiras unidades do modelo EV1 (1ª geração) que apresentava uma autonomia de 80 km e um desempenho aceitável, contudo com a evolução das baterias elétricas de chumbo-ácido para baterias de níquel hidreto metálico, que introduziu o aumento da autonomia do EV1 (2ª geração) para 160 a 190 km [18].

Atualmente os veículos elétricos são uma estratégia fulcral para a transição energética em curso, grandes empresas automóveis como Honda, Nissan, General Motors, entre outras, têm modelos híbridos e veículos elétricos para aquisição pelo consumidor. Em 2019 foram comercializados 206044 automóveis, dos quais 2% representam os EVs, contudo a tendência irá continuar a aumentar ano após ano. Em 2019 o veículo elétrico preferido dos portugueses foi o Nissan Leaf, seguido do Renault Zoe [19].

A Eviation Aircraft, representa a expansão da mobilidade aérea, individualmente e como comunidade. É uma empresa fabricante de aviões elétricos, que recentemente deu a conhecer a público o seu novo modelo Alice, um avião elétrico concebido para viagens de curtas distâncias, e que irá realizar o seu primeiro voo inaugural no segundo semestre do ano de 2023, para operar em serviço comercial no início de 2024. A mesma fonte revela que o avião Alice será equipado com dois motores elétricos supercondutores com 640 KW de potência cada um e vai ser capaz de transportar nove passageiros ao longo de uma autonomia máxima de 1046 quilómetros [20].



Figura 3.2 - Protótipo do avião elétrico da Eviation Aircraft (ALICE) [20].

O potencial dos veículos elétricos só será realmente significativo, se num futuro próximo, ocorrerem grandes mudanças no setor automóvel. As indústrias dos materiais para os veículos a combustão terão de repensar e modificar as suas fábricas para produzir componentes para os veículos elétricos. A produção de eletricidade para o carregamento da frota elétrica terá necessariamente ser através de fontes não poluentes, ou de baixa emissão de gases com efeito de estufa. A segurança deste tipo de veículos tem de ser repensada com a respetiva evolução dos seus componentes, principalmente ao nível das baterias, que podem ser extremamente perigosas na ocorrência de um acidente ou por defeito de carga.

3.2 Introdução à Avaliação do Ciclo de Vida na Indústria Automóvel

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é uma ferramenta analítica amplamente reconhecida pelo seu método abrangente na quantificação dos impactos ambientais associados a todas as etapas da vida de um produto, desde a extração de matérias-primas, passando pelo processamento de materiais, fabrico, distribuição, uso, reparação e manutenção, até à disposição ou reciclagem. Na indústria automóvel, a ACV serve como um instrumento crucial para avaliar a pegada ecológica da produção, operação e gestão do fim de vida dos veículos, oferecendo uma perspetiva multifacetada sobre sustentabilidade.

A origem da ACV remonta aos anos 60 e 70, quando a crescente preocupação com o ambiente exigiu uma abordagem holística para avaliar o impacto de produtos e processos. Inicialmente focada em eficiência energética, a ACV desde então evoluiu para incluir uma ampla gama de impactos ambientais, incluindo, mas não limitando a, emissões de gases com efeito de estufa, esgotamento de recursos e geração de resíduos. A metodologia foi refinada e padronizada, com a Organização Internacional para a Normalização (ISO) a fornecer diretrizes nas normas ISO 14040 e 14044, que se tornaram a referência para a realização de ACVs abrangentes.

Remontando à crise petrolífera dos anos 70, quando uma maior consciência sobre a escassez de recursos motivou a necessidade de um entendimento mais holístico dos impactos ambientais. Desde então, o método evoluiu, guiado por estudos pioneiros como os de Hunt et

al. (1992), que estabeleceram as bases estruturais da ACV, e posteriormente refinado por investigadores como Heijungs et al. (1992), que contribuíram com metodologias robustas que sustentam a prática moderna da ACV.

No contexto da indústria automóvel, a ACV tem sido fundamental para promover o desenvolvimento de veículos mais sustentáveis. Com o advento dos veículos elétricos (EVs) e das tecnologias híbridas, a ACV tornou-se ainda mais crucial, pois permite comparar os veículos tradicionais com motor de combustão interna (ICEVs) com modelos mais novos e mais eficientes em energia ao longo dos seus ciclos de vida. Muitos artigos científicos utilizaram a ACV para identificar áreas dentro do ciclo de vida automóvel que oferecem o maior potencial para melhorias de desempenho ambiental. Por exemplo, Hawkins et al. (2013) forneceram uma comparação extensiva entre ICEVs e EVs, demonstrando o potencial dos EVs para reduzir o impacto ambiental, particularmente quando a eletricidade utilizada provém de energias renováveis.

A aplicação da ACV na indústria automóvel não está isenta de desafios, abrangendo cadeias de fornecimento vastas e complexas. As revisões abrangentes sobre os veículos elétricos, e as investigações mais recentes sobre a avaliação comparativa do ciclo de vida de veículos convencionais e elétricos, contribuíram significativamente para a compreensão das implicações das diversas tecnologias [3].

Além disso, com o avanço global em direção à descarbonização da rede elétrica, a ACV tornou-se um pilar no desenvolvimento de sistemas de propulsão alternativos, especialmente veículos elétricos a bateria (BEVs) e veículos elétricos a células de combustível (FCEVs), que estão destinados a desempenhar um papel crucial na transição energética. A profundidade da ACV permite uma análise detalhada dos impactos ambientais dessas tecnologias, incluindo a sua dependência de materiais que requerem a adoção de processos intensivos em energia [21], [22].

3.3 Avaliação Comparativa do Ciclo de Vida de ICEVs e EVs

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é uma ferramenta essencial para avaliar os impactos ambientais dos veículos com motor de combustão interna (ICEVs) e dos veículos elétricos (EVs). Os ICEVs têm sido a espinha dorsal da indústria automóvel, com uma tecnologia centrada no motor de combustão interna, que funciona com combustíveis fósseis como gasolina ou diesel. A produção de ICEVs envolve a extração, refinamento e distribuição desses combustíveis, bem como processos de produção dos componentes do motor que são complexos e intensivos em materiais.

Em contraste, os EVs representam um paradigma emergente, alimentados por motores elétricos e baterias. A tecnologia para os EVs exige um conjunto de recursos, especialmente para a produção das baterias de íão de lítio, que inclui a mineração de metais como lítio, cobalto e níquel. A cadeia de fornecimento e os processos de fabrico para EVs são distintos e frequentemente mais intensivos em energia do que aqueles para ICEVs.

As metodologias de ACV para ICEVs tradicionalmente focam em emissões de escape, produção de combustível e os processos de fabrico e descarte do veículo. O impacto

ambiental é frequentemente caracterizado por emissões diretas resultantes da combustão. Para os EVs, as metodologias de ACV expandem o escopo da avaliação para incluir a fonte de eletricidade utilizada para carregar as baterias, o que introduz variabilidade com base no mix energético regional. Além disso, a produção de baterias e a gestão do seu fim de vida, incluindo a reciclagem, são fatores críticos que podem alterar significativamente os resultados da ACV para os EVs.

A fase de produção dos EVs é significativamente mais intensiva em energia — aproximadamente 15-20% superior — principalmente devido ao fabrico das baterias, quando comparada aos ICEVs. A pegada de carbono da produção de baterias pode ser substancial, contribuindo para um maior impacto ambiental inicial dos EVs [22].

No entanto, durante a fase operacional, os EVs demonstram uma redução substancial nas emissões de gases de efeito de estufa — cerca de 40-60% menor — comparativamente aos ICEVs. Este dado é apoiado pelo Conselho Internacional do Transporte Limpo (ICCT), que enfatiza que os EVs, ao operarem com eletricidade proveniente de fontes de gás natural ou renováveis, podem reduzir para metade as emissões de GEE ao longo do ciclo de vida em relação aos ICEV.

Ao longo de todo o seu ciclo de vida, os EVs podem exibir uma redução de 10-24% nas emissões de GEE em comparação com os ICEVs [3]. Espera-se que este potencial de redução aumente com maior penetração de energias renováveis no mix energético, com algumas projeções sugerindo que os EVs poderiam alcançar até 70% de redução nas emissões de GEE ao longo do ciclo de vida até 2050, conforme previsto pelo Departamento de Energia dos EUA.

A implementação de melhorias na tecnologia de baterias e nos processos de reciclagem podem contribuir para essa redução. A utilização de métodos de reciclagem eficientes para os componentes das baterias, permitiria aos EVs, potencialmente alcançar uma redução de 30% em comparação com os ICEVs [23].

É importante realçar que esses valores estão sujeitos a mudanças com os avanços tecnológicos, diferenças regionais na produção de energia e melhorias na eficiência dos ICEVs e EVs. Assim, os resultados da ACV oferecem uma visão dinâmica que deve ser continuamente atualizada para refletir os últimos desenvolvimentos tecnológicos e o cenário atual do setor energético.

3.4 Consumo de Energia e Perfil de Emissões durante a fase operacional

As Análises do Ciclo de Vida (ACVs) indicam que os veículos elétricos (EVs) geralmente apresentam impactos ambientais inferiores aos ICEVs, especialmente no que diz respeito às emissões de gases de efeito estufa e ao consumo total de energia. No entanto, esses resultados dependem de uma série de fatores, incluindo a composição do mix energético usado para carregar os veículos, os processos de fabrico, e o ciclo de condução.

A conversão de ICEVs para EVs pode gerar benefícios ambientais significativos. A conversão pode reduzir as emissões de CO₂ equivalente em aproximadamente 16%, para um ciclo de

condução avaliado sob condições reais em áreas urbanas, realçando o potencial da transformação de veículos na frota como uma estratégia viável para a transição [24].

A influência do mix energético no desempenho ambiental dos EVs é notável. Em regiões onde a rede elétrica é predominante em combustíveis fósseis, as vantagens dos EVs são marginais em comparação com regiões predominantes em fontes de energia renováveis. Em Itália, apesar de uma grande dependência de combustíveis fósseis, a eficiência das turbinas a gás com ciclo combinado contribui para mitigar o impacto, permitindo que os EVs superem os ICEVs. Contudo, a fase de produção, especialmente a produção de baterias, continua a ser uma importante fonte de encargos ambientais devido às emissões associadas à extração de recursos [4].

A variabilidade nas reduções das emissões entre diferentes regiões, como o Brasil e a Itália, complica ainda mais a ACV dos EVs. No Brasil, a elevada penetração de energia renovável na composição elétrica aumenta significativamente as vantagens ambientais dos EVs. Essa variabilidade regional destaca o papel crucial das políticas energéticas locais e da infraestrutura na determinação da sustentabilidade geral da adoção de EVs [25].

A análise abrangente dos ciclos de vida dos EVs revela que, embora a fase de fabrico seja mais intensiva em energia, especialmente devido à produção de baterias, a fase operacional dos EVs geralmente apresenta um consumo de energia e emissões significativamente menores em comparação aos ICEVs. O que enfatiza a importância de avanços na tecnologia de baterias e na eficiência do ciclo de vida dos materiais para reduzir a pegada ambiental dos EVs.

Embora os EVs ofereçam benefícios ambientais substanciais em comparação aos ICEVs, essas vantagens dependem fortemente de uma confluência de fatores, incluindo a fonte de eletricidade, avanços na tecnologia de baterias e gestão do ciclo de vida do veículo. É essencial considerar esses fatores para maximizar os benefícios dos EVs e promover um sistema de transporte mais sustentável.

3.4.1 Análise do Mix Energético

A energia renovável desempenha um papel crucial na redução das emissões ao longo do ciclo de vida dos veículos elétricos (EVs). A transição de combustíveis fósseis para fontes renováveis, como solar, eólica e hidroelétrica, reduz drasticamente a pegada de carbono associada à eletricidade usada na produção e operação dos EVs. A integração de energia renovável na rede elétrica pode reduzir as emissões de carbono dos EVs em até 70% em comparação com os veículos convencionais [26]. Além disso, um relatório da Agência Internacional de Energia Renovável (IRENA, 2018) enfatiza que a expansão da capacidade de produção renovável é essencial para alcançar reduções significativas nas emissões globais do transporte.

Girardi, Gargiulo & Brambilla (2015) realizaram um estudo ACV detalhado assente no mix energético italiano, que é notavelmente dependente de combustíveis fósseis, nomeadamente o carvão. No entanto, as centrais de turbinas a gás com ciclo combinado desempenham um papel crucial. Este estudo demonstrou que ajudam a reduzir significativamente a acidificação do ar e as emissões de gases de efeito estufa. A inclusão de turbinas a gás no mix energético

permitiu que os EVs reduzissem impactos ambientais em até 20% em comparação com os ICEVs, evidenciando a utilização de tecnologias eficientes para a produção de eletricidade [4].

Quando analisamos os efeitos da utilização de três mix energéticos distintos: um mix predominante em combustíveis fósseis, outro mix com elevada penetração de energia nuclear e um terceiro dependente de fontes de energia renovável (RES). Os resultados salientam que mix energéticos com uma parcela significativa de energias renováveis ou energia nuclear reduzem drasticamente as emissões de GEE ao longo do ciclo de vida dos EVs, no entanto a variabilidade da energia eólica e solar pode levar a resultados inconsistentes [27].

As mudanças no mix energético, ao longo do tempo na China, incluíram avanços nas tecnologias de geração de eletricidade e expansão dos sistemas de cogeração (CHP). A implementação destas medidas projetou um aumento no potencial de redução de GEE dos EVs em 13,4% até 2020 relativamente aos ICEVs, dependendo da integração de métodos de produção de energia mais avançados e menos intensivos em carbono [28].

As diferenças regionais no mix energético afetam o desempenho ambiental dos veículos elétricos (EVs). Em regiões como a China e a Índia, onde a rede elétrica é fortemente dependente de carvão, os benefícios ambientais esperados dos EVs são substancialmente reduzidos devido à alta intensidade de carbono resultante da produção de energia.

Países como a Noruega e a Islândia, que utilizam uma elevada penetração de fontes de energia renovável, como a energia hídrica e geotérmica, que oferecem um ambiente muito mais favorável à integração dos EVs na frota automóvel. Nestes países, os EVs podem alcançar emissões de ciclo de vida significativamente mais baixas, alinhando-se estreitamente com os objetivos globais de sustentabilidade. A França, com a sua dependência em energia nuclear, oferece um exemplo interessante de como fontes de energia de baixa emissão podem suportar a redução das emissões de GEE dos EVs, ilustrando os impactos variados das estratégias energéticas regionais na sustentabilidade da mobilidade elétrica [28].

3.4.2 Cenários de projeção para 2050

Focando nos impactos ambientais a longo prazo da utilização dos EVs e ICEVs, diversos artigos científicos utilizam cenários de projeção até o ano de 2050. Esses artigos englobam uma variedade de modelos de avaliação para prever mudanças na produção de energia e outros fatores críticos que podem influenciar a análise do ciclo de vida dos veículos.

Em 2013, na Itália o mix energético era dominado por combustíveis fósseis, especialmente carvão e gás natural, que constituía uma parcela significativa do mix. Apesar dessa dependência de combustíveis fósseis, o uso de centrais com turbinas a gás com ciclo combinado permitiu que os EVs reduzissem as emissões de GEE em comparação aos ICEVs em 50%. Em 2030 prevê-se uma redução nas emissões de GEE de cerca de 40% até 2030 [4].

A projeção para o mix elétrico da Itália em 2030 inclui uma combinação de centrais com turbinas a Gás com Ciclo Combinado (CCGT) e centrais a carvão equipadas com sistemas de captura e armazenamento de carbono (CCS). Embora integre unidades CCGT altamente

eficientes que potencialmente aumentam a eficiência geral do setor energético, ainda depende do carvão. Mesmo quando incrementada com tecnologia CCS, o carvão permanece como uma fonte substancial de emissões de GEE. Embora o CCS possa mitigar algumas dessas emissões, ele não as elimina completamente [4].

Paralelamente, avanços nas tecnologias dos ICEVs, que preveem um aumento da eficiência do combustível e a adoção de sistemas híbridos, que devem reduzir significativamente as emissões de carbono até 2030. Esses desenvolvimentos na tecnologia de ICEVs reduzem as vantagens relativas de redução de emissões que os veículos elétricos (EVs) oferecem. Portanto, enquanto a mudança para incorporar CCGT e captura e armazenamento de carbono (CCS) em centrais a carvão representa um passo em direção à descarbonização, a persistência no carvão para a matriz energética resultam em uma margem mais estreita das emissões de GEE comparativamente com outros cenários [4].

3.4.3 Período de Carregamento

O carregamento diurno das baterias, especialmente nos meses de verão, pode reduzir significativamente as emissões de GEE em comparação com o carregamento noturno. Esse efeito deve-se principalmente às maiores contribuições da energia solar fotovoltaica (PV) durante o dia, levando à menor dependência de combustíveis fósseis nesse período. O carregamento noturno tende a depender mais da produção de energia com recurso ao gás natural, especialmente durante os períodos em que a energia solar não está disponível. Esta abordagem sublinha a importância de sincronizar o carregamento dos EVs com períodos de elevada produção renovável para otimizar os benefícios ambientais da mobilidade elétrica [27].

Previsões sugerem que, sem mudanças significativas no mix energético, o carregamento noturno poderia inicialmente contribuir para um aumento das emissões de GEE devido à necessidade de utilizar centrais de pico menos eficientes e mais intensivas em carbono. No entanto, à medida que o carvão é eliminado e substituído por fontes de energia mais limpas até 2030, espera-se que a disparidade das emissões entre o carregamento diurno e noturno diminua, destacando a relação dinâmica entre os padrões de carregamento dos EVs e a evolução da infraestrutura da rede elétrica [29].

O carregamento das baterias dos EVs é um fator crítico na determinação do seu impacto ambiental. A implementação de estratégias de carregamento inteligente que podem se adaptar à natureza variável das fontes de energia, particularmente a disponibilidade de energias renováveis como a energia solar e eólica. Ao alinhar os tempos de carregamento com períodos de baixa procura e elevada produção renovável, não apenas pode aliviar a pressão sobre a rede elétrica, mas também reduzir significativamente a pegada de carbono dos EVs, aprimorando seu papel na transição para um sistema de transporte mais sustentável.

3.4.4 Ciclos de Condução

O impacto dos ciclos de condução no consumo de energia e no desempenho ambiental dos

EVs foi comprovado por diversos estudos que exploram como diferentes comportamentos e condições de condução afetam a eficiência e as emissões.

O perfil de condução afeta significativamente o consumo de energia e o desempenho ambiental dos EVs. Estilos de condução agressivos, envolvendo aceleração e desaceleração num espaço curto de tempo, aumentam o consumo de energia em até 47% em comparação com uma condução moderada. Essa variação sublinha a importância do comportamento do condutor para determinar os benefícios ambientais reais dos EVs. A adoção de hábitos de eco-condução pode reduzir substancialmente tanto o uso de energia quanto as emissões associadas [27].

Períodos de aceleração e travagens constantes em vias movimentadas proporcionam desgaste da bateria e maior consumo energético, o que influencia significativamente as emissões ao longo do ciclo de vida e os custos de manutenção dos EVs. Existe uma clara necessidade de otimizar o uso de EVs em ambientes urbanos para prevenir a degradação prematura da bateria e minimizar os impactos ambientais [30].

As condições reais de condução, especialmente a condução agressiva, aumentam significativamente o consumo de energia em comparação com os ciclos de teste padronizados. Essa discrepância, demonstra que os ciclos de condução real podem levar a emissões significativamente maiores. Essa discrepância afeta a eficiência ambiental percebida dos EVs e pode guiar a indústria automóvel para melhorias futuras na tecnologia dos veículos para um alinhamento com os padrões reais de condução [31].

3.5 Ciclo de Vida dos Materiais (CVM)

Incorporar materiais reciclados na produção dos veículos tem um impacto significativo na avaliação do ciclo de vida (ACV) tanto dos ICEVs quanto dos EVs. O uso de metais e plásticos reciclados pode diminuir a procura de energia e as emissões de GEE associadas à extração e processamento dos materiais. Como tal, a reciclagem dos materiais dos veículos contribui para uma economia circular, minimizando o desperdício e diminuindo a dependência de recursos virgens [32].

3.5.1 Produção das Baterias dos EVs

A produção das baterias é um dos processos mais intensivos em termos energéticos e que contribui para a pegada de carbono dos EVs. As baterias de íão-lítio requerem quantidades significativas de cobalto, lítio e níquel, que apresentam impactos ambientais elevados durante a extração [33] (Majeau-Bettez et al., 2011).

A fase de produção, particularmente a produção dos materiais do cátodo, contribui significativamente para o total de energia e emissões. Os materiais constituintes do cátodo representam de 10 a 50% dos impactos energéticos durante a produção da bateria. Como tal, o potencial da reciclagem para mitigar esses impactos, não só reduzindo a procura por matérias-primas, mas também diminui as emissões totais do ciclo de vida das baterias [23].

As emissões de CO₂ resultantes da produção de um EV são significativamente maiores do que as de um veículo com motor de combustão interna (ICEV). Especificamente, a produção

de um EV na China pode emitir entre 14,6 a 14,7 toneladas de CO₂, o que é aproximadamente 60% superior às emissões de GEE da produção de um ICEV, que situam-se em 9,2 toneladas de CO₂. Esse aumento nas emissões deve-se em grande parte às necessidades energéticas e aos materiais utilizados nas baterias de um EV, particularmente baterias de íon-lítio, e componentes adicionais como os motores de tração e controladores eletrônicos [34].

À escala global a capacidade de produção de células para as baterias de íon-lítio (Li-ion) na Europa, representa menos de 1% da capacidade global. Isso contrasta acentuadamente com o mercado do Leste Asiático, onde a intensidade de carbono dos processos de produção destes elementos é muito superior do que na Europa. Essa disparidade geográfica e capacidade de produção enfatiza a necessidade de a Europa desenvolver as suas próprias infraestruturas para reduzir as emissões relacionadas ao transporte [35].

3.5.2 Fim de Vida das Baterias dos EVs

A reciclagem pirometalúrgica, ou "pyro", é o método mais consolidado e amplamente praticado para a reciclagem das baterias dos veículos elétricos. Inclui processos a elevadas temperaturas para fundição e recuperação de metais. Este método foi industrializado e atualmente é o padrão para a reciclagem de baterias em grande escala devido à sua capacidade de processar grandes volumes e recuperar metais de elevado valor, como o cobalto. Contudo, é um processo que consome muita energia e tem uma pegada de carbono considerável. Para inverter esta situação, seria obrigatório procurar melhorar a eficiência e o desempenho ambiental dos processos pirometalúrgicos, potencialmente através da sua integração com outros métodos de reciclagem para reduzir as emissões e o consumo de energia [36].

A reciclagem hidrometalúrgica, tanto a inorgânica quanto a orgânica, está a assumir-se como uma alternativa menos intensiva em termos energéticos. Envolve a utilização de soluções líquidas para a extração seletiva dos metais das baterias. A lixiviação à base de sulfato é um método em grande escala usado para reciclagem e serve como referência para diversos projetos-piloto ou de demonstração atualmente em desenvolvimento. O principal desafio é melhorar a eficiência de recuperação de todos os materiais valiosos das baterias, incluindo o lítio, e reduzir o impacto ambiental dos processos de lixiviação e recuperação [37].

A reciclagem direta é um método emergente para reduzir emissões e custos. Foca na recuperação e acondicionamento dos elementos do cátodo. Ainda que se encontre em fase de desenvolvimento atualmente, a reciclagem direta é promissora porque mantém o valor dos materiais do cátodo, evitando os processos intensivos em energia resultantes da pirometalurgia e hidrometalurgia. Projetos como o ReCell estão a explorar mecanismos de química redox para a reciclagem direta de forma eficiente dos materiais do cátodo no fim da sua vida útil. Contudo, o processamento de diferentes elementos químicos do cátodo na reciclagem direta permanece um desafio [38].

A reciclagem pirometalúrgica é um método amplamente reconhecido e implementado no setor automóvel, de tal forma que existe um impulso para desenvolver e otimizar métodos de reciclagem mais sustentáveis e eficientes para lidar com o aumento previsto das baterias dos EVs no final da sua vida útil. À medida que o mercado de EVs continua a crescer, o avanço destas tecnologias de reciclagem será crucial para a sustentabilidade ambiental,

nomeadamente a utilização de recursos. Prevê-se que até 2040, desenvolvimentos nos processos de reciclagem das baterias dos EVs poderiam levar a uma redução de 30% nas emissões provenientes do seu fabrico [39].

Como tal, a reciclagem dos materiais dos veículos contribui para uma economia circular, minimizando o desperdício e diminuindo a dependência de recursos virgens [32].

3.5.3 Gestão do Fim de Vida e Aplicações Secundárias

A degradação significativa das baterias de íão de lítio ao longo da sua vida útil requer estratégia para maximizar o seu valor residual. Aplicações de segunda vida, como o uso de baterias para armazenamento de energia em modo estacionário, acrescentando valor e reduzindo o desperdício. Esta abordagem não só suporta a recuperação de materiais, mas também contribui para a sustentabilidade do ecossistema ao prolongar a vida útil das baterias [40].

A fase do fim de vida das baterias pode compensar alguns impactos ambientais se a reciclagem e as aplicações secundárias forem implementadas de forma eficaz. A reutilização das baterias em aplicações menos exigentes pode reduzir significativamente o impacto ambiental do seu ciclo de vida [41].

Com o desenvolvimento e conseqüente penetração de EVs na frota automóvel, países como a China começam a explorar as implicações do crescente volume de baterias no fim de vida, projetando um crescimento significativo do desperdício dos materiais constituintes das baterias, entre 2012 e 2040. A reciclagem poderia fornecer uma proporção significativa dos materiais necessários para a produção de novas baterias, sugerindo um forte incentivo económico para desenvolver infraestruturas robustas de reciclagem. Esta abordagem não só alivia a escassez de matérias-primas, mas também apoia a sustentabilidade ambiental ao reduzir a necessidade de extração de novos materiais [42].

3.6 GREET, Análise *Cradle-to-Grave*

A ferramenta GREET (*Greenhouse Gases, Regulated Emissions, and Energy Use in Technologies Model*) foi desenvolvida pelo Centro de Avaliação de Sistemas do Laboratório Nacional de Argonne (ANL) e foi lançada mais recentemente a versão de 2020. Este software foi disponibilizado para investigação pelo ANL em 1996 com o objetivo de analisar o método WTW, com o passar dos anos e o desenvolvimento realizado na plataforma, incluíram a metodologia CTG para o ciclo de vida dos materiais [47].

O GREET é uma ferramenta transparente para a análise do ciclo de vida (ACV) relativamente aos impactos energéticos e ambientais da utilização de uma variedade de combustíveis e tecnologias de veículos existentes no setor do transporte rodoviário, marítimo, ferroviário e aéreo. O GREET foi desenvolvido em EXCEL e divide-se em duas partes, o programa de simulação dos ciclos do combustível e da fase de utilização dos veículos, ou seja, a análise WTW (GREET 1_2020) e o segundo (GREET 2_2020) foca-se apenas na análise CTG dos materiais que constituem os automóveis. Ambas as folhas de cálculo estão conectadas entre si

pele que as informações introduzidas no GREET 1_2020 vão influenciar significativamente os resultados obtidos nas simulações realizadas no GREET 2_2020, em termos de consumo de energia e emissões de poluentes [47].

A folha de cálculo do GREET 1_2020 é composta por 45 folhas de Excel, onde constam diversos fluxos de combustível e tecnologias. Para a realização da dissertação, as folhas de cálculo importantes e relevantes são: *Inputs*, *Results*, *Electric*, *Fuel_Prod_TS*. A folha de Excel dos *Inputs*, é onde constam os parâmetros-chave que o próprio utilizador pode especificar para as simulações no GREET relativamente á produção dos diversos combustíveis como a gasolina, gasóleo, bioetanol, hidrogénio e muitos outros. Nos *Inputs* determinam-se as eficiências dos processos envolvidos na produção de cada combustível (extração, refinação, produção), incluindo também o ciclo da eletricidade, sendo necessário especificar qual o mix energético a ser utilizado para o transporte e uso estacionário, em percentagem por tipo tecnologia. A folha de Excel dos *results* expõe o consumo de energia e as respetivas emissões de poluentes para as tecnologias em estudo, os resultados são apresentados em formato de análise WTW e WTT [48].

U.S. Mix: Transportation Use						U.S. Mix: Stationary Use					
	41.7%	2.4%	42.7%	10.5%	2.7%	41.7%	2.4%	42.7%	10.5%	2.7%	
	41.7%	2.4%	42.7%	10.5%	2.7%	41.7%	2.4%	42.7%	10.5%	2.7%	
5-year period	Hydroelectric	Geothermal	Wind	Solar PV	Others	5-year period	Hydroelectric	Geothermal	Wind	Solar PV	Others
1990	88.7%	4.6%	1.8%	0.0%	4.8%	1990	88.7%	4.6%	1.8%	0.0%	4.8%
1995	88.7%	4.6%	1.8%	0.0%	4.8%	1995	88.7%	4.6%	1.8%	0.0%	4.8%
2000	88.7%	4.6%	1.8%	0.0%	4.8%	2000	88.7%	4.6%	1.8%	0.0%	4.8%
2005	84.2%	4.6%	5.6%	0.0%	5.6%	2005	84.2%	4.6%	5.6%	0.0%	5.6%
2010	67.2%	3.9%	24.4%	0.3%	4.1%	2010	67.2%	3.9%	24.4%	0.3%	4.1%
2013	56.5%	3.4%	34.8%	1.9%	3.4%	2013	56.5%	3.4%	34.8%	1.9%	3.4%
2014	53.4%	3.2%	36.3%	3.5%	3.5%	2014	53.4%	3.2%	36.3%	3.5%	3.5%
2015	50.4%	3.2%	38.0%	4.9%	3.6%	2015	50.4%	3.2%	38.0%	4.9%	3.6%
2016	47.6%	2.8%	40.0%	6.3%	3.3%	2016	47.6%	2.8%	40.0%	6.3%	3.3%
2017	47.0%	2.5%	39.5%	8.2%	2.8%	2017	47.0%	2.5%	39.5%	8.2%	2.8%
2018	43.0%	2.5%	41.4%	10.1%	3.0%	2018	43.0%	2.5%	41.4%	10.1%	3.0%
2019	41.7%	2.4%	42.7%	10.5%	2.7%	2019	41.7%	2.4%	42.7%	10.5%	2.7%
2020	38.6%	2.2%	44.4%	12.3%	2.4%	2020	38.6%	2.2%	44.4%	12.3%	2.4%
2025	26.3%	1.8%	46.0%	21.7%	4.2%	2025	26.3%	1.8%	46.0%	21.7%	4.2%
2030	22.6%	2.1%	40.4%	28.6%	6.4%	2030	22.6%	2.1%	40.4%	28.6%	6.4%
2035	21.4%	2.6%	38.7%	28.8%	8.6%	2035	21.4%	2.6%	38.7%	28.8%	8.6%
2040	19.4%	2.9%	36.2%	32.7%	8.7%	2040	19.4%	2.9%	36.2%	32.7%	8.7%
2045	16.8%	2.8%	33.2%	39.2%	8.1%	2045	16.8%	2.8%	33.2%	39.2%	8.1%
2050	15.4%	2.8%	32.6%	41.1%	8.2%	2050	15.4%	2.8%	32.6%	41.1%	8.2%

Figura 3.3 - Inputs mix energético software GREET 2020, fontes que implicam combustão [48].

A folha de cálculo *Electric*, apresenta os cálculos para a produção de eletricidade, nomeadamente a utilização de energia, emissões e consumo de água despendido, incluindo as perdas de distribuição e transmissão da rede elétrica.

O mix energético é selecionado na folha de Excel *Fuel_Prod_TS*, onde constam tabelas temporais dos principais processos envolvidos na fase de WTT. Nesta folha de Excel o utilizador especifica a composição do combustível e fontes de energia que irão compor o mix elétrico. Caso não seja necessário ou relevante para o estudo, encontram-se disponíveis várias opções de mixes predefinidos. Esta é uma etapa muito significativa para a concretização da análise ACV, visto que grande parte dos processos envolvidos no ciclo de vida consomem eletricidade indireta ou diretamente. O mix energético, é definido em percentagem das fontes de energia, e determina a contribuição de cada tecnologia selecionada para a produção de 1 kWh de eletricidade [48]. Nas figuras [3.6; 3.7], estão representados os mix energéticos para fontes não renováveis e renováveis, disponibilizados pelo GREET_2020.

A folha de cálculo GREET 2_2020 é composta por 45 folhas de Excel onde é possível simular três tipos de veículos distintos, um veículo pesado similar a um camião de recolha, um veículo de passageiros desportivo e um veículo ligeiro de passageiros, para as seguintes tecnologias automóveis: motor de combustão interna (ICEV), híbridos (HEV), bateria elétrica (BEV), híbridos plug-in (PHEV) e veículos com células de combustível (FCHEV).

A folha de cálculo *Vehi_inputs* contém células para o utilizador especificar as características dos veículos que se pretende simular, como o tipo de veículo e bateria, massa total, densidade energética da bateria e composição do cátodo. A folha de Excel *Mat_Inputs* permite especificar a composição dos componentes dos veículos e da própria bateria. Também é possível modificar a fração do material utilizado, sendo que pode ser composto de materiais virgens ou reciclados. No capítulo 4.3 estão apresentados os resultados obtidos para o cenário em que os automóveis são concebidos com materiais 100% reciclados [48].

U.S. Mix: Transportation Use							U.S. Mix: Stationary Use						
0.4% 36.7% 24.6% 20.4% 0.3% 17.5%							0.4% 36.7% 24.6% 20.4% 0.3% 17.5%						
0.4% 36.7% 24.6% 20.4% 0.3% 17.5%							0.4% 36.7% 24.6% 20.4% 0.3% 17.5%						
5-year period	Residual Oil	Natural Gas	Coal	Nuclear	Biomass	Others	5-year period	Residual Oil	Natural Gas	Coal	Nuclear	Biomass	Others
1990	4.2%	12.3%	52.5%	19.0%	1.1%	10.9%	1990	4.2%	12.3%	52.5%	19.0%	1.1%	10.9%
1995	2.2%	14.8%	51.0%	20.1%	1.2%	10.7%	1995	2.2%	14.8%	51.0%	20.1%	1.2%	10.7%
2000	2.9%	15.8%	51.7%	19.8%	1.1%	8.7%	2000	2.9%	15.8%	51.7%	19.8%	1.1%	8.7%
2005	2.9%	15.7%	51.7%	20.3%	1.2%	8.2%	2005	2.9%	15.7%	51.7%	20.3%	1.2%	8.2%
2010	0.9%	22.7%	46.0%	20.3%	0.3%	9.8%	2010	0.9%	22.7%	46.0%	20.3%	0.3%	9.8%
2013	0.6%	26.2%	40.3%	20.2%	0.3%	12.3%	2013	0.6%	26.2%	40.3%	20.2%	0.3%	12.3%
2014	0.7%	26.2%	39.8%	20.2%	0.4%	12.6%	2014	0.7%	26.2%	39.8%	20.2%	0.4%	12.6%
2015	0.7%	31.6%	34.2%	20.3%	0.4%	12.8%	2015	0.7%	31.6%	34.2%	20.3%	0.4%	12.8%
2016	0.6%	32.7%	31.4%	20.5%	0.3%	14.5%	2016	0.6%	32.7%	31.4%	20.5%	0.3%	14.5%
2017	0.5%	30.6%	31.0%	20.9%	0.4%	16.6%	2017	0.5%	30.6%	31.0%	20.9%	0.4%	16.6%
2018	0.4%	33.4%	29.0%	20.3%	0.3%	16.5%	2018	0.4%	33.4%	29.0%	20.3%	0.3%	16.5%
2019	0.4%	36.7%	24.6%	20.4%	0.3%	17.5%	2019	0.4%	36.7%	24.6%	20.4%	0.3%	17.5%
2020	0.4%	36.8%	22.8%	20.3%	0.3%	19.4%	2020	0.4%	36.8%	22.8%	20.3%	0.3%	19.4%
2025	0.3%	36.4%	17.7%	18.3%	0.3%	27.1%	2025	0.3%	36.4%	17.7%	18.3%	0.3%	27.1%
2030	0.2%	34.4%	18.1%	16.3%	0.3%	30.7%	2030	0.2%	34.4%	18.1%	16.3%	0.3%	30.7%
2035	0.2%	36.0%	17.1%	15.0%	0.3%	31.4%	2035	0.2%	36.0%	17.1%	15.0%	0.3%	31.4%
2040	0.2%	36.4%	15.9%	14.3%	0.3%	33.0%	2040	0.2%	36.4%	15.9%	14.3%	0.3%	33.0%
2045	0.1%	35.1%	14.9%	13.5%	0.3%	36.1%	2045	0.1%	35.1%	14.9%	13.5%	0.3%	36.1%
2050	0.1%	35.1%	14.3%	12.9%	0.3%	37.3%	2050	0.1%	35.1%	14.3%	12.9%	0.3%	37.3%

Figura 3.4 - Inputs mix energético software GREET 2020, fontes de energia renováveis [48].

Neste software estão incluídas folhas de cálculo referentes à extração de matérias-primas como o níquel, cobre ou ferro e a sua posterior integração nos componentes dos veículos, onde constam o consumo de energia e emissões de poluentes.

Com as informações introduzidas nas folhas de Excel mencionadas acima, é possível simular e obter resultados relativos ao ciclo de vida dos materiais. Os mesmos encontram-se representados nas seguintes folhas de cálculo: *Mat_Sum*, *Battery_Sum*, *Vehi_ADR*, *Vehi_Sum*.

A folha de Excel *Mat_Sum* e *Battery_Sum* representam os dados obtidos referentes aos materiais incorporados nos veículos e para a respetiva produção das baterias. A folha de cálculo *Vehi_ADR* contém os resultados referentes aos processos de montagem, reciclagem e eliminação dos automóveis [48]. A folha Excel *Vehi_Sum* apresenta os resultados obtidos para o ciclo de vida dos materiais.

3.7 Avanços Tecnológicos dos Veículos

Os avanços tecnológicos no setor automóvel têm um impacto profundo nos resultados da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), especialmente através de melhorias na eficiência do

combustível, tecnologias de baterias e na incorporação de materiais de EVs. Estudos indicam que os avanços na tecnologia de baterias de EVs não só ampliam a autonomia, mas também reduzem significativamente o consumo energético e as emissões de carbono associadas à produção e reciclagem [3].

As futuras mudanças no design dos veículos são cada vez mais influenciadas por critérios de sustentabilidade, que são integrais para reduzir o impacto ambiental ao longo do ciclo de vida. A integração de designs modulares que facilitam a desmontagem e reciclagem é um exemplo. A introdução de componentes modulares permite melhorar a eficiência nos processos de fabrico e de reciclagem no fim da vida útil, levando a reduções significativas das emissões de GEE [43].

A incorporação de novos materiais, como fibra de carbono e polímeros à base de bio, está a revolucionar a indústria automóvel. Esses materiais oferecem reduções significativas de peso, que se traduzem diretamente num menor consumo de energia durante a fase operacional do veículo. A utilização de materiais mais leves nas estruturas dos veículos reduz o peso total dos veículos, diminuindo substancialmente as emissões de GEE durante a fase operacional [44]. Além disso, a adoção de novos métodos incluindo processos livres de solventes e sistemas de produção assentes em energia renovável, aprimoram ainda mais o perfil ambiental da indústria.

À medida que esses avanços tecnológicos são integrados ao design e à produção de veículos, espera-se que os resultados do ACV continuem a evoluir. A indústria automóvel está a viver uma mudança de paradigma em direção a práticas mais sustentáveis, impulsionada pela inovação tecnológica e pelo crescente interesse do consumidor por tecnologias de mobilidade mais sustentáveis.

3.8 Implicações Políticas com Base nos Resultados da ACV

Os resultados da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) fornecem uma base ampla para o desenvolvimento de políticas ambientais voltadas para o setor automóvel. Desta forma, a ACV oferece uma medida dos impactos ambientais em diferentes etapas do ciclo de vida de um automóvel, permitindo formular políticas e identificar as áreas-chave, onde intervenções podem surtir maior efeito. Os resultados da ACV influenciam as políticas internas dos países e incentivam o setor automóvel a adotar novas fontes de energia, nomeadamente energia renovável, para minimizar a pegada carbónica dos EVs [45].

Os resultados do ACV são muito importantes, não apenas no desenvolvimento de políticas, mas na mudança de comportamento dos consumidores e nas normas da indústria. Tornar os resultados acessíveis aos consumidores pode resultar em escolhas mais informadas de veículos com menores impactos ambientais. Nos Estados Unidos, o uso de resultados de ACV através da Agência de Proteção Ambiental (EPA) permite que o consumidor compare veículos com base no desempenho ambiental. Além disso, o relatório de sustentabilidade e a certificação verde na indústria automobilística estão em tendência ascendente. A metodologia de ACV frequentemente determina o padrão da indústria, que atua como um indutor para o fabricante investir em tecnologias mais limpas e processos de fabrico sustentáveis, para

atender a esses critérios.

3.9 Desafios e Limitações da ACV no Setor Automóvel

Aplicar a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) aos veículos apresenta vários desafios, resultantes da complexidade e diversidade da cadeia de fornecimento. Um dos principais desafios é a quantificação precisa dos impactos ambientais em diferentes estágios do ciclo de vida, que podem variar significativamente dependendo do tipo de veículo e da sua cadeia de abastecimento. A variabilidade nos métodos de produção de eletricidade regionalmente afeta significativamente os resultados da ACV para os veículos elétricos (EVs) [3]. Outro desafio é o ritmo acelerado de mudança tecnológica dentro da indústria, especialmente em tecnologias de baterias para os EVs, que requerem atualizações contínuas nas bases de dados de ACV para garantir relevância e precisão dos resultados.

Os estudos atuais de ACV frequentemente lutam com a falta de dados abrangentes e transparentes, especialmente relacionados à cadeia de abastecimento *upstream* e ao processamento dos veículos no fim de vida. Essa lacuna de dados pode levar a incertezas nos resultados do ACV, proporcionando desafios à avaliação precisa das emissões dos veículos [46]. Além disso, a maioria das ACVs foca em impactos ambientais diretos como as emissões de dióxido de carbono e o consumo energético e menos em outros impactos como a perda de biodiversidade, implicações sociais e fatores econômicos, que geralmente fornecem uma visão mais holística da sustentabilidade da própria tecnologia automóvel.

Para melhorar a robustez dos estudos de ACV, há uma necessidade de metodologias mais padronizadas que possam acomodar diferentes tipos de veículos e as suas respectivas tecnologias. Aumentar a colaboração em toda a indústria para compartilhar dados e melhores práticas também pode levar a avaliações mais precisas e abrangentes.

Incorporar a variabilidade do mundo real, como condições meteorológicas, manutenção dos veículos e comportamento do condutor, nos modelos de ACV apresenta desafios significativos. Esses fatores podem influenciar o desempenho ambiental real dos veículos. A eficiência real dos ICEVs pode variar substancialmente das condições padrão dos testes realizados, afetando as estimativas das emissões e do consumo de energia. Da mesma forma, que o comportamento de carregamento dos proprietários de EVs, que muitas vezes depende de fatores imprevisíveis como a geografia e principalmente o clima, pode impactar o uso real de energia dos EVs.

A aplicação da ACV no setor automóvel, embora inestimável, enfrenta vários desafios e limitações que precisam ser abordados para melhorar sua eficácia e precisão. Esforços futuros devem focar na redução de lacunas nos dados, na introdução de novas metodologias e incorporação de métricas mais amplas para captar de forma integral os impactos ambientais do ciclo de vida dos veículos.

3.10 Revisão Bibliográfica – Considerações Finais

A transição para veículos elétricos (EVs) representa uma mudança significativa no paradigma da mobilidade, prometendo reduções substanciais nas emissões de GEE e outros poluentes. No entanto, a eficácia dessa mudança é profundamente influenciada por diversos fatores, que foram explorados em detalhe através desta revisão bibliográfica.

A sustentabilidade dos EVs está intrinsecamente ligada à composição da energia utilizada para carregar as suas baterias. Regiões que integram uma elevada proporção de energia renovável na sua matriz energética, como a Noruega e a Islândia, conseguem maximizar os benefícios ambientais dos EVs, capitalizando sobre a baixa intensidade de carbono da produção dessa energia. Por outro lado, em locais onde o mix energético é dominado por combustíveis fósseis, como na China e na Índia, os benefícios ambientais dos EVs são notavelmente atenuados. Este contraste destaca a necessidade crítica de políticas energéticas que favoreçam o uso de fontes renováveis, com o objetivo de potencializar os ganhos ambientais dos EVs.

A eficiência operacional dos EVs pode variar significativamente com o comportamento do condutor. Estilos de condução agressivos, caracterizados por acelerações e desacelerações num espaço curto de tempo, podem aumentar o consumo de energia em até 47%, comprometendo os benefícios ambientais desses veículos. Portanto, incentivar a práticas de eco-condução não apenas otimiza o desempenho energético dos EVs, mas também contribui para uma redução mais ampla das emissões de poluentes.

A escolha do período para carregar os EVs é fundamental. Carregar durante o dia em regiões com elevada disponibilidade de energia solar, por exemplo, pode reduzir significativamente a pegada de carbono associada ao uso de EVs. A sincronização do carregamento dos EVs com a produção de energia renovável minimiza a dependência de fontes energéticas intensivas em carbono, alinhando o uso de EVs com os objetivos de sustentabilidade ambiental.

A produção de baterias para os EVs impõe consideráveis desafios ambientais, dada a intensidade de recursos e energia requerida, especialmente para a extração de metais como o cobalto, lítio e níquel. Contudo, estratégias eficazes de reciclagem e reutilização das baterias podem atenuar esses impactos. A adoção de práticas de reciclagem e o desenvolvimento de aplicações secundárias para as baterias em final de vida podem reduzir a necessidade de extração de novos materiais e assim diminuir a quantidade de resíduos, fomentando uma economia circular sustentável.

A ACV desempenha um papel fundamental na transição da indústria automóvel para a mobilidade sustentável, fornecendo uma estrutura abrangente para avaliar os impactos ambientais dos veículos desde a sua produção até o descarte. Esta abordagem holística ajuda fabricantes e consumidores a tomar decisões mais informadas alinhadas com os objetivos de sustentabilidade. Os resultados da ACV podem orientar a formulação de políticas e incentivos para o uso de energia renovável, todos essenciais para promover tecnologias mais limpas e eficientes em termos energéticos.

Além disso, espera-se que a aplicação da ACV se difunda à medida que a sustentabilidade se torne cada vez mais integral e essencial às estratégias corporativas e preferências dos

consumidores. Pretende-se ver maior transparência nos resultados da ACV, impulsionada pela procura dos consumidores por informações detalhadas sobre os produtos que adquirem. O que poderia levar ao desenvolvimento de novos padrões que tornam os dados do ACV mais acessíveis e compreensíveis para o público.

Um desenvolvimento antecipado é a integração de dados em tempo real nos modelos de ACV, melhorando a sua precisão e capacidade de resposta. Além disso, à medida que novos materiais e tecnologias emergem, especialmente na produção e reciclagem de baterias, os métodos de ACV necessitam de se adaptar para avaliar corretamente os tipos diferentes de veículos e as suas especificações.

Concluindo, os veículos elétricos oferecem um potencial considerável para mitigar o impacto ambiental do setor do transporte. No entanto, para concretizar plenamente o seu potencial, é imperativo que políticas e práticas se alinhem para promover não apenas a adoção de EVs, mas também a implementação de infraestruturas de apoio e tecnologias que maximizem os seus benefícios. O sucesso na redução da pegada ecológica dos EVs depende de uma abordagem integrada que considere todos os aspetos do seu ciclo de vida e operação.

4. Métodos e Casos de Estudo

4.1 Mercado automóvel português

Para a escolha e seleção dos automóveis que se pretende simular e analisar o seu ciclo de vida completo, recorreu-se a estatísticas do mercado automóvel em Portugal (ACAP) [19], de modo a compreender quais são os veículos mais adquiridos pelos portugueses nos últimos 4 anos (2017-2020).

Para os veículos convencionais com motor de combustão interna (ICEV), as marcas automóveis que comercializaram mais unidades foi a RENAULT, PEUGEOT e MERCEDES-BENZ respetivamente. Para o período mencionado acima, a Renault comercializou 104359 unidades com uma penetração no mercado automóvel de 13.2%, seguido da Peugeot com 80654 unidades comercializadas e com uma taxa de penetração de 10.3%. A Mercedes-Benz vendeu 61073 unidades e possui uma penetração no mercado automóvel em Portugal de 8.0%.

Com recurso às estatísticas da ACAP, realizou-se a mesma análise para os veículos elétricos a bateria, e conclui-se que para o período considerado, a Nissan é a marca automóvel que mais comercializa este tipo de veículos com um total de 4782 unidades, seguido da Renault com 4268 unidades comercializadas e por último a Tesla que para os anos de 2017 e 2018, não existem dados disponíveis para os modelos comercializados em Portugal, contudo nos dois anos seguintes foi a marca de EVs que mais comercializou este tipo de tecnologia, com um total de 3392 unidades vendidas [19].

Tabela 4.1 - Automóveis ligeiros de passageiros ICEV e BEV comercializados por tipo de marca, entre 2017 e 2020. [20]

Marcas Automóveis ICEV	2017	2018	2019	2020	Total
RENAULT	30112	31215	26843	16189	104359
PEUGEOT	21102	22977	22058	14517	80654
MERCEDES-BENZ	16272	16464	15419	12918	61073
Marcas Automóveis BEV	2017	2018	2019	2020	Total
NISSAN	318	1593	1696	1175	4782
RENAULT	751	1305	968	1244	4268
TESLA	0	0	1979	1413	3392

Após análise dos dados confirma-se que a Renault e a Nissan, dominam o mercado automóvel em Portugal, para diferentes tecnologias. Por forma a melhor compreender as diferenças de performance entre os automóveis convencionais (ICEV) e elétricos (EV), foram selecionados os seguintes veículos para simulação: Renault Clio TCe100 (gasolina), Renault Clio Blue dci 85 (gasóleo), Nissan Leaf (elétrico) e o Nissan Leaf e+ (elétrico).

Posto esta fase de seleção, procedeu-se á recolha dos relatórios técnicos para cada automóvel, onde foram recolhidos os dados referentes ao combustível, performance, autonomia, consumo energético e respetivas emissões de GEE [49], [50], [51], [52], [53], [54].

Na tabela [4.2], estão representadas as massas dos veículos e das baterias de apoio e propulsão, em quilogramas, para os automóveis em estudo.

Tabela 4.2 - Massa dos automóveis selecionados e respetivas baterias de apoio e propulsão [50], [53].

Massa do veículo e baterias	ICEV Gasolina	ICEV Gasóleo	BEV	BEV +
Massa Total do Veículo [kg]	1065	1164	1544	1631
Massa Bateria de Apoio [kg]	16.3	16.3	10.0	10.0
Massa Bateria de Propulsão [kg]	-	-	303	376

Conforme se pode observar, a massa das baterias dos veículos, aumenta consideravelmente consoante a capacidade de armazenamento necessário, que é substancialmente elevado para a tecnologia dos veículos a bateria de propulsão elétrica (BEV). A composição da bateria para os ICEVs é de chumbo ácido, enquanto as baterias usadas nos EVs são compostas por íões de lítio.

Na tabela [4.3], estão representadas as massas dos fluídos dos veículos [48], o óleo de motor que tem como propósito lubrificar, restaurar e proteger o desempenho do motor entre os componentes, contudo para a tecnologia BEV essa necessidade é inexistente, sendo, portanto,

a maior diferença entre ambas as tecnologias ICEV e BEV ao nível dos fluídos. De notar, que os EVs apenas utilizam 7.3% dos fluídos de transmissão comparativamente aos veículos convencionais, os restantes fluídos incorporados nos veículos são similares para ambas as tecnologias, nomeadamente os fluídos de refrigeração, limpa para-brisas e os agentes adesivos.

Tabela 4.3 - Massas dos fluídos constituintes dos veículos, em quilogramas [48].

Fluídos	ICEV (kg)	EV (kg)
Óleo do motor	4.9	0.0
Direção Assistida	0.0	0.0
Travões	0.9	0.9
Transmissão	14.3	1.1
Refrigeração	13.2	9.1
Limpa Pára-Brisas	4.8	4.8
Agentes Adesivos	18.1	18.1

A respeito das características de performance e combustível dos automóveis, o Renault Clio TCe100 tem um ICE com uma potência de 74 kW, o Renault Clio Blue dci 85 possui um ICE com uma potência de 63 kW, o Nissan Leaf possui um motor elétrico de 110 kW e o Nissan Leaf e+ tem incorporado um motor elétrico de 160 kW. Os dados foram recolhidos através dos relatórios técnicos oficiais dos fabricantes automóveis onde constam as especificações dos ICEVs e EVs, referentes a dados de performance, combustível, consumo energético e emissões de CO₂ [50], [55].

O ciclo de condução WLTP baseia-se em dados reais de condução durante um período de 30 minutos e essencialmente representam resultados mais precisos referentes ao consumo e emissões de poluentes durante um dia de condução, considerando o tipo de veículo e respetivo equipamento. Estes veículos são então testados para um espetro diversificado de ciclos de condução urbana, suburbana e uma combinação de ambos, por forma a dar a conhecer aos proprietários dos automóveis uma análise de desempenho e performance realista e o mais precisa possível [56].

4.2 Padrões de mobilidade das áreas metropolitanas de Lisboa e Porto

De modo a compreender o comportamento de um condutor que seja proprietário de um dos veículos, foram utilizados os resultados de um inquérito ao setor da mobilidade conduzido pelo Instituto Nacional de Estatística (INE), em Portugal, para as grandes áreas metropolitanas de Lisboa e Porto [57].

Tabela 4.4 - Dados do Inquérito á mobilidade realizado em Portugal, para um condutor automóvel a residir nas áreas metropolitanas de Lisboa e Porto [57].

Dados Inquérito	Lisboa	Porto
Deslocação diária por pessoa	2.6	2.7
Deslocações Anuais [dias]	343	343
Distância média por deslocação [km]	12.8	11.4
Distância Anual [km]	11415	10636

Para modelar a fase de TTW recorreu-se ao ciclo de condução de homologação e estatísticas, presentes no inquérito. Recolheram-se os dados afetos às deslocações por dia por pessoa móvel, dias por ano de deslocações e distância média por deslocação. Como tal, um condutor a circular em Portugal, desloca-se 2.60 e 2.72 vezes por dia ao longo de uma duração de 343 dias por ano, para uma distância média diária de 12.8 km e 11.4 km para Lisboa e Porto respetivamente [57].

Na tabela [4.4], estão representados os dados recolhidos através do inquérito á mobilidade realizado para as áreas metropolitanas de Lisboa e Porto [57]. A partir dos dados foi possível determinar a distância anualmente percorrida por cada um dos condutores, o que permitiu modelar a fase TTW para o seu tempo de vida designado.

De notar, que o valor atribuído para as deslocações anuais, neste caso 343 dias reflete o número de dias existentes num ano ao que foi retirado um período de férias de 22 dias, em que não foram contabilizados qualquer tipo de deslocações.

4.3 Etapas da avaliação do ciclo de vida (ACV) dos automóveis

4.3.1 Análise *Well-to-Wheels* (WTW)

A designação "*well-to-wheel*" engloba toda a cadeia de fluxo energético desde a extração da fonte energética até ao movimento do veículo. Especificamente, o processo *well-to-wheel* dos veículos com motorização a combustão interna (ICEVs) compreende sete etapas:

(1) extração (poço), (2) transporte, (3) refinação, (4) distribuição, (5) combustão no motor, (6) sistema de transmissão de força, e (7) roda. Por outro lado, o processo *well-to-wheel* dos veículos elétricos (EVs) inclui nove etapas: (1) extração (poço), (2) transporte, (3) refinação, (4) distribuição, (5) geração de energia, (6) transmissão e distribuição de energia, (7) carregamento, (8) motor e (9) roda.

Esta abordagem é aplicada para comparar as emissões de gases com efeito de estufa (GEE) associadas aos EVs com as dos ICEVs, considerando integralmente a cadeia de fornecimento da fonte de energia para cada tecnologia veicular.

O processo *well-to-wheel* dos ICEVs consiste essencialmente em dois processos principais: o primeiro é o processo de extração da fonte de energia, o seu transporte e armazenamento no veículo (*well-to-tank*), e o segundo é o processo de condução do carro utilizando a energia armazenada (*tank-to-wheel*). As emissões de GEE dos ICEVs, numa perspetiva *well-to-wheel*,

são a soma das emissões dos processos WTT e TTW. Isso pode ser calculado utilizando a seguinte equação:

$$ICEV_GEE_{WTW} = (GEE_{WtT} + GEE_{TtW}) \times FE$$

Na Eq. (1), $ICEV_GEE_{WTW}$ é o total de GEE que um ICEV emite do ponto de vista *well-to-wheel* e é medido em gCO₂eq/km. Os termos GEE_{WtT} e GEE_{TtW} representam o total de emissões de GEE dos processos WTT e TTW, respetivamente, e são medidos em gCO₂eq/L. FE refere-se à eficiência de combustível de um ICEV, que é medida em L/km.

O processo *well-to-wheel* dos EVs compreende dois passos principais. O primeiro é o processo de extração da fonte de energia e transporte para a central elétrica (*well-to-power plant*), e o segundo é o processo de transmissão da eletricidade para o carro e condução (*power plant-to-wheel*). Assim, as emissões *well-to-wheel* de GEE de um BEV são a soma das emissões dos processos *well-to-power plant* e *power plant-to-wheel*. Isto pode ser calculado utilizando a equação (2) abaixo:

$$EV_GEE_{WTW,j} = \left\{ \sum_e M_{e,j} \times (GEE_{e,WtT} + GEE_{e,TtW}) \right\} \times CE$$

$j = \{\text{Portugal, França, Reino Unido}\}$

$e = \{\text{Carvão, Gás Natural, Solar Fotovoltaico, Eólica, ...}\}$

Nesta fórmula, $EV_GEE_{WTW,M}$ é o total de emissões de GEE emitidos por um EV do ponto de vista *well-to-wheel* e é medido em gCO₂eq/km. $M_{e,j}$ representa a distribuição das fontes de energia no mix energético do país j . $GEE_{e,WtT}$ e $GEE_{e,TtW}$ são as emissões de GEE resultante dos processos WTT e TTW. As emissões são medidas em gCO₂eq/kWh. CE refere-se ao consumo energético dos EVs e é medido em kWh/km.

4.3.2 Análise *Well-to-Wheels* (ICEV)

A etapa do ciclo de vida dos combustíveis WTT para os veículos convencionais (gasolina e gasóleo) e elétricos é bastante distinta, sendo uma das principais diferenças entre ambas as tecnologias automóveis.

Para modelar a fase de WTT para os ICEV, primeiramente definiram-se os fatores de emissão da gasolina e do gasóleo de acordo com o *Joint Research Centre* [58], que englobam os processos desde a extração da matéria-prima até à comercialização do produto final nas gasolinas.

A tabela [4.5] apresenta os fatores de emissão do produto final gasóleo e gasolina e a densidade energética utilizada no cálculo das emissões.

Tabela 4.5 - Fator de emissão da gasolina e gásóleo e respetiva densidade energética dos dois combustíveis [58].

Fatores de Emissão	Gasolina	Gasóleo
Emissões (WTT) [gCO ₂ eq/MJ]	13.8	15.4
Emissões (TTW) [gCO ₂ eq/MJ]	73.4	73.2
Densidade Energética [MJ/L]	34.2	38.6
Consumo Energético [l/km]	5.2	4.3

Com recurso aos dados obtidos no inquérito á mobilidade, especificamente a distância percorrida anualmente, e os dados recolhidos do relatório técnico dos veículos, nomeadamente o consumo de ciclo misto dos automóveis, foi possível determinar as emissões GEE para a fase de WTT para os ICEV, nas áreas metropolitanas de Lisboa e Porto (tabela [8.1,8.2]).

Os resultados relativos à análise TTW só abrangem os ICEV, visto que os veículos elétricos não emitem GEE durante o seu ciclo de condução. Para determinar as emissões recorreu-se aos fatores de emissão da gasolina e do gásóleo (tabela 4.5), á semelhança do caso anterior, contudo o fator de emissão utilizado é referente á fase de TTW. Também foi calculado o consumo energético dos ICEV em ambas as fases do ciclo de vida, em MJ/km.

Na fase *Well-to-Tank* (WTT), o consumo de energia é calculado utilizando a eficiência do combustível em MJ/MJ de gasolina. Esta medida representa a energia total necessária para disponibilizar um megajoule de energia de gasolina ao veículo, incluindo as etapas de extração, refinação e transporte do combustível.

Tabela 4.6 - Consumo energético da gasolina e gásóleo e respetiva eficiência dos combustíveis [58].

	Gasolina	Diesel
Consumo Energético (MJ/km)	1.76	1.64
Eficiência Combustível (MJ/MJ)	0.18	0.20

Para determinar o consumo de energia dos ICEVs na fase WTT recorreu-se ao consumo de combustível do veículo (em MJ/km) e a respetiva eficiência do combustível (MJ/MJ). Este cálculo é fundamental para entender a pegada energética dos ICEVs, considerando todo o consumo energético associado à preparação e entrega do combustível, assim como as perdas energéticas ao longo do processo.

Este processo permite uma avaliação precisa do impacto ambiental dos ICEVs, abrangendo não apenas a operação do veículo, mas também as emissões e o uso de recursos na cadeia de fornecimento de combustível.

4.3.3 Análise *Well-to-Wheels* (EV)

Para modelar a fase de WTT dos EVs, recolheram-se os dados relativos ao consumo e produção energética em Portugal, para o intervalo de tempo de 2015 a 2019 [59]. O consumo global é determinado pela adição do consumo de produção líquida e produção renovável, em GWh. Os dados referentes á produção de eletricidade por tipo de fonte de energia, estão representados na tabela 4.7.

Tabela 4.7 - Fatores de emissão da produção de eletricidade, por tipo de fonte de energia [59].

Fontes de Energia	FE [gCO ₂ eq/kWh]
Fios de Água	24
Albufeiras	24
Carvão	1001
Gás Natural	490
Hidráulica	24
Térmica	740
Eólica	11
Fotovoltaico	45

Os fatores de emissão de CO₂ das centrais elétricas que constituem o mix energético de Portugal, foram seleccionados com recurso ao relatório IPCC, onde foi aplicado um fator de emissão adequado para as temperaturas de escape dos gases que saem das centrais específicas para cada país, de modo que, se existirem duas centrais elétricas com uma mesma temperatura dos gases de escape, a ambas é atribuído o mesmo fator de emissão independentemente da localização, eficiência térmica ou tempo de vida da central em questão [60].

Na tabela [4.8] estão representadas as emissões de GEE associadas á produção de eletricidade, por fonte de energia, em Portugal.

Tabela 4.8 - Emissões de CO₂ resultantes da produção de eletricidade em Portugal, entre 2015 e 2019.

		Emissões GEE [gCO ₂ /kWh]				
		2015	2016	2017	2018	2019
		462	380	476	399	344

De seguida, para o intervalo de tempo especificado, calcularam-se as emissões de CO₂ resultantes do consumo e produção de eletricidade, para cada regime em vigor em Portugal (tabela 8.). A partir das quais foi possível determinar as emissões de CO₂ resultantes da

produção de 1kWh eletricidade para recarregar as baterias dos veículos elétricos, para cada ano. Estes dados encontram-se representados na tabela [4.9].

As perdas energéticas nas fases *Well-to-Tank* (WTT) e *Tank-to-Wheel* (TTW) são elementos fundamentais na determinação da eficiência global e da pegada de carbono de Veículos Elétricos (EVs). A informação que sustenta esta análise provém de estudos técnicos detalhados sobre a operacionalidade e eficiência dos EVs, refletindo as perdas médias inerentes a cada componente do seu sistema de propulsão e de fornecimento de energia [27].

Na fase *Well-to-Tank* (WTT) do ciclo de vida de Veículos Elétricos (EVs), que abarca desde a geração de energia até ao seu uso no veículo, há várias etapas nas quais ocorrem perdas energéticas. Estas perdas são uma parte crucial do cálculo para determinar a eficiência energética e a pegada de carbono dos EVs. Na análise WTT, consideramos as perdas na transmissão da rede elétrica (6.0%), distribuição (3.8%) e no processo de carregamento AC (3.0%). Além destas, incluímos também as perdas associadas à bateria, que são estimadas em cerca de 5% e 3.2% para o Nissan Leaf e Nissan Leaf e+ respetivamente [27], [61].

$$\text{Consumo Energético}_{PT} = \frac{\text{Consumo (kWh/km)}}{(1 - \text{perdas WTT})} \quad [1]$$

Por outro lado, a fase TTW, que diz respeito à eficiência "da bateria até à roda", acarreta as perdas na bateria, inversor, motor elétrico e no sistema de transmissão. É relevante salientar que as perdas associadas à bateria são contabilizadas tanto na fase WTT quanto na TTW, devido aos processos de carga e descarga [27]. Portanto, para calcular a energia efetivamente utilizada pelo veículo nesta fase, utiliza-se a equação 1, com as perdas dos processos TTW.

Para calcular a eficiência real dos (EVs) na fase *Tank-to-Wheel* (TTW), adotei duas métricas de consumo energético: o Consumo Real, medido através da EVDB Real Range [62], e o Consumo Nominal, baseado nas classificações WLTP (Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Procedure) providenciados pelo fabricante. Ambos expressos em kWh/km.

O Consumo Real, ou EVDB Real Range, reflete o consumo de energia em condições reais de condução. Este valor é derivado de observações práticas e dados recolhidos de diversos utilizadores em condições padrão, abrangendo variáveis como estilo de condução, condições meteorológicas, uso de sistemas auxiliares no veículo e tipologia da estrada. Em contraste, o Consumo Nominal, ou obtido através de classificações WLTP, representa o consumo de energia baseado em testes padronizados de laboratório, que procuram simular condições de condução em um ambiente controlado.

Tabela 4.9 - Perdas de Energia durante a fase operacional WTW, para os EVs.

Perdas	WTT (%)	TTW (%)	WTW (%)
Nissan Leaf	17.8	13.3	31.1
Nissan Leaf e+	16.0	9.9	25.9

Esta medida proporciona uma avaliação mais precisa da eficiência energética dos EVs no quotidiano, permitindo uma comparação mais realista com os valores teóricos fornecidos pelas classificações WLTP. Este método é fundamental para entender o desempenho energético dos EVs fora do ambiente de teste e para refletir o comportamento do veículo em situações de condução reais.

A aplicação destas fórmulas possibilita uma estimativa precisa da eficiência energética dos EVs, sendo crucial para o avanço de políticas sustentáveis e para o aperfeiçoamento tanto do design quanto da operacionalidade destes veículos. A contabilização dupla das perdas da bateria, embora possa parecer redundante, é essencial para um retrato real do consumo energético e das emissões de GEE.

Na tabela [4.10], estão representados o consumo energético para cada fase e o total incluindo todas as perdas.

Tabela 4.10 - Consumo energético dos EVs por quilómetro percorrido.

Automóveis	WTT (kWh/km)	TTW (kWh/km)	Consumo Energético Total
Nissan Leaf	0.169	0.163	0.195
Nissan Leaf e+	0.184	0.173	0.212

Os resultados obtidos para a fase de WTW relativos às emissões de GEE para os dois veículos elétricos, serão apresentados no Capítulo 5.

4.3.4 Análise do ciclo de vida (CV) dos materiais

A análise do ciclo de vida dos materiais foi realizada recorrendo ao software GREET 2020, que permitiu avaliar os impactos da variabilidade dos parâmetros introduzidos pelo utilizador, que têm influência direta e significativa nos resultados afetos às emissões e consumos de energia que são obtidos pelo software.

Por forma a determinar as emissões e consumos energéticos do CV dos materiais, inicialmente foram introduzidos os parâmetros na folha de cálculo do GREET 1_2020 que produz a análise WTW dos automóveis. Na folha de cálculo dos *Inputs* selecionou-se o tipo de veículo que se pretende simular, um veículo ligeiro de passageiros e o mix energético que será responsável pela produção e fabrico dos automóveis. Para os veículos convencionais recorreu-se ao mix elétrico de França, que é o local onde são produzidos atualmente, enquanto para os veículos elétricos foi utilizado o mix elétrico do Reino Unido, onde para ambos foi essencial estimar as perdas de distribuição e transmissão da rede elétrica [63], [64]. Será abordado com mais detalhe como foram determinados os mixes energéticos e as perdas

correspondentes. De notar, que a folha de cálculo GREET 1_2020 não serviu de suporte para a realização da análise das fases WTT e TTW e posterior obtenção de resultados.

Na tabela [4.11] apresentam-se as perdas de distribuição e transmissão da rede elétrica de França e Reino Unido [33], [34], respetivamente.

Tabela 4.11 - Perdas de energia, associadas aos processos de transmissão e distribuição, para França e Reino Unido [63], [64].

Perdas de Energia	França (%)	Reino Unido (%)
Perdas de Transmissão e Distribuição	2.22	8.85

Seguidamente integrou-se os parâmetros na folha de cálculo GREET 2_2020 que faz somente a análise do CV dos materiais. O primeiro parâmetro a introduzir são as massas dos veículos que se relacionam diretamente com as emissões e consumo energético, pois um veículo com uma massa superior irá precisar de uma maior quantidade de materiais para a produção dos diversos componentes, embora na realidade esta diferença seja mais significativa quando ocorrem variações no tipo de material utilizado, por exemplo se for utilizado material reciclado na produção dos componentes.

O tempo de vida representa um dos parâmetros mais importantes durante uma análise ACV e permite analisar diferentes tecnologias ou produtos. Segundo a consulta dos relatórios técnicos oficiais de marca, foi adotado um tempo de vida correspondente a 160000 quilómetros [65].

A produção dos componentes para a bateria de propulsão utilizada num veículo elétrico, engloba processos que consomem energia de forma intensiva, ao invés do que se verifica para as baterias de chumbo-ácido dos veículos convencionais. Os parâmetros das baterias dos ICEV não foram modificados por apresentarem uma contribuição pouco significativa para os resultados do CV dos materiais, tendo sido utilizados os valores padrão que são atualizados regularmente pelo software GREET. Para o caso dos EVs a contribuição da produção das baterias é bastante significativa para as emissões e consumo energético, como tal os parâmetros modificados relativos às especificações das baterias, para os EVs, estão representados na tabela [4.12].

Tabela 4.12 - Parâmetros dos automóveis introduzidos no software GREET 2.7_2020.

Parâmetros introduzidos	Renault Clio TCe100	Renault Clio Blue dCi 85	Nissan Leaf	Nissan Leaf e+
Massa do Veículo (kg)	1065	1164	1580	1650
Massa da Bateria (kg)	16.3	16.3	303	376
Tipo de Bateria	Chumbo	Chumbo	iões de Lítio	iões de Lítio
Potência da Bateria [kW]	-	-	40	62
Capacidade Específica da Bateria [Wh/kg]	-	-	132	165
Potência Específica da Bateria [W/kg]	-	-	500	180
Tempo de Vida [km]	160000	160000	160000	160000

O consumo energético e as emissões subsequentes resultam de uma variedade de considerações que foram colocadas em prática, desde as características dos automóveis à manutenção dos seus componentes.

A produção de materiais para componentes que necessitem de manutenção durante o tempo de vida também foram considerados, nomeadamente a substituição da bateria e dos pneus dos veículos. Para o tempo de vida definido irão ocorrer duas substituições dos pneus, tendo sido considerado um período de vida útil dos pneus dos veículos de 65000 km [66].

Para as baterias dos veículos convencionais foi assumido que ocorram duas substituições das baterias de chumbo-ácido [66], enquanto para os veículos elétricos, para o cenário padrão em análise, não irão ocorrer substituições da bateria de íões de lítio [21], [55], durante o tempo de vida considerado. Foi abordado o cenário 300 000 km em que existe substituição das baterias, por forma a determinar o consumo energético e emissões adicionais resultantes da manutenção.

Os fluídos que são constituintes dos veículos foram também considerados, a sua manutenção foi assumida com recurso á literatura disponível [66], o número de substituições aplicadas nos veículos, durante o tempo de vida considerado encontram-se apresentados nas tabelas [4.14, 4.13].

Tabela 4.13 - Manutenção e substituição dos componentes e fluídos, para os ICEVs.

Componentes e Fluídos (EV)	Susbstituição (160 000 km)	Susbstituição (300 000 km)
Bateria (Chumbo-ácido)	2	2
Bateria (Iões de Lítio)	0	1
Pneus	3	5
Óleo do motor	25	47
Travões	3	5
Transmissão	1	1
Refrigeração	3	5
Limpa Pára-Brisas	13	24

Tabela 4.14 - Número de substituições dos componentes e fluídos, para os EVs.

Componentes e Fluídos (ICEV)	Susbstituição (160 000 km)	Susbstituição (300 000 km)
Bateria (Chumbo-ácido)	2	3
Pneus	3	5
Óleo do motor	25	47
Travões	3	5
Transmissão	1	1
Refrigeração	3	5
Limpa Pára-Brisas	13	24

Os resultados do CV dos materiais são subdivididos em componentes, ADR (*Assembly, Disposal, Recycle*), baterias e fluídos. A produção e fabrico dos componentes dos veículos excluindo as baterias e os fluídos, contabilizam praticamente o consumo energético total. A análise ADR consiste nas fases de montagem, desmantelamento e reciclagem dos automóveis,

de realçar que o fim de vida das baterias para os veículos elétricos está inserido na análise das baterias que inclui esse valor associado.

Os resultados afetos às baterias envolvem o consumo energético e emissões desde a extração dos materiais, fabrico dos componentes requeridos, posterior reciclagem e eliminação das mesmas.

4.4 Análise do mix de geração de energia elétrica de Portugal entre 2015 e 2019.

No desenvolvimento deste trabalho, aprofundi a investigação sobre a produção e o consumo energético em Portugal, recorrendo a dados obtidos pela [59], e estão representados na tabela [4.15]. Esta tabela é um recurso fundamental para a análise, contendo informações sobre as diversas fontes de energia que compõem o mix energético nacional. Através desta, é possível quantificar não só a produção de energia, mas também avaliar o impacto das políticas de sustentabilidade implementadas pelo país. Os dados originais estão disponíveis para consulta na tabela [8.3].

Tabela 4.15 - Produção de eletricidade em Portugal, por tipo de fonte energética, em GWh [59].

	Unidades: GWh				
Fontes de Energia	2015	2016	2017	2018	2019
Hídrica	8797	15297	6726	12267	8984
Carvão	13678	11698	13608	11117	5087
Gás Natural	5242	7374	13478	10133	11620
Hidráulica	816	1332	614	1093	1058
Térmica	7540	7203	7293	7355	7540
Eólica	11334	12188	11973	12351	13423
Solar Fotovoltaica PV	760	786	853	829	1062
Produção Renovável	20450	21509	20733	21628	23083
Total Consumo	48167	55878	54545	55145	48774

Os dados estão distribuídos por produção líquida e produção renovável, sendo que a produção líquida engloba a produção hídrica, a carvão e gás natural. A produção renovável engloba a energia hidráulica, térmica, eólica e solar fotovoltaica. A produção de eletricidade por tipo de regime energético está representada

A produção líquida total representa a quantidade de energia que é realmente gerada e disponibilizada para consumo após considerar todas as perdas inerentes ao processo de geração de eletricidade. As emissões de GEE resultantes de cada regime de produção de eletricidade em Portugal, entre 2015 e 2019, estão disponíveis na tabela [8.4].

A inclusão da produção hídrica deve-se ao fato de que a energia produzida por centrais a fios de água (geração de energia a partir de rios e correntes de água sem reservatório) e albufeiras (geração a partir de água armazenada em reservatórios) representam uma entrada líquida na rede elétrica após descontar as perdas operacionais e de infraestrutura. Ou seja, a energia que estes métodos de produção hidroelétrica fornecem já teve descontadas as perdas por evaporação, infiltração, e outras ineficiências do processo de geração de eletricidade.

Em termos de planeamento energético e análise de sustentabilidade, é essencial reconhecer estas contribuições porque refletem a quantidade real de energia renovável que é injetada na rede e que está disponível para atender à procura dos consumidores.

Na figura 4.1, está representado o mix energético de Portugal, em percentagem por tipo de fonte de energia, desde 2015 até 2019.

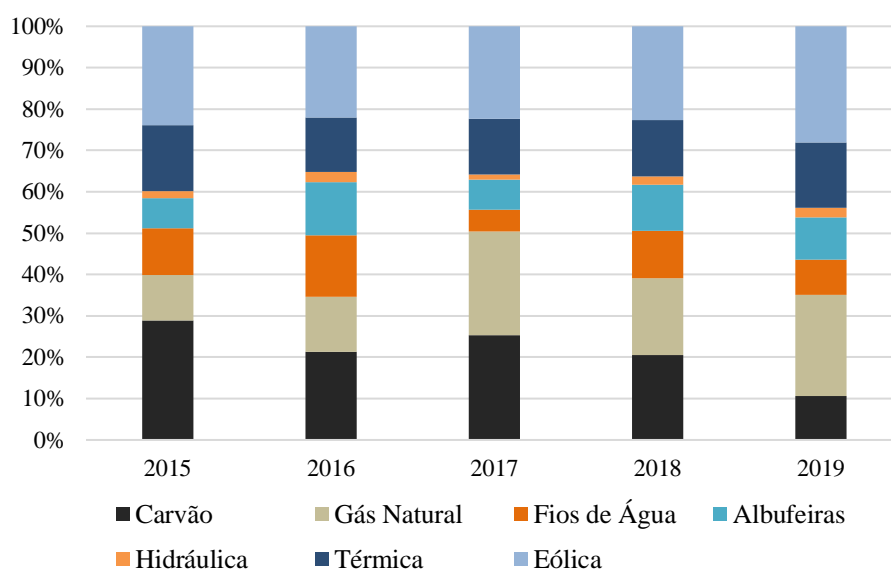


Figura 4.1 - Distribuição do mix energético português, durante o período de 2015 a 2019

O panorama do mix elétrico de Portugal nos últimos cinco anos revela que em 2016, a produção de energia hídrica, proveniente de albufeiras e centrais de fio-de-água, atingiu um pico com 15.3 TWh, equivalente a cerca de 27% do total de energia consumida nesse ano. Apesar de ocorrerem variações anuais, manteve uma contribuição de 18% para a produção total de energia durante o período estudado.

Por outro lado, as centrais a carvão de Sines e Pego revelaram uma tendência descendente, com a sua produção a diminuir de 28% em 2015 para 10% em 2019, marcando um recuo na sua influência no mix energético. Este declínio foi acompanhado por um incremento na utilização de gás natural que, substituindo em parte as centrais a carvão, aumentou a sua contribuição para 24% do mix em 2019, favorecendo a redução das emissões GEE associadas à energia a carvão.

A geração de eletricidade a partir de fontes renováveis tem-se mantido consistente desde 2015, oscilando em torno dos 40%, e registou um aumento em 2019, alcançando uma contribuição de 47% para o mix energético. Este crescimento reforça a predominância das

energias renováveis no sistema elétrico português, sublinhando o empenho do país na transição energética.

No contexto da elaboração deste trabalho, explorámos a viabilidade de um cenário energético em Portugal totalmente sustentado por fontes renováveis. Na figura 4.2, apresento um gráfico comparativo das emissões de gCO₂/kWh do mix elétrico português atual e um cenário hipotético 100% renovável.

Para construir o cenário 100% renovável, inicialmente recolhi dados do Pordata relativos à produção de energia renovável de 2015 a 2019. Converti esses valores em percentagens do total da produção renovável e, seguidamente, apliquei essas percentagens à produção anual total de eletricidade. Com base nisso, e utilizando os fatores de emissão específicos de cada fonte renovável, calculei as emissões correspondentes. Esta abordagem, embora consciente das suas limitações, como a ausência de dados detalhados sobre a produção diária de energia renovável e a capacidade instalada ser neste momento insuficiente para responder à procura de energia em horas de pico, serve apenas como uma visão simplificada que se alinha com os objetivos da análise do ciclo de vida (ACV).

O propósito não é determinar uma solução para a transição energética, mas sim fornecer uma visão geral do potencial de redução de emissões que poderia ser alcançado. Este cenário simplificado é uma parte importante do estudo, sublinhando o potencial das energias renováveis na mitigação das emissões de GEE, dentro do contexto nacional.

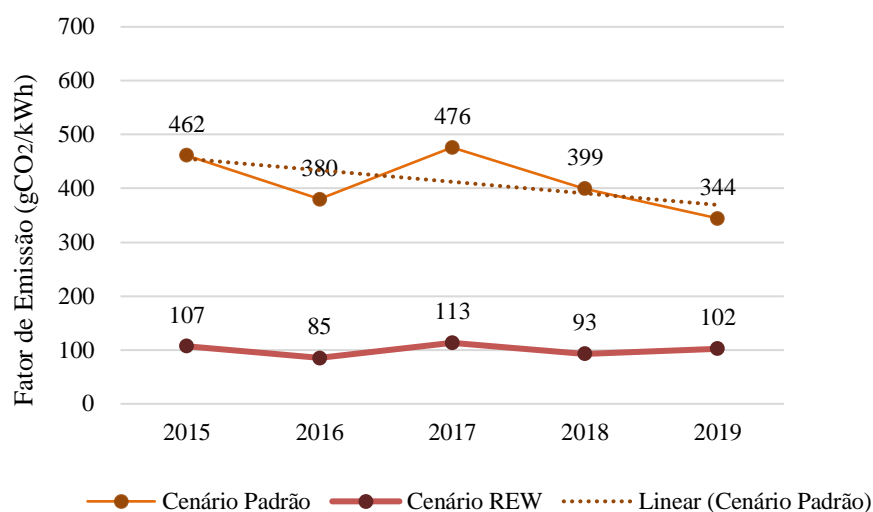


Figura 4.2 - Fatores de Emissão das Centrais de Energia, por kWh de eletricidade gerada.

O gráfico apresentado compara o cenário energético atual de Portugal e um cenário alternativo onde a produção de energia é totalmente renovável, denominado "Cenário REW". No cenário padrão, observamos uma tendência decrescente no fator de emissão de CO₂ por kWh, iniciando em 462 gCO₂/kWh em 2015 e descendo para 344 gCO₂/kWh em 2019. Esta tendência reflete as alterações positivas na composição do mix energético.

Em contraste, a linha que representa o "Cenário REW" permanece significativamente mais baixa e constante ao longo dos anos, sugerindo um nível de emissões muito reduzido que se mantém em torno ou abaixo dos 113 gCO₂/kWh. A comparação entre os dois cenários evidencia a importância e o impacto que a escolha das fontes de energia tem sobre as emissões de GEE. O contraste não só sublinha o potencial de uma política energética voltada para a sustentabilidade, mas também destaca o desafio que é transitar para uma matriz energética menos dependente de combustíveis fósseis.

4.4.1 Projeção do mix de geração de eletricidade português para 2050.

No desenvolvimento da minha tese de mestrado, e com o intuito de enriquecer a Avaliação do Ciclo de Vida (LCA), procedi à recolha de dados relativos à geração de energia em Portugal para o ano de 2050 [67]. Estes dados, que se encontram sistematizados na tabela x, permitem-me estabelecer uma base de análise para determinar as emissões associadas às diferentes fontes de energia. A informação detalhada da produção de eletricidade em terawatt-horas (TWh) e os fatores de emissão correspondentes (gCO_{2eq}/kWh) são essenciais para projetar o impacto ambiental dos veículos elétricos, permitindo uma visão antecipada das possíveis evoluções no mix energético nacional. A utilização destes dados é determinante para aferir o potencial de redução das emissões de GEE e para avaliar o desempenho ambiental dos veículos elétricos no horizonte temporal de 2050.

Tabela 4.16 - Projeção da produção de eletricidade, por tipo de central, em TWh, para o ano de 2050.

Fontes de Energia	Eletricidade Gerada (TWh)	FE (gCO _{2eq} /kWh)
Eólica Onshore	33.5	11
Solar Fotovoltaico PV	26.9	45
Hídrica	10	24
Cogeração	7.4	202
Biomassa	2.9	740
CCGT	1.1	389

À medida que apontamos para o ano de 2050, a expectativa é que a produção de eletricidade em Portugal atinja aproximadamente os 81.8 TWh, refletindo um substancial incremento de 80.8% em relação a 2019. Este aumento notável é reflexo da crescente procura energética, impulsionada pelo contínuo desenvolvimento tecnológico e pela expansão do sistema energético nacional. As energias renováveis, atualmente responsáveis por uma parcela significativa da produção total, estão previstas para intensificar a sua presença no mix energético, alinhando-se com as ambiciosas metas climáticas estabelecidas.

A transição energética é visível na produção de eletricidade a partir de fontes renováveis, que deverá ascender a 70.4 TWh em 2050, um salto considerável dos 32.07 TWh registados em 2019.

Espera-se que as centrais eólicas on-shore, solar fotovoltaico (PV) e hídricas constituam a produção renovável, com estimativas que apontam para uma distribuição percentual no mix

energético de 41%, 32.9% e 12.2%, respetivamente. Por outro lado, as fontes fósseis, ainda presentes, como a biomassa, cogeração e CCGT (Ciclo Combinado de Gás Natural), deverão representar uma fração menor, com 9%, 3.5% e 1.3% do mix, respetivamente.

Continuando a análise, e assumindo que os fatores de emissão de cada fonte energética não sofreram alterações para o ano de 2050, devido à escassa informação disponível sobre a sua evolução, baseei-me nos valores atuais para calcular as emissões anuais em toneladas de CO₂. Esta abordagem permitiu estimar a intensidade de emissão de Portugal para 2050, em 1.6 gCO₂/kWh [68]. Apesar desta limitação, a estimativa é crucial para compreender o impacto ambiental que a eletrificação dos transportes poderá representar, considerando o mix energético projetado.

4.5 Análise da geração de energia elétrica de França e Reino Unido, para o ano de 2019.

No contexto do estudo, estendi a análise além das fronteiras de Portugal, abrangendo casos de estudo no Reino Unido e em França. Este alargamento da investigação teve como objetivo quantificar as emissões de GEE associadas aos veículos elétricos, tendo em conta os perfis energéticos específicos destes países e a sua influência nas emissões durante a condução.

Adicionalmente, para uma avaliação completa do impacto ambiental dos veículos elétricos, foi crucial compreender o consumo energético e as emissões inerentes ao ciclo dos materiais, especialmente na fase de produção e montagem dos componentes dos veículos. Para isso, analisei detalhadamente os mixes energéticos do Reino Unido e da França [64], [69], dado que ambos apresentam contextos energéticos distintos e têm uma indústria automóvel proeminente. Através deste método, consegui não só capturar as diferenças geográficas e tecnológicas nas emissões dos veículos elétricos, mas também realçar a importância da energia utilizada na produção automóvel.

Na tabela [4.4] estão representados os mixes energéticos de França e Reino Unido, por tipo de fonte de energia, para o ano de 2019.

Tabela 4.17 - Mix energético da França e Reino Unido, por fonte de energia em 2019 [64], [69].

Fontes de Energia	França	Reino Unido
Nuclear (%)	77.7	17.3
Hídrica (%)	9.7	2.4
Eólica (%)	3.8	19.8
Gás Natural (%)	3.5	40.6
Carvão (%)	2.2	2.1
Solar Fotovoltaico (%)	1.5	4.0
Biomassa (%)	1.3	12.5
Cogeração (%)	0.3	0.3

Ao analisar a produção de eletricidade em França, observei que o mix energético é fortemente inclinado para a energia nuclear, representando 77.7% do total. Este dado é significativo, pois sublinha a dependência da produção automóvel francesa na energia nuclear, a principal fonte de eletricidade do país. Adicionalmente, as energias renováveis contribuem com 15% para o mix energético francês, sendo dominadas pela energia hídrica e eólica, com 9.7% e 3.8% respetivamente.

Em contraste, os veículos elétricos produzidos no Reino Unido, especificamente na fábrica de Portsmouth, são fabricados utilizando um mix energético onde o gás natural tem um papel preponderante, com uma contribuição de 40.6% na eletricidade gerada. Notavelmente, a produção de energia a partir de fontes renováveis no Reino Unido é mais expressiva do que em França, representando 39.7% do mix energético, com a energia eólica a constituir uma parcela significativa de 19.8%. Este contraste nos perfis energéticos de França e do Reino Unido é crucial para uma análise detalhada das emissões associadas à produção automóvel e respetiva utilização dos veículos.

Prosseguindo com a análise dos mixes energéticos de França e do Reino Unido, realizei o cálculo das emissões resultantes da produção de eletricidade em ambos os países, com base nos dados de 2019. Utilizei a produção total de eletricidade para esse ano e apliquei os fatores de emissão específicos a cada fonte energética presentes nos mixes de França e do Reino Unido. Esta etapa foi crucial para avaliar de forma precisa as emissões de CO₂ associadas a cada fonte de energia, proporcionando uma compreensão do impacto ambiental inerente à produção de veículos e utilização dos mesmos.

Na tabela [4.18] estão representados os fatores de emissão para cada fonte energética presente nos mixes de França e Reino Unido.

Tabela 4.18 - Fatores de Emissão por fonte de energia.

Fontes de Energia	FE (gCO ₂ eq/kWh)
Nuclear	12
Hídrica	24
Eólica	11
Gás Natural	490
Carvão	1001
Solar Fotovoltaico	45
Biomassa	740
Cogeração	1000

Após a análise detalhada das emissões provenientes da produção de eletricidade em França e no Reino Unido, com base nos dados de 2019 e nos respetivos fatores de emissão por fonte energética, foi possível determinar a intensidade das emissões de carbono para a produção de 1 kWh de eletricidade em ambos os países. Esta etapa resultou em valores concretos que refletem a quantidade de CO₂ emitida por unidade de eletricidade produzida, proporcionando

uma visão clara da pegada de carbono associada ao setor elétrico em França e no Reino Unido.

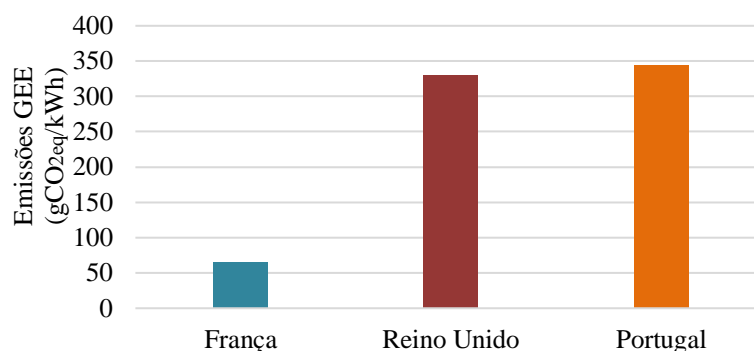


Figura 4.3 - Intensidade carbónica da produção de eletricidade em Portugal, França e Reino Unido, para o ano de 2019.

A figura 4.3 apresenta uma comparação direta da intensidade de emissões de GEE para a produção de eletricidade em Portugal, França e Reino Unido. Esta análise ilustra as variações na eficiência e na sustentabilidade dos diferentes mixes energéticos e o seu impacto ambiental.

Analisando a figura, vemos que Portugal exibe a maior taxa de emissões de gases com efeito de estufa por unidade de eletricidade gerada entre os três países analisados. Isto sugere que, apesar dos esforços para aumentar a quota de energias renováveis, o mix energético de Portugal ainda possui uma proporção significativa de fontes de energia com maior intensidade de carbono. A França, por outro lado, apresenta as menores emissões, este resultado é consistente com o seu investimento em energia nuclear, uma fonte de baixa emissão de carbono, que domina o seu mix energético. O Reino Unido encontra-se numa posição intermédia, conforme ilustrado. Este valor reflete o estado de transição do mix energético do Reino Unido, que está a caminhar para uma redução na utilização de combustíveis fósseis e um aumento no uso de fontes renováveis.

Na tabela 4.19, estão representados os consumos energéticos dos veículos para o contexto energético da França e Reino Unido.

Tabela 4.19 - Consumo energético dos veículos elétricos a circular em França e no Reino Unido.

Automóveis	FR (kWh/km)	UK (kWh/km)
Nissan Leaf	0.180	0.194
Nissan Leaf e+	0.188	0.202

A comparação do consumo energético dos modelos Nissan Leaf entre França e Reino Unido, conforme indicado na tabela, reflete diretamente a eficiência operacional destes veículos em contextos energéticos distintos. Na França, o baixo consumo energético de 0.180 kWh/km para o Nissan Leaf e de 0.188 kWh/km para o Nissan Leaf e+ pode ser atribuído não só à eficiência do veículo, mas também à alta eficiência da produção de energia nuclear, que,

apesar de ter baixas emissões de GEE, não tem produz um impacto significativo nas perdas de transmissão e distribuição.

Por outro lado, no Reino Unido, os valores ligeiramente mais altos de 0.194 e 0.202 kWh/km refletem a eficiência dos veículos em um mix energético com maior contribuição de fontes renováveis e fósseis. Para este caso, as perdas de transmissão e distribuição podem ser mais influentes devido à variabilidade e dispersão geográfica das fontes de energia renováveis, como a eólica e a solar, além das centrais a gás natural.

4.5.1 Análise da geração de energia elétrica da França e Reino Unido, para o ano de 2050.

Por forma a modelar o ciclo de vida dos veículos para um cenário futurista, nomeadamente a sua fase de produção e montagem, é preciso compreender como é que a eletricidade irá ser produzida em 2050, em França e no Reino Unido respetivamente.

O mix energético da França que irá fornecer energia para a produção dos veículos convencionais, em 2050 é esperado um aumento do consumo de energia significativo, o que naturalmente corresponde a uma maior necessidade energética, onde estimasse que para esse ano a produção total de eletricidade irá corresponder a cerca de 627.7 TWh [70]. Desde 2019 até 2050, o mix energético alterou-se bastante ao ponto de a energia nuclear que é a sua principal fonte de produção de energia possuir uma contribuição de 28.9% o que representa um enorme contraste com os 77.7% nos dias de hoje.

Tabela 4.20 - Projeção da produção de eletricidade em França, por tipo de central, em TWh, para o ano de 2050 [70].

Fontes de Energia	Eletricidade Gerada (TWh)	FE (gCO ₂ eq/kWh)
Nuclear	33.5	11
CCGT	26.9	45
Gás natural	10	24
Eólica Offshore	7.4	202
Eólica Onshore	2.9	740
Solar PV	1.1	389
Hídrica	18.7	24
Outras Renováveis	74.9	46

As energias renováveis em 2019 representavam cerca de 15% do mix energético de França, para 2050 estimasse que irão contribuir com 66% para a produção total de energia no país, o que demonstra um cenário animador para o futuro desenvolvimento das tecnologias renováveis. Na tabela seguinte está representada a produção de eletricidade por fonte de energia, em TWh.

As energias renováveis em 2019 representavam cerca de 15% do mix energético de França, para 2050 estimasse que irão contribuir com 66% para a produção total de energia no país, o

que demonstra um cenário animador para o futuro desenvolvimento das tecnologias renováveis. O mix energético utilizado para determinar o consumo e emissões resultantes do ciclo de vida para 2050, está apresentado na figura [4.4].

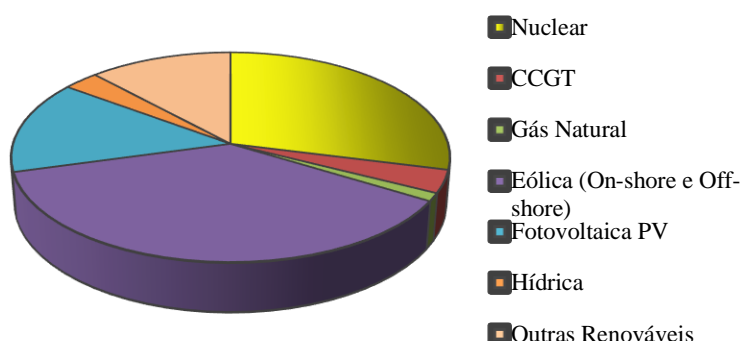


Figura 4.4 - Composição do mix energético francês em 2050

Como se pode verificar a energia eólica é a fonte de energia através da qual se irá produzir mais eletricidade, á semelhança do verificado para o caso português, com uma produção anual de 232.6 TWh, seguido da energia solar PV fotovoltaica e da energia hídrica com uma estimativa de produção anual de eletricidade de 90.1 e 18.7 TWh respetivamente [70]. De notar, que a fonte de energia eólica constitui as tecnologias de geração de energia tanto on-shore como off-shore.

As outras energias renováveis que estão mencionadas na tabela e que são responsáveis pela produção anual de 74.9 TWh e não foi possível aceder ao seu conteúdo, pelo que não foi determinado quais são as energias renováveis que constituem os dados recolhidos.

Para o caso do Reino Unido a produção anual de eletricidade, para 2050, estimasse que seja de 408.3 TWh, dos quais 333.1 TWh correspondem á energia produzida com recurso á queima de combustíveis fósseis (Carvão e Carvão CCS), com uma contribuição total para o mix energético de 81.6% [71].

Na tabela [4.21], está representada a produção anual de eletricidade no Reino Unido para o ano de 2050, por fonte de energia e os respetivos fatores de emissão.

Tabela 4.21 - Produção de eletricidade, por tipo de central, em TWh, para o ano de 2050, no Reino Unido [71].

Fontes de Energia	Eletricidade Gerada (TWh)	FE (gCO ₂ eq/kWh)
Carvão	31.4	1001
Carvão CCS	301.7	95
Hídrica	2.2	24
Eólica	46.4	11
Biomassa	16.1	740
Marés	10.6	24

Um dos meios de reduzir as emissões de dióxido de carbono (CO₂) para a atmosfera a partir de fontes industriais especialmente das centrais elétricas alimentadas com combustíveis fósseis (carvão, gás natural) é o método de captura e armazenamento de carbono (CCS). A CCS (*Carbon Capture and Storage*) requer que o CO₂ seja absorvido e comprimido a altas pressões e depois transportado para um local de armazenamento, onde é posteriormente introduzido numa formação geológica [72].

A geração de eletricidade com recurso às energias renováveis irá contabilizar cerca de 75.3 TWh, o que corresponde a 18.4% do mix elétrico total, comparativamente ao ano de 2019 estimasse verificar uma diminuição de 21.3% da sua contribuição total para o mix energético, o que sugere que um aumento da penetração dos EVs na frota automóvel, não representa um indicador de desenvolvimento e melhoria das energias renováveis [73], como se pode verificar pelo caso do Reino Unido. A energia eólica é a fonte renovável que mais irá contribuir para a produção anual de eletricidade, onde se estima que para 2050 irá atingir uma produção de 46.4 TWh [71].

Na Figura [4.5] está apresentado o mix energético do Reino Unido, utilizado para modelar o ciclo de vida, para o cenário de projeção para 2050.

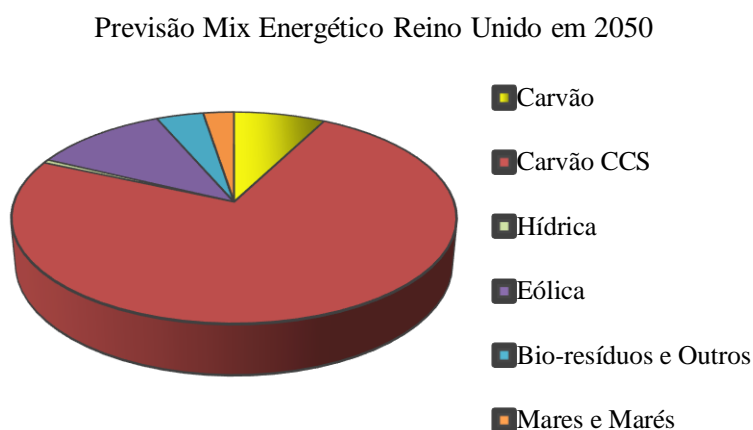


Figura 4.5 - Composição do mix energético do Reino Unido em 2050

A evolução das emissões de CO₂ até 2050 sinaliza uma transição para fontes menos poluentes. Os dados projetados apontam para um declínio acentuado das emissões nas centrais elétricas de França e Reino Unido, refletindo uma mudança positiva rumo à sustentabilidade no setor automóvel. Este progresso é crucial para entender o futuro impacto ambiental dos veículos elétricos, como apresentado na próxima figura.

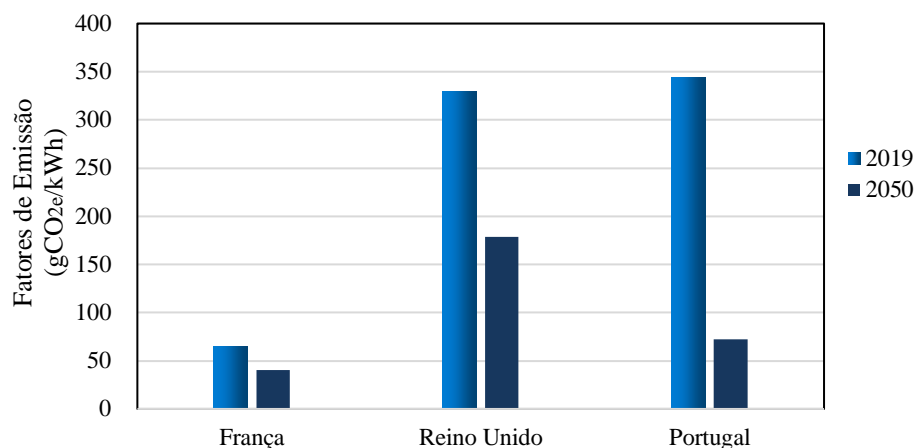


Figura 4.6 - Fatores de Emissão de GEE resultantes da produção de eletricidade, em 2019 e 2050, para Portugal, França e Reino Unido.

O gráfico em questão ilustra uma redução significativa nas emissões de CO₂ por quilowatt-hora produzido na França, Reino Unido e Portugal de 2019 para 2050. Esta descida evidencia uma transição energética em direção a uma matriz mais limpa e com menor intensidade carbónica nos três países. Na França, tal mudança pode ser atribuída ao declínio no uso de energia nuclear e ao aumento proporcional de energias renováveis. Portugal, seguindo uma tendência similar, destaca-se pela sua aposta crescente em fontes sustentáveis de energia.

No Reino Unido, a diminuição dos fatores de emissão indica um compromisso efetivo com a descarbonização do seu mix energético. A redução aponta para uma estratégia hipotética bem-sucedida de integração de fontes renováveis e tecnologias de baixa emissão, como a captura e armazenamento de carbono (CCS), que contribuem para a redução das emissões de GEE.

5. Resultados e Discussão

5.1 Análise *Well-to-Wheels* Cenário Padrão

Iniciamos agora a apresentação dos resultados da nossa análise de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), crucial para compreender o perfil ambiental dos veículos em estudo. Na figura 5.1 apresentamos as emissões de CO₂ por quilómetro para veículos a gasolina, diesel e elétricos no cenário atual, englobando as fases de produção do combustível ou eletricidade (*Well-to-Tank*) como a operação do veículo (*Tank-to-Wheel*). Esta análise permite-nos identificar não apenas os benefícios em termos de emissões dos veículos elétricos, mas também os desafios inerentes à sua produção e uso no contexto energético presente.

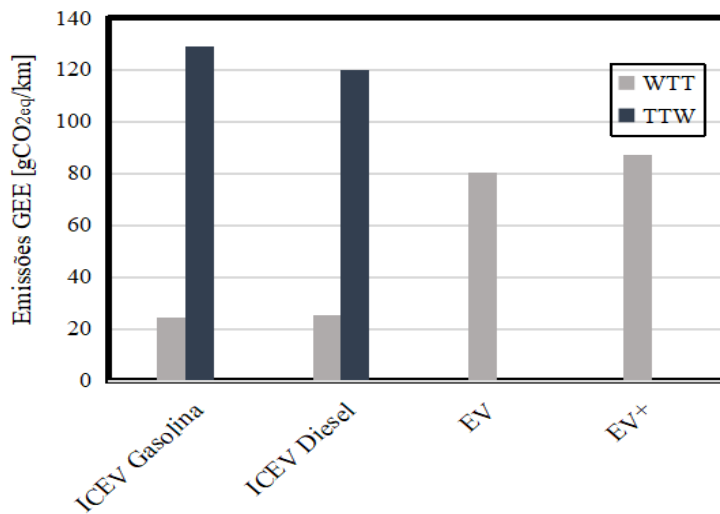


Figura 5.1- Emissões de GEE durante a fase operacional (WTT).

Analisando os dados apresentados, podemos observar que os ICEVs, tanto a gasolina quanto a diesel, têm emissões WTT consideravelmente mais baixas do que as emissões TTW. Isto é esperado, dado que a maior parte das emissões dos veículos convencionais ocorre durante a combustão no motor.

Por outro lado, os EVs apresentam um perfil de emissões distinto: as suas emissões WTT são maiores relativamente às TTW. Isto acontece porque a maior parte das emissões de um EV advém da produção de eletricidade utilizada para carregar a bateria, refletida nas emissões WTT. Uma vez que os EVs não emitem gases durante a operação do veículo (dado que não há combustão), as emissões TTW são nulas.

O Renault Clio a Gasolina e o Renault Clio a Diesel exibem uma notável diferença nas emissões TTW, com o modelo a gasolina emitindo mais (129 gCO₂eq/km; 120 g CO₂eq/km do diesel), o que pode ser atribuído à eficiência dos motores a diesel. No entanto, as emissões WTT são semelhantes, 24 e 25,3 g CO₂eq/km, respetivamente, indicando que a produção e o transporte de combustível têm impactos ambientais comparáveis.

A transição para veículos elétricos, como o Nissan Leaf, representa uma mudança significativa, eliminando completamente as emissões TTW (0 gCO₂eq/km). No entanto, as emissões WTT são substanciais (80 gCO₂eq/km), relembrando de que a eletricidade não é totalmente desprovida de impacto ambiental, dependendo da sua fonte de produção.

As emissões WTT mais elevadas do Nissan Leaf e+ (87 gCO₂eq/km) em comparação com o Nissan Leaf refletem o consumo adicional de energia por quilómetro. A maior capacidade da bateria do EV+ implica que é necessária mais energia para o seu carregamento, o que, consequentemente, implica uma maior emissão de GEE associadas à sua produção e fornecimento de energia. Ainda que esta versão avançada do veículo elétrico ofereça a vantagem de uma maior autonomia, potencialmente reduzindo a frequência de carregamento e

aumentando a conveniência para o utilizador, traduzindo-se num aumento do impacto ambiental.

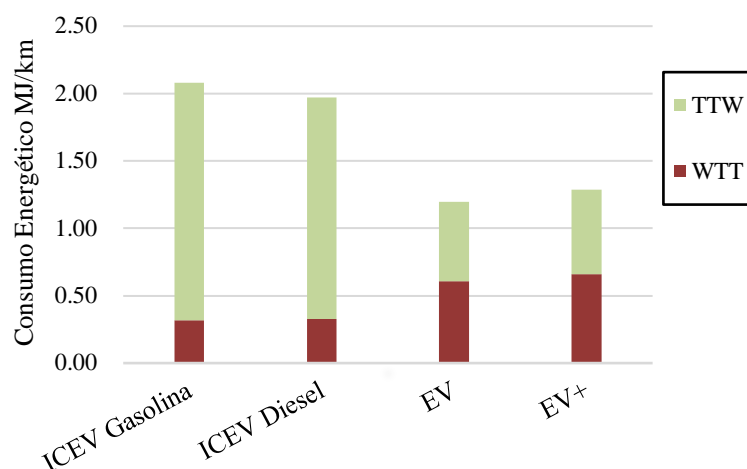


Figura 5.2 - Consumo energético durante a fase operacional (WTT)

Ao examinar o consumo energético dos veículos, percebe-se que os veículos com motor de combustão interna (ICEV Gasolina e ICEV Diesel) consomem mais energia durante a fase de operação do veículo (TTW) em comparação aos veículos elétricos (EV e EV+). Especificamente, os ICEVs registam 1,76 e 1,64 MJ/km, respetivamente, em contraste com os EVs, que apresentam valores significativamente inferiores, com 0,59 MJ/km para o EV e 0,62 MJ/km para o EV+. Esta diferença ressalta a eficiência energética que é superior dos veículos elétricos, visto que estes convertem energia elétrica em movimento de forma mais eficiente do que os motores a gasolina ou diesel convertem o combustível para a propulsão.

No entanto, quando se analisa o consumo de energia da fase de *Well-to-Tank*, os EVs mostram um consumo de 0,61 MJ/km e o EV+ de 0,66 MJ/km, que são superiores aos dos ICEVs Gasolina e Diesel, com 0,32 e 0,33 MJ/km, respetivamente. Isto pode ser explicado pelo fato de que a extração, o processamento e o transporte de combustíveis fósseis são atualmente mais eficientes em termos energéticos do que a geração e distribuição de eletricidade, particularmente se essa eletricidade não for proveniente de fontes renováveis. Estes dados evidenciam a importância de não apenas considerar a eficiência do veículo durante a fase de utilização, mas também o impacto energético da cadeia de abastecimento do combustível e eletricidade.

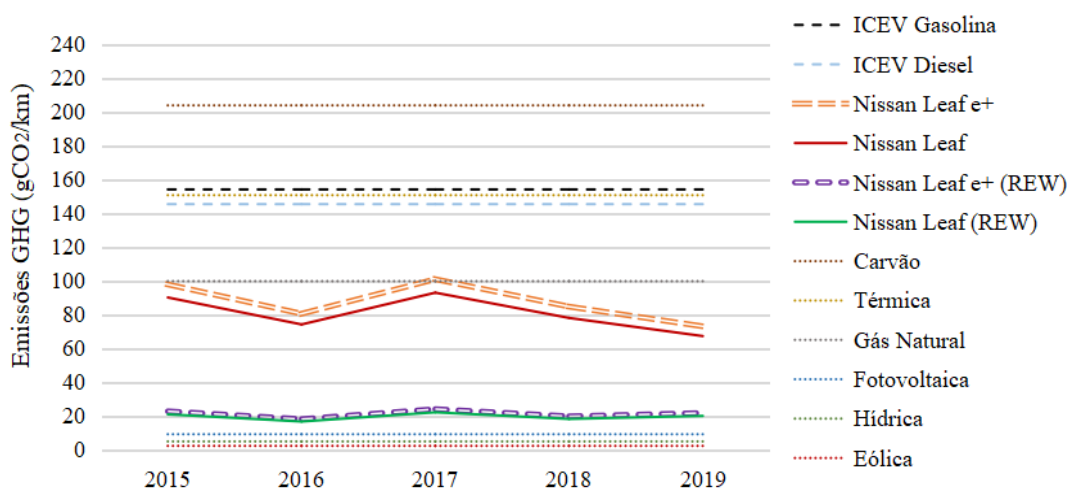


Figura 5.3 - Emissões de GEE durante a fase operacional (WTW), considerando diferentes fontes de energia para abastecimento dos veículos elétricos

O gráfico exibe uma comparação entre as emissões de gases de efeito estufa (GEE) de veículos tradicionais movidos a gasolina e diesel (ICEV Gasolina e ICEV Diesel) e veículos elétricos (Nissan Leaf e Nissan Leaf e+) sob diferentes condições de fonte de energia, incluindo cenários onde os veículos elétricos são alimentados exclusivamente por energia eólica, solar e um mix de fontes renováveis (REW).

Os veículos ICEV apresentam emissões de GEE estáveis e elevadas ao longo do tempo, independentes das mudanças nas fontes de energia, devido à sua operação exclusivamente baseada em combustíveis fósseis. Já as emissões dos EVs mostram uma dependência direta da fonte de energia utilizada. Quando alimentados unicamente por energia eólica ou solar, os EVs registam emissões drasticamente mais baixas, refletindo o potencial de energia limpa e renovável para reduzir a pegada de carbono dos veículos elétricos.

Especificamente, as linhas que representam o Nissan Leaf e o Leaf e+ alimentados por energia eólica e solar indicam emissões muito baixas, ilustrando o impacto positivo que a adoção dessas fontes renováveis pode ter sobre a pegada de carbono dos veículos elétricos. Essas linhas permanecem abaixo das linhas de emissões dos veículos a combustão ao longo de todo o período, reforçando a ideia de que, mesmo com a produção e o fornecimento de eletricidade a partir de fontes renováveis, os EVs têm um desempenho ambiental superior.

O cenário REW, que combina várias fontes renováveis, mostra uma linha de emissões que, embora ligeiramente mais alta do que as linhas da energia eólica ou solar, ainda representa uma redução drástica em comparação com os veículos a combustão interna. Este cenário reflete o potencial de uma matriz energética diversificada e sustentável para alimentar veículos elétricos, mantendo as emissões de GEE a níveis mínimos.

5.1.2 Análise WTW para os cenários REW e 2050

A análise *Well-to-Wheel* revela que, embora os ICEVs atualmente apresentem um maior

impacto de gases de efeito estufa (GHG) devido aos processos de produção e combustão de combustíveis, a evolução dos veículos elétricos, combinada com uma rede elétrica mais verde, oferece um caminho viável para reduzir drasticamente as emissões relacionadas ao transporte. Os dados apoiam a transição contínua para fontes de energia renováveis e a adoção de tecnologias de veículos elétricos como estratégias chave para mitigar o impacto do transporte pessoal nas mudanças climáticas.

A análise de emissões de gases de efeito estufa *Well-to-Wheel* para ICEV Gasolina, ICEV Diesel, EV e EV+ oferece uma perspectiva abrangente do impacto ambiental dessas tecnologias de veículos para três cenários energéticos: Cenário Padrão (PDR), Mix de Energia 100% Renovável (REW) e uma projeção para 2050.

A análise WTW para o cenário PDR destaca as consideráveis emissões de GEE de veículos convencionais com motor de combustão interna, com o ICEV Gasolina emitindo 154 gCO₂/km e o ICEV Diesel 145 gCO₂/km. Estes valores sublinham a natureza intensiva em carbono dos veículos movidos a gasolina e diesel, devido principalmente ao processo de combustão.

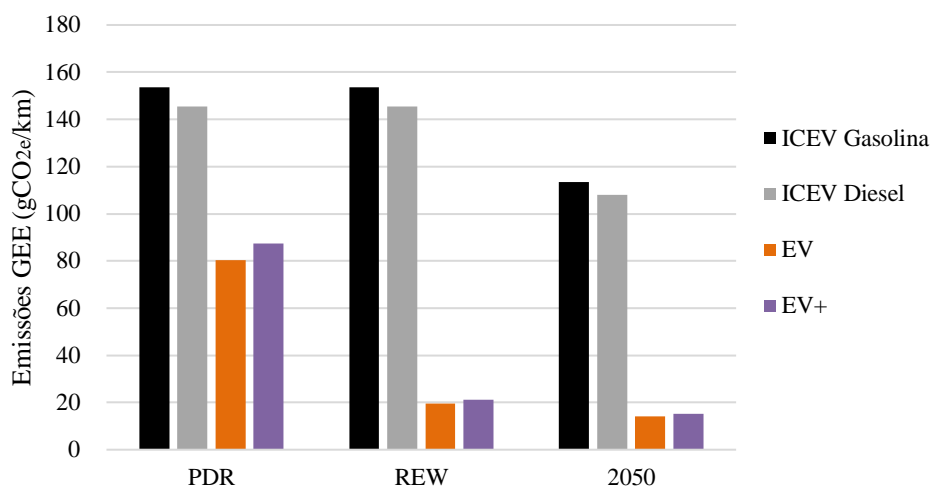


Figura 5.4 - Emissões de GEE durante a fase operacional (WTW), para o cenário padrão, 100% renovável e o cenário de projeção para 2050.

Em nítido contraste, no cenário REW, as emissões dos EVs correspondem a 20 e 21 gCO₂/km, respectivamente. Esta redução reflete o impacto profundo da integração de energia renovável na rede elétrica. A diminuição significativa destaca o potencial da energia renovável para reduzir drasticamente a pegada ambiental.

Olhando para 2050, espera-se que os avanços tecnológicos e na produção de energia reduzam as emissões de GHG em todos os tipos de veículos. Prevê-se que o ICEV Gasolina e o ICEV Diesel emitam 114 e 108 gCO₂/km, respectivamente, uma redução que pode ser atribuída ao aprimoramento das tecnologias de combustível e a introdução de fontes de combustível mais sustentáveis. Para os EV e EV+, espera-se que as emissões caiam para 14 e 15 gCO₂/km, indicativo de trens de força elétricos mais eficientes e um fornecimento de eletricidade mais limpo.

A análise fornece uma indicação clara de que, embora os ICEVs atualmente tenham emissões mais altas de GHG, o potencial da energia renovável para reduzir significativamente a pegada de carbono dos EVs é considerável. Além disso, a projeção para 2050 sugere que, com melhorias contínuas na tecnologia e uma mudança para a energia renovável, o setor de transporte pode esperar uma diminuição marcante nas emissões de GHG, contribuindo para os esforços de mitigação das mudanças climáticas globais.

5.2 Análise Ciclo de Vida dos Materiais

Neste estudo de análise do ciclo de vida dos materiais (ACV), pretende-se uma avaliação metódica dos impactos ambientais inerentes aos componentes, baterias e com ênfase nos processos de Montagem, Descarte e Reciclagem (ADR) dos veículos. Embora o ciclo de vida dos fluídos utilizados nos automóveis seja igualmente considerado, é de notar que a sua contribuição para as emissões globais e impacto ambiental dos veículos é pouco significativa, como tal apenas serão analisados detalhadamente os restantes parâmetros. O propósito deste estudo é fornecer uma análise detalhada sobre os ciclos de vida dos materiais nos sistemas automóveis, identificando as oportunidades para desenvolvimento de práticas sustentáveis no setor.

5.2.1 Análise dos Componentes

A análise do ciclo de vida dos EVs e dos ICEVs revela nuances importantes no que diz respeito às emissões de GEE associadas à produção dos componentes.

Tabela 5.1 - Emissões de GEE (CVM), associadas à extração e produção dos componentes dos veículos.

unidades: gCO ₂ eq				
Componentes	ICEV Gasolina	ICEV Diesel	EV	EV+
Carroçaria	1,144,274	1,256,285	1,536,439	1,554,279
Sistema de Propulsão	363,316	398,881	139,364	140,983
Sistema de Transmissão	170,561	187,257	200,349	202,675
Chassis	857,929	911,151	1,059,361	1,067,676
Motor de Tração	-	-	257,675	260,667
Controlador Eletrónico	-	-	165,516	167,437
Total	2,536,079	2,753,573	3,358,704	3,393,717

Nos ICEVs, a carroçaria e o chassis continuam a ser os componentes com maior contribuição para as emissões, durante esta fase. Para os ICEVs, a carroçaria representa cerca de 45% e o chassis 34% do total de emissões. Estes valores destacam a intensidade de recursos e energia associados à produção destes componentes específicos.

Contrastando com os ICEVs, os EVs apresentam um perfil de emissões distinto. Observa-se que os EVs, em geral, produzem mais GEE do que os ICEVs nesta fase, em grande parte devido à introdução de componentes como o motor de tração e o controlador eletrónico. Estes

componentes representam novas fontes de emissões que não estão presentes nos ICEVs. Para os EVs, o motor de tração e o controlador eletrónico representam juntos aproximadamente 12% do total das emissões de GEE.

Importante destacar, no entanto, que os EVs emitem menos para o sistema de propulsão comparativamente aos ICEVs, representa apenas cerca de 4% do total das suas emissões. Esta diferença deve-se ao fato de que as emissões da produção das baterias não estão contabilizadas nesta análise, visto que serão examinadas detalhadamente numa secção exclusiva às baterias.

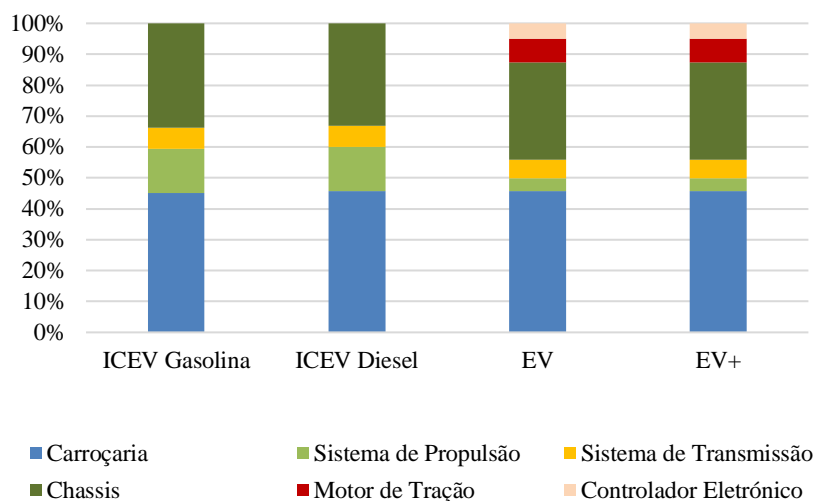


Figura 5.5 - Distribuição das emissões de GEE por tipo de componente integrado nos veículos.

Este padrão de distribuição das emissões reforça a complexidade inerente da avaliação do impacto ambiental dos EVs. Embora a fase de produção dos EVs demonstre um perfil de emissões mais elevado devido à introdução de componentes eletrónicos, o potencial de redução das emissões durante a fase operacional é significativo.

É crucial, portanto, considerar estas informações no contexto mais amplo das políticas de sustentabilidade e desenvolvimento de infraestruturas. As estratégias para mitigar o impacto ambiental dos EVs devem incluir a otimização dos processos de produção e o aumento da eficiência dos componentes.

5.2.2 Análise dos componentes CVM para diversos cenários

A análise das emissões de GEE durante o ciclo de vida dos componentes estende-se para um cenário que utiliza 100% de materiais reciclados (REC), um mix energético 100% renovável (REW), um cenário de projeção para o ano de 2050 e um cenário com um prolongamento da vida útil dos veículos para 300000 quilómetros.

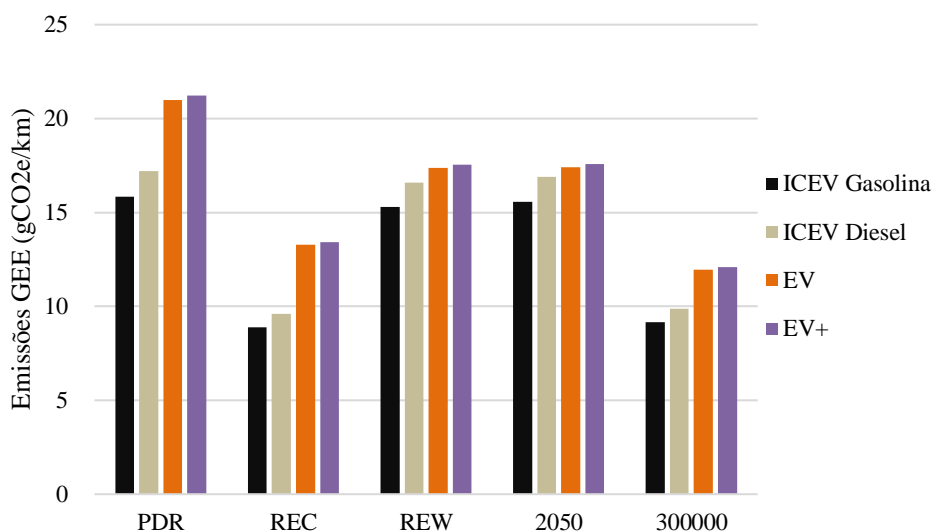


Figura 5.6 - Emissões de GEE associados à extração e produção dos componentes, para os diversos cenários em análise.

No cenário padrão (PDR), as emissões associadas aos componentes dos veículos são consideravelmente elevadas. Observa-se que os veículos elétricos (EV e EV+) emitem cerca de 24% mais GEE do que os veículos a gasolina e aproximadamente mais 19% do que os veículos a diesel.

A transição para o uso de materiais 100% reciclados resulta numa redução significativa das emissões para todos os tipos de veículos. As emissões dos ICEVs gasolina e diesel diminuem em cerca de 44% e 41%, respetivamente, em relação ao cenário padrão. Para os EVs, observa-se uma diminuição de 38%.

Projetando para o ano de 2050 e para o cenário REW, espera-se uma redução das emissões em cerca de 19% relativamente ao cenário PDR, para os EVs, refletindo as melhorias no uso de processos de manuseamento e produção de materiais mais sustentáveis e um abastecimento de energia menos poluente.

Considerando uma vida útil do veículo de 300.000 km, as emissões de GEE diminuem em todos os veículos. Esta redução é particularmente notável nos ICEVs gasolina e diesel, onde as emissões descem para as 9 gCO₂/km, e nos EVs, que registam uma redução para as 12 gCO₂/km, representando uma diminuição de 36% relativamente ao cenário padrão.

5.2.3 Análise ADR (Montagem, Descarte, Reciclagem)

A avaliação ambiental do ciclo de vida dos materiais visa ir além do uso funcional dos componentes, considerando também os processos de montagem, descarte e reciclagem (ADR) aos quais estão sujeitos. Esta secção reflete a influência dos procedimentos ADR, analisando os parâmetros que mais contribuem para as emissões durante esta fase.

Os parâmetros ADR, como o fabrico de tintas, pintura, HVAC & iluminação, aquecimento, manipulação dos materiais, soldagem, ar comprimido e o próprio descarte dos veículos. A

produção de tintas tem emissões relativamente baixas em comparação com outros processos, mas apresenta o maior aumento nos EVs, o que pode ser atribuído a processos de pintura mais complexos ou extensos.

Tabela 5.2 - Emissões de GEE (CVM), associadas aos processos de montagem, descarte e reciclagem.

Processos ADR	unidades: gCO ₂ eq	
	ICEV's	EV's
Tintas	3,975	21,386
Pintura	173,928	201,959
HVAC & Iluminação	13,713	73,771
Aquecimento	210,673	210,993
Manuseamento dos Materiais	2,840	15,276
Soldadura	3,782	20,343
Ar Comprimido	5,665	30,477
Descarte	16,941	82,153
Total	431,517	656,357

Os processos de manuseamento dos materiais e soldagem nos EVs podem ter aumentado significativamente as emissões, conforme evidenciado pelo avanço tecnológico e requisitos de segurança associados ao manuseamento e montagem dos materiais que compõem as baterias.

O tratamento no fim da vida útil dos veículos também é mais significativo no caso dos EVs, o que pode ser atribuído à dependência de componentes elétricos, que geralmente requerem mais energia para a desmontagem e têm um processo de reciclagem mais complexo.

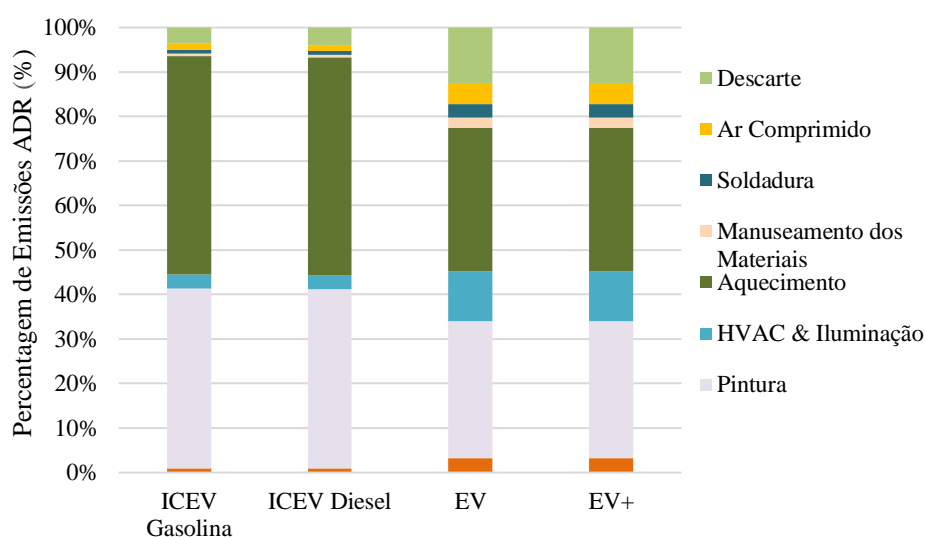


Figura 5.7 - Distribuição das Emissões de GEE associadas aos processos de ADR.

Observa-se que a pintura e o aquecimento dominam os elementos de ADR nas emissões relacionadas para ambos os ICEVs e EVs. Relativamente aos processos de eliminação e reciclagem dos componentes dos veículos verifica-se um aumento acentuado nos EVs, reiterando a necessidade de melhores tecnologias de reciclagem e tratamentos dos veículos no fim da vida útil, para diminuir os encargos ambientais associados.

5.2.4 Análise ADR para diversos cenários

Na análise da fase de Montagem, Descarte e Reciclagem (ADR) do ciclo de vida dos veículos, destacam-se as variações percentuais no consumo energético e nas emissões de gases de efeito estufa (GEE) entre os diferentes cenários avaliados.

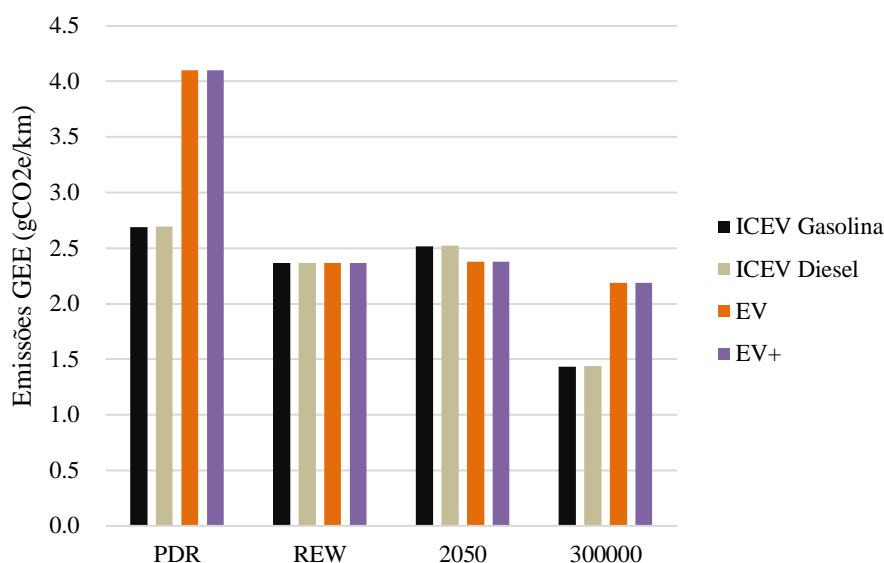


Figura 5.8 - Emissões de GEE associadas aos processos de ADR, para diversos cenários em análise.

No cenário REW, observa-se uma redução substancial nas emissões de GEE quando comparado ao cenário PDR. Os veículos ICEV Gasolina e Diesel apresentam uma redução de 12%, enquanto os EV e EV+ registam uma redução mais significativa de 42%. Este declínio reflete o impacto positivo da penetração de fontes renováveis no mix energético.

Para 2050, as emissões mantêm-se relativamente estáveis em comparação ao cenário REW, indicando a continuidade dos benefícios das energias renováveis previamente incorporadas. As reduções são modestas, com uma pequena redução de 6% para os ICEVs e aproximadamente 42% para os EVs, sugerindo avanços incrementais nas tecnologias de reciclagem e consequente diminuição do impacto ambiental dos materiais utilizados.

O cenário de vida útil para 300000 quilómetros demonstra a maior redução das emissões de GEE, com uma diminuição de 47% para todos os veículos, em comparação com o cenário PDR. Estes resultados sublinham como o tempo de vida do veículo, aliado a práticas de gestão sustentável do fim de vida, pode distribuir os impactos ambientais de forma mais

eficaz ao longo do tempo, diminuindo significativamente o impacto por quilómetro percorrido.

Estes resultados realçam a importância de integrar tecnologias avançadas, o uso de materiais reciclados e energia renovável para otimizar os processos de ADR. A continuidade na adopção dessas práticas é fundamental para alcançar reduções de emissões duradouras e significativas.

5.2.5 Análise das baterias dos EVs

O impacto ambiental do ciclo de vida das baterias nos Veículos Elétricos (EVs) está a tornar-se uma área de elevada importância quando analisamos e comparamos diferentes tecnologias automóveis. Esta secção apresenta uma análise das etapas de fabrico, montagem e reciclagem das baterias para o EVs, focando-se particularmente nas emissões decorrentes da reciclagem pelo método Pyro.

Tabela 5.3 - Emissões de GEE (CVM), associadas aos processos de produção dos materiais, montagem e reciclagem das baterias dos EVs.

	unidades: gCO ₂ eq		
	Manufatura Mat.	Montagem	Reciclagem
EV	1,442,380	464,357	372,634
EV+	1,786,756	716,943	558,951

A fase mais intensiva em termos de emissões é a manufatura dos materiais que vão integrar as baterias (Manufatura Mat.) para ambos os EVs com 1,442,380 gCO₂ e os EV+ com 1,786,756 gCO₂. Do ponto de vista energético e ecológico, inclui materiais como o lítio, cobalto e níquel, que são matérias-primas com um impacto ambiental muito significativo.

As emissões da reciclagem (Reciclagem), totalizando 372,634 gCO₂ para o EV e 558,951 gCO₂ para o EV+, confirmam que a sua quota é significativa para demonstrar o impacto ambiental. Neste caso, o método Pyro, que utiliza tratamento térmico para recuperação dos metais das baterias em fim de vida, apesar da elevada eficiência de recuperação de materiais, o processo Pyro é intensivo em energia e gera emissões que devem ser controladas e minimizadas.

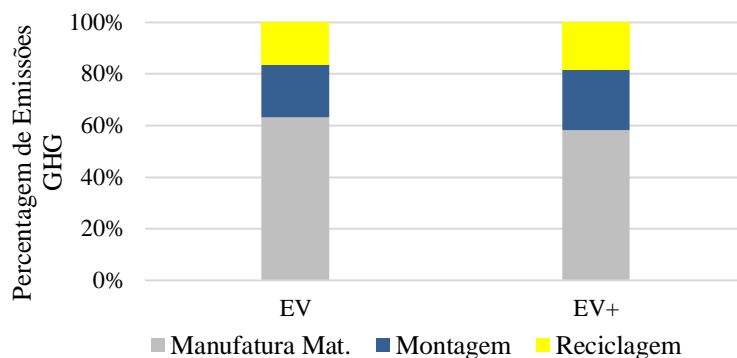


Figura 5.9 - Distribuição das emissões de GEE associadas aos processos de produção dos materiais, montagem e reciclagem das baterias dos EVs.

A fase de fabrico dos materiais destacou-se como um contributo maior para a pegada ambiental da análise do ciclo de vida das baterias. Os processos de montagem também contribuíram notavelmente para as emissões de GEE, com um aumento observado no EV+. Embora a reciclagem, utilizando o método Pirometalúrgico (Pyro) apresenta um desafio devido à sua natureza intensiva em termos energéticos. Os dados sublinham a necessidade de continuar a investigação para métodos mais sustentáveis de extração de materiais, design de baterias e métodos de reciclagem avançados, para melhorar a sustentabilidade deste tipo de tecnologias.

Retomando a análise aprofundada do processo de reciclagem de baterias dos EVs, focamos agora nas emissões e recuperação de materiais associados a quatro métodos de reciclagem: Pirometalúrgico (Pyro), Hidrometalúrgico: Inorgânico e Orgânico e Reciclagem Direta. Posteriormente, esses métodos são avaliados relativamente ao seu impacto ambiental e eficiência na recuperação de materiais valiosos.

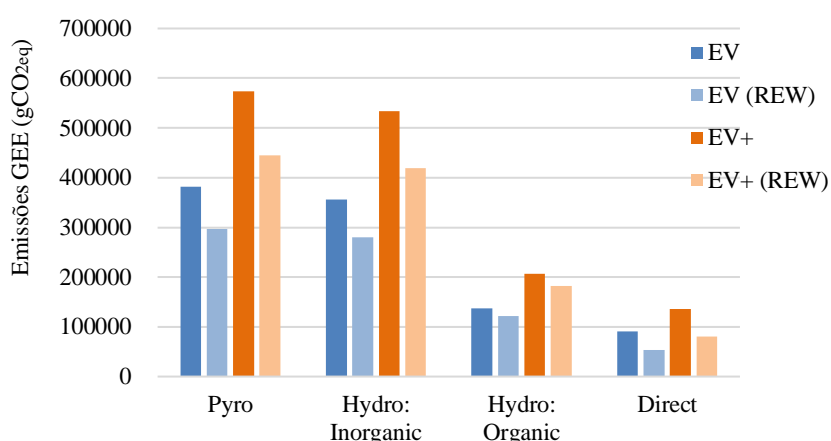


Figura 5.10 - Emissões de GEE associadas aos métodos de reciclagem das baterias dos EVs.

O método pirometalúrgico caracteriza-se pela utilização de altas temperaturas para fundir e recuperar metais. Demonstra uma eficiência particularmente elevada na recuperação de

Sulfato de Cobalto, com um fator de alocação de 67%. Contudo, é menos eficaz na recuperação de Sulfato de Níquel e Carbonato de Lítio, com fatores de alocação de 15% e 16%, respectivamente. Isto indica que, embora o Pyro seja adequado para extrair certos materiais como o cobalto, pode não ser a melhor escolha para outros.

Para os EVs no cenário PDR, este método resulta em emissões de 382.269 gCO_{2eq} e para o EV+, as emissões alcançam as 573.404 gCO_{2eq}. Transitando para o cenário REW, esses valores diminuem para 296.283 gCO_{2eq} para o EV e 444.425 gCO_{2eq} para os EV+, traduzindo-se numa redução de 22%. Esta diminuição substancial destaca a eficácia do uso de fontes de energia renováveis na redução significativa da pegada de carbono dos processos metalúrgicos de alta temperatura.

O método Hidrometalúrgico com ácido inorgânico envolve o uso de soluções aquosas para lixiviar metais dos materiais das baterias. Apresenta fatores de alocação para Sulfato de Cobalto e Sulfato de Níquel, 63% e 14%, respectivamente. Isto sugere uma recuperação menos eficiente destes materiais em comparação com a Pirometalurgia, possivelmente devido aos diferentes mecanismos químicos envolvidos no processo de lixiviação.

No cenário PDR, as emissões para o EV são de 355.589 gCO_{2eq} e 533.383 gCO_{2eq} para o EV+. Com a transição para o REW, as emissões reduzem-se para 279.767 CO_{2eq} para o EV e 419.651 CO_{2eq} para o EV+, demonstrando uma redução de 21% para ambos os EV e EV+. Os processos de menor temperatura deste método beneficiam marcadamente de fontes de energia mais limpas, sublinhando sua vantagem ambiental quando acoplado com energia renovável.

O processo hidrometalúrgico com ácido orgânico utiliza ácidos orgânicos, que oferecem tipicamente um processo de lixiviação mais suave. Os fatores de alocação para os Sulfatos de Cobalto e Níquel são de 53% e 12%, respectivamente. O método mostra melhor eficiência na recuperação de Carbonato de Lítio com 16%, o que pode ser atribuído à capacidade dos ácidos orgânicos de lixiviar seletivamente os compostos de lítio sem degradar outros materiais de forma agressiva.

Este método mostra emissões de 137.679 gCO_{2eq} para os EVs e 206,518 gCO_{2eq} para os EV+ sob o cenário PDR. No cenário REW, as emissões descem para 121,544 gCO_{2eq} e 182,316 gCO_{2eq} para o EV e EV+, resultando numa redução de 12%. As menores emissões no cenário REW enfatizam a influência do mix energético nos processos de reciclagem, que compensam a natureza intensiva em energia deste processo químico.

O método de reciclagem direta foca-se no condicionamento e reutilização dos materiais das baterias, sendo particularmente eficaz na recuperação de NMC111 (Li (Ni_{1/3}Mn_{1/3}Co_{1/3}) O₂), com um impressionante fator de alocação de 85%. Isto sugere que a reciclagem direta é altamente eficaz em preservar a integridade estrutural e química dos materiais do cátodo, tornando-a adequada para aplicações onde é crucial manter a qualidade do material original da bateria.

O método de reciclagem direta, que é geralmente mais eficiente em termos energéticos, mostra emissões de 90,436 gCO_{2eq} para o EV e 135,653 gCO_{2eq} para o EV+ no cenário PDR. No cenário REW, as emissões diminuem para 53,787 gCO_{2eq} e 80,681 gCO_{2eq}, respectivamente, indicando reduções de emissões de 41% para ambos os tipos de EV.

5.2.6 Análise das baterias dos EVs para todos os cenários

No cenário PDR, a emissão de gases de efeito estufa (GEE) das baterias de EV e EV+ são de 15 e 21 gCO₂/km, respectivamente. Esses valores refletem os impactos ambientais decorrentes da produção das baterias e dos materiais extraídos para esse processo.

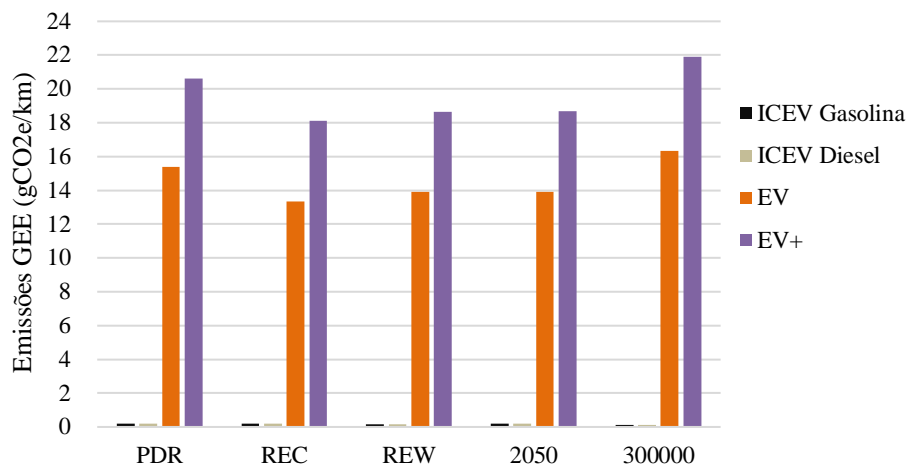


Figura 5.11 - Emissões de GEE associadas ao ciclo de vida das baterias dos veículos, para diversos cenários em análise.

Se materiais reciclados forem utilizados de forma eficaz, essas emissões são reduzidas para 13 gCO₂eq/km para o EV e 18 gCO₂eq/km para EV+. Isso indica um benefício ambiental significativo pelo uso de materiais reciclados em comparação com materiais virgens que requerem menos energia para processamento, reduzindo a procura por processos intensivos relacionados com a mineração.

No cenário REW, as emissões das baterias do EV e EV+ diminuem para 14 e 19 gCO₂eq/km, respectivamente. Isso implica que ao utilizar fontes de energia mais limpas na produção da bateria, a pegada de carbono associada a esses processos é reduzida. À semelhança do que se verifica para o cenário de projeção para 2050.

No cenário de 300.000 km, registam-se emissões de cerca de 16 gCO₂eq/km para o EV e 22 gCO₂eq/km para o EV+. O aumento pode ser atribuído aos processos adicionais de fabrico e reciclagem exigidos ao longo da vida útil do veículo, visto ser necessário a substituição da bateria durante o tempo de vida útil.

5.2.7 Análise dos fluídos para diversos cenários

No cenário PDR, os ICEVs apresentam emissões de cerca de 3.5 gCO₂eq/km, o que se mantém constante para os restantes cenários. Essa relação sugere que o impacto ambiental dos fluídos utilizados nos ICEVs não é influenciado significativamente por esses fatores. Os EVs mantêm emissões mais baixas que os ICEVs, para todos esses cenários, registando 1 gCO₂eq/km.

No cenário de vida útil de 300.000 km, as emissões dos ICEVs diminuem ligeiramente para as 3 gCO₂eq/km.

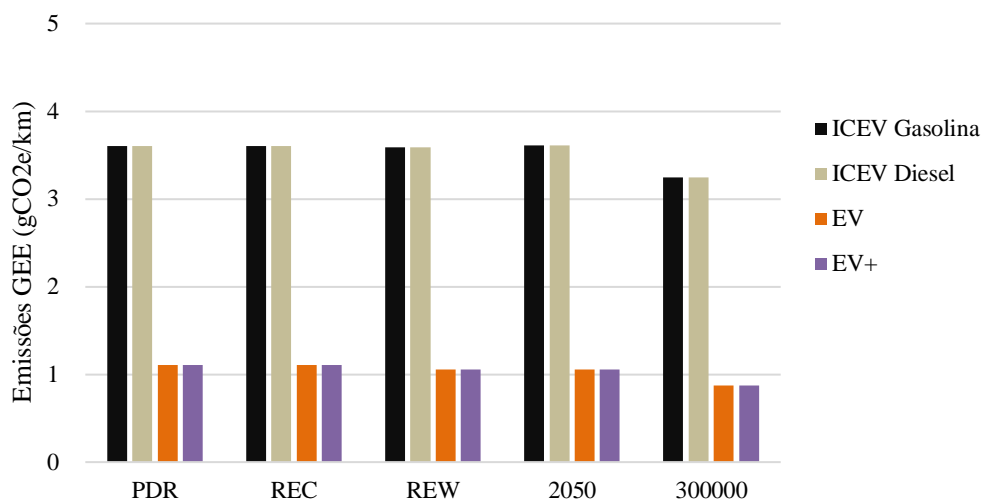


Figura 5.12 - Emissões de GEE associadas ao ciclo de vida dos fluídos utilizados nos veículos.

No geral, os dados sugerem que o ciclo de vida dos fluidos nos EVs é menos significativo do ponto de vista ambiental do que nos ICEVs, uma diferença que permanece estável em diversos cenários. Os resultados enfatizam as vantagens dos EVs relativamente à utilização dos fluidos nos veículos.

5.3 Análise CVM para os diferentes cenários

Analisando os dados apresentados nos gráficos sobre o ciclo de vida completo dos materiais dos veículos, identificam-se tendências no consumo energético e emissões de GEE para os diferentes cenários em análise.

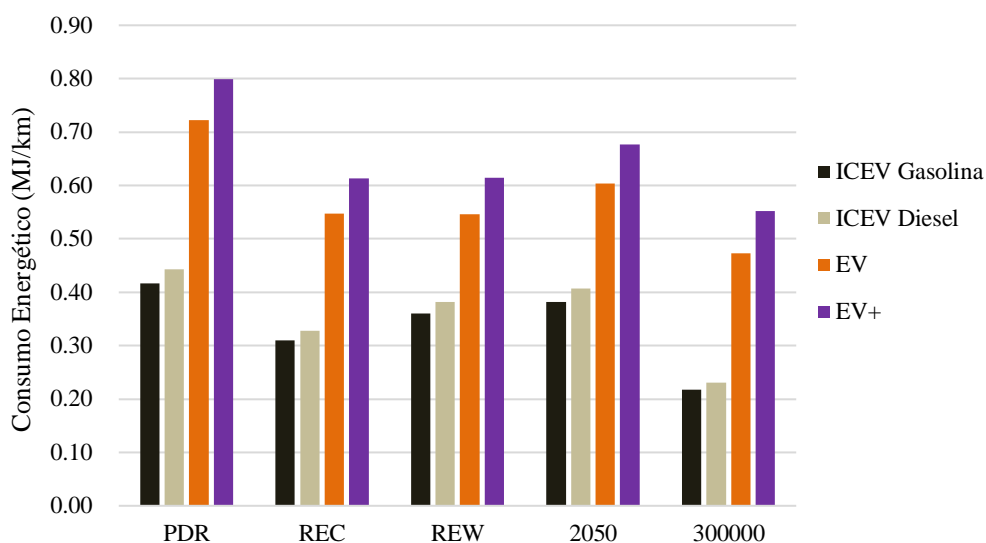


Figura 5.13 - Consumo energético (CVM) para os diversos cenários em análise.

No cenário REC, observa-se uma redução no consumo de energia e nas emissões para todos os tipos de veículos. ICEV Gasolina e Diesel apresentam uma diminuição de 26% e 25% do consumo de energia, respectivamente, enquanto as emissões diminuem cerca de 32% para ambos. EV e EV+ seguem essa tendência com uma redução de 24% no consumo energético e uma diminuição de 29% das emissões. A transição para o uso de materiais reciclados demonstra claramente o seu potencial para reduzir significativamente a pegada ambiental da produção dos veículos.

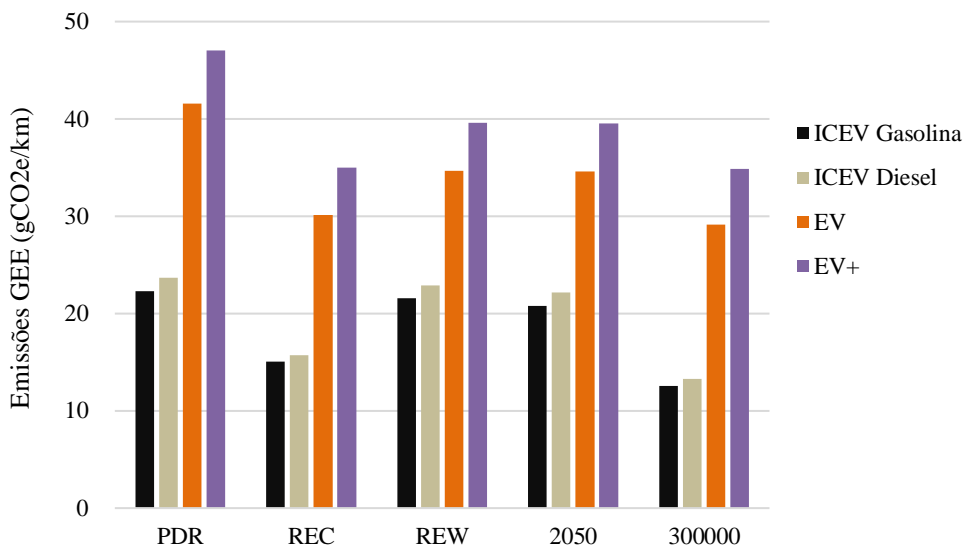


Figura 5.14 - Emissões de GEE (CVM) para os diversos cenários em análise.

No cenário REW, as emissões para o EV e EV+ são de 35 e 40 gCO_{2eq}/km respectivamente, sugerindo que a integração de energia renovável durante a fase de produção mantém os

benefícios alcançados pelo uso de materiais reciclados. Para os EVs, verifica-se uma redução do consumo energético em cerca de 23% comparativamente ao cenário padrão, o que resulta numa diminuição de 16% das emissões de GEE.

Olhando para 2050, as emissões para os EVs são idênticas ao cenário REW, indicando o potencial dos processos de manipulação dos materiais a longo prazo com práticas sustentáveis. Ao examinar o cenário de vida útil 300000 km, observa-se uma redução significativa no consumo de energia para ICEV Gasolina e Diesel em 48%, e as emissões em aproximadamente 44%. Os EVs apresentam uma redução no consumo de energia de cerca de 35% e nas emissões de 26-30%.

Os resultados estão alinhados com estudos atuais, que sugerem que a adoção de materiais reciclados e a extensão da vida útil dos veículos são estratégias chave para reduzir as emissões do ciclo de vida dos materiais.

5.4 Análise LCA para todos os cenários

No cenário REC, o consumo energético para os ICEVs Gasolina e Diesel reduz para aproximadamente 0.34 MJ/km e 0.36 MJ/km, respetivamente, representando uma diminuição de 19% e 18% em relação ao cenário PDR.

Simultaneamente, as emissões de GEE descem para as 169 gCO_{2eq}/km e 161 gCO_{2eq}/km, refletindo uma redução aproximada de 4% para ambos os tipos de veículos. Para os EVs e EV+, observam-se reduções acentuadas no consumo energético de 17% e 16% respetivamente, com as emissões de GEE diminuindo para 112 gCO_{2eq}/km e 124 gCO_{2eq}/km, o que representa uma redução de 8% e 7%.

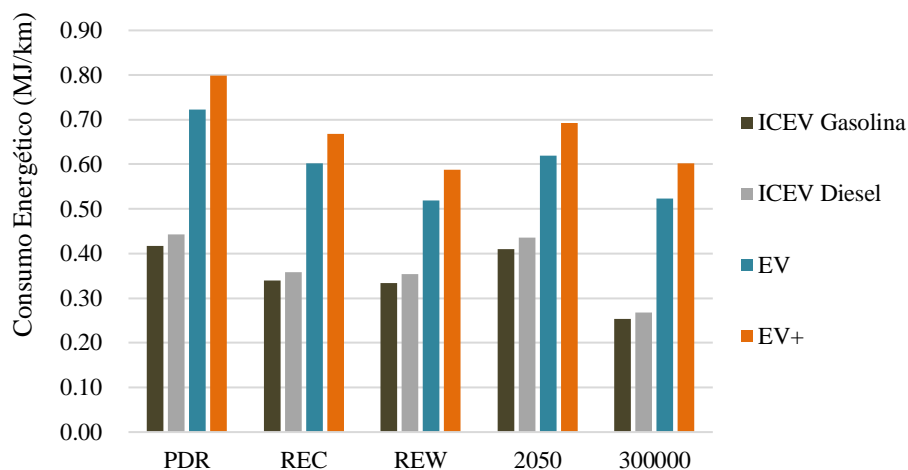


Figura 5.15 - Consumo energético LCA, para os diversos cenários em análise.

A implementação do mix energético 100% renovável resulta em uma redução mais significativa nas emissões para o EV e EV+, alcançando as 54 gCO_{2eq}/km e 61 gCO_{2eq}/km, que são reduções de 56% e 54% relativamente ao cenário PDR. Esta melhoria destaca o impacto direto das fontes de energia limpas no desempenho ambiental dos veículos elétricos,

além de uma redução no consumo energético para 0.52 MJ/km e 0.59 MJ/km. As projeções até 2050 indicam que as práticas implementadas nos cenários anteriores (REC e REW) são sustentadas ao longo do tempo, com o EV e EV+ a manterem baixas emissões de GEE de 49 gCO_{2eq}/km e 55 gCO_{2eq}/km.

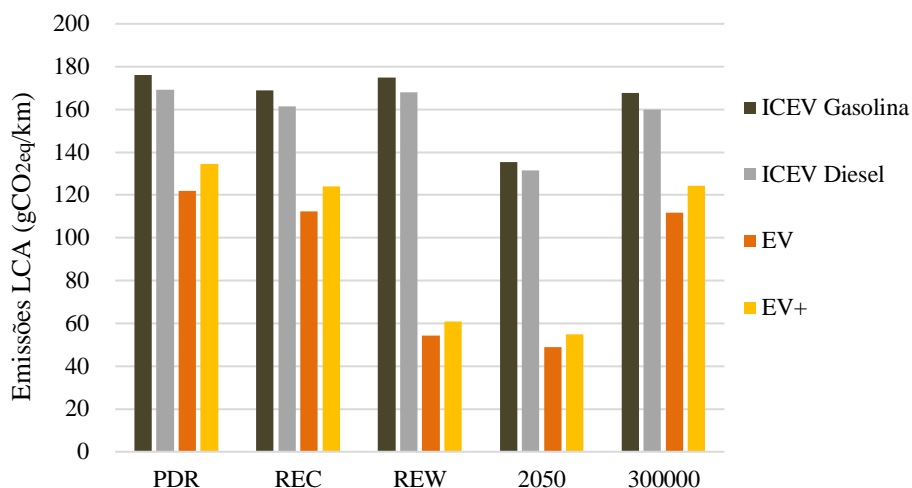


Figura 5.16 - Emissões de GEE (LCA), para os diversos cenários em análise.

Ao examinar o cenário de vida útil 300000 km, observa-se uma redução significativa no consumo de energia para os ICEVs em 40%, e as emissões em aproximadamente 5%. Os EVs apresentam uma redução no consumo de energia de cerca de 25-28% o que resulta numa redução das emissões de 25-28%.

Estes resultados sublinham a eficácia de estratégias como a reciclagem dos materiais e a adoção de energia renovável. A interdependência entre a fase de produção e a fase operacional dos veículos revela que ambos são cruciais analisar e investigar continuamente por forma a alcançar uma redução substancial do impacto ambiental no setor automóvel.

5.5 Análise dos resultados e comparação com os resultados da revisão bibliográfica

5.5.1 Análise Wheel-to-Wheels (WTW)

A comparação dos resultados do Cenário PDR com estudos anteriores revela variações significativas nas emissões de gCO_{2eq}/km para as diferentes tecnologias automóveis. O artigo científico com resultados mais próximos ao Cenário PDR é o de Ozdemir et al. (2020) realizado na Turquia. Ambos apresentam valores similares para os EVs, o que reflete uma composição energética semelhante, com uma participação relevante de fontes renováveis, mas ainda com uma dependência considerável de combustíveis fósseis, nomeadamente o carvão e gás natural.

Tabela 5.4 - Análise comparativa com a revisão bibliográfica (WTW).

Estudo	Mix Energético	Tempo de Vida [km]	Tecnologia	Emissões gCO _{2eq} /km
(Ozdemir et al., 2020)	Turquia 2020	7.85	ICEV Gasolina	183
			BEV	74
(Woo et al., 2017)	EU 22 2017	150000	ICEV Gasolina	101
			ICEV Gasóleo	90
			EV	44
(M. Shafique et al., 2019)	Hong Kong 2019	150000	ICEV Gasolina	240
			ICEV Gasóleo	200
			EV	143
Resultados Cenário PDR	Portugal 2019	160000	ICEV Gasolina	154
			ICEV Gasóleo	145
			EV	80
			EV+	87

Por outro lado, os artigos científicos (M. Shafique et al., 2019), (Woo et al., 2017) que foram realizados para o mix energético europeu (22 países) e para o mix energético de Hong Kong. Os resultados utilizando o mix energético EU 22 demonstram emissões consideravelmente mais baixas, atribuíveis a uma matriz energética europeia mais renovável e a uma maior penetração de energia nuclear no mix energético. Em contraste, os valores de Hong Kong são substancialmente mais elevados, devido à alta dependência do carvão para a produção de eletricidade, que resulta em maiores emissões de CO_{2eq}/km.

Essas variações destacam a influência significativa da matriz energética regional e da eficiência dos próprios veículos. O Cenário PDR reflete uma matriz energética portuguesa com uma participação significativa de fontes renováveis, resultando em emissões que, apesar de serem mais baixas comparadas a regiões com forte dependência de carvão, ainda não atingem os níveis mais baixos observados em regiões com maior integração de energias renováveis e nuclear.

5.5.2 Análise ciclo de vida dos materiais (CVM)

O estudo de Baudoin (2007), que considera um tempo de vida útil de 300,000 km, apresenta emissões de GEE para os ICEVs ligeiramente superiores aos valores do Cenário 300000, evidenciando que os ICEVs, durante o ciclo de vida dos materiais, mantiveram-se estáveis. As emissões dos veículos elétricos no Cenário 300000 também são ligeiramente menores, destacando que as melhorias contínuas da fase de produção dos materiais, têm pouca influência quando as emissões são distribuídas pelo tempo de vida útil dos veículos de 300000 quilómetros.

Tabela 5.5 - Análise comparativa com a revisão bibliográfica (CVM).

Estudo	Mix Energético	Tempo de Vida [km]	Tecnologia	Emissões gCO _{2eq} /km
(Baudoin, 2007)	EU 2007	300000	ICEV Gasolina	17
			ICEV Gasóleo	17
			BEV	34
(P. Baptista et al., 2010)	EU 2010	150000	ICEV Gasolina	31
			ICEV Gasóleo	32
			EV	48
(M. Shafique et al., 2019)	Hong Kong 2019	150000	ICEV Gasolina	43
			ICEV Gasóleo	43
			EV	71
Resultados Cenário PDR	Portugal 2019	160000	ICEV Gasolina	22
			ICEV Gasóleo	24
			EV	42
			EV+	47
Resultados Cenário 300000	Portugal 2019	300000	ICEV Gasolina	13
			ICEV Gasóleo	13
			EV	29
			EV+	35

A análise comparativa entre os estudos de P. Baptista et al. (2010), M. Shafique et al. (2019) e os Resultados Cenário PDR, que consideram um tempo de vida útil de 150,000-160,000 km, revela emissões de GEE significativamente mais baixas no Cenário PDR. As reduções das emissões para os ICEVs e para os EVs no Cenário PDR podem ser atribuídas à maior eficiência tecnológica dos veículos e um mix energético com maior penetração renovável.

Os resultados do Cenário PDR e do Cenário 300000 destacam-se pela redução nas emissões de GEE em comparação com os artigos científicos analisados. Esta análise sublinha a importância crucial do tempo de vida útil dos veículos e do mix energético regional no ciclo de vida dos materiais.

5.5.2 Análise ciclo de vida completo dos veículos (LCA)

A tabela apresentada permite uma comparação detalhada das emissões de GEE em gramas de CO₂ equivalente por quilómetro (CO_{2eq}/km) para diferentes tecnologias de veículos para diversos artigos científicos analisados.

Tabela 5.6 - Análise comparativa das emissões de GEE com a revisão bibliográfica (LCA).

Artigos Científicos	Mix Energético	Tempo de Vida [km]	Tecnologia	Emissões GEE gCO _{2eq} /km
(P. Girardi et al., 2015)	Itália 2015	150000	ICEV Gasolina	308
			EV	155
(P. Baptista et al., 2010)	EU 2010	150000	ICEV Gasolina	198
			ICEV Gasóleo	180
			EV	121
(M. Shafique et al., 2019)	Hong Kong 2019	150000	ICEV Gasolina	283
			ICEV Gasóleo	243
			EV	214
(T. Hawkins, B. Singh et al.)	EU 2012	150000	ICEV Gasolina	260
			ICEV Gasóleo	225
			EV	197
(Rangaraju et al., 2015)	Bélgica 2015	150000	ICEV Gasolina	180
			ICEV Gasóleo	160
			EV	60
(Faria et al., 2013)	Portugal 2013	16	ICEV Gasolina	220
			ICEV Gasóleo	170
			EV	140
Resultados Cenário PDR	Portugal 2019	160000	ICEV Gasolina	176
			ICEV Gasóleo	169
			EV	122
			EV+	134

Os resultados do Cenário PDR para Portugal em 2019 indicam emissões de 176 gCO_{2eq}/km para veículos a gasolina, 169 gCO_{2eq}/km para veículos a gasóleo, 122 gCO_{2eq}/km para veículos elétricos e 134 gCO_{2eq}/km para o veículo elétrico (EV+). Para veículos a gasolina (ICEV Gasolina), as emissões de GEE no Cenário PDR são inferiores a todos os artigos científicos analisados. O estudo de P. Girardi et al. (2015) na Itália reporta 308 gCO_{2eq}/km, sendo o valor mais elevado registado. No caso dos veículos a gasóleo (ICEV Gasóleo), os resultados do Cenário PDR apresentam valores ligeiramente superiores apenas ao artigo de Rangaraju et al. (2015), que reporta 160 gCO_{2eq}/km.

Para os veículos elétricos (EV), as emissões no Cenário PDR (122 gCO_{2eq}/km) são ligeiramente superiores ao estudo de P. Baptista et al. (2010), que reporta 121 gCO_{2eq}/km, e bastante superiores aos valores reportados por Rangaraju et al. (2015), de 60 gCO_{2eq}/km. Esta diferença significativa pode ser explicada pela elevada contribuição de energia nuclear e renováveis no mix energético da Bélgica, que contribui para menores emissões associadas à utilização de veículos elétricos.

Os resultados do estudo de P. Baptista et al. (2010) apresentam emissões idênticas para o ICEV a gasolina e o EV, comparativamente ao Cenário PDR. De notar, que a proximidade das emissões do Nissan Leaf versão de 2010 e a versão de 2019, pode ser explicada pela melhoria contínua na eficiência energética dos componentes e no fabrico dos veículos, juntamente com a evolução das tecnologias de baterias que, apesar de apresentarem capacidades diferentes, beneficiam de processos de produção mais eficientes e sustentáveis. Adicionalmente, o aumento da densidade energética das baterias e a eficiência dos novos sistemas de gestão de energia contribuem para que as emissões totais se mantenham similares, refletindo um equilíbrio entre o aumento da capacidade e a melhoria de eficiência dos EVs.

Os resultados do Cenário PDR de 2019 posicionam Portugal favoravelmente em termos de emissões de GEE. As comparações com os artigos científicos sublinham os avanços na eficiência dos veículos e a crescente incorporação de energias renováveis no mix energético

português, posicionando Portugal como um exemplo de progresso sustentável e desenvolvimento.

6. Conclusão

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) dos veículos com motor de combustão interna (ICEVs) e veículos elétricos (EVs) revela conclusões importantes sobre os impactos ambientais e o consumo energético destas tecnologias. A análise abrange as fases *Well-to-Tank* (WTT), *Tank-to-Wheel* (TTW) e o ciclo de vida dos materiais (MLC), proporcionando uma visão detalhada das emissões de gases com efeito de estufa (GEE) e do consumo energético associado a cada tipo de veículo em diferentes cenários.

A análise *Well-to-Wheel* (WTW) dos ICEVs demonstra que esses veículos são mais intensivos em termos energéticos e de emissões do que os EVs, com um aumento de aproximadamente 50% nas emissões. A fase de TTW para os ICEVs é a mais intensa, contribuindo com cerca de 85% para as emissões totais do ciclo de vida. Por outro lado, para os EVs, a fase de WTT é a responsável por aproximadamente 80% das emissões totais do ciclo de vida, devido principalmente à produção de eletricidade utilizada para carregar as baterias.

Durante a análise *Well-to-Wheel* (WTW), constatou-se que os veículos elétricos (EVs) emitem significativamente menos gases com efeito de estufa (GEE) quando alimentados pela eletricidade da rede elétrica francesa, com emissões de 13 gCO_{2eq}/km. Em comparação, as emissões são de 64 gCO_{2eq}/km no Reino Unido e cerca de 80 gCO_{2eq}/km em Portugal, no ano de 2019. Um veículo elétrico em operação na França emite 84% menos GEE em comparação a um veículo em Portugal. No Reino Unido, um veículo elétrico emite 20% menos GEE do que em Portugal. No entanto, as projeções para 2050 indicam uma inversão desta situação: os EVs na França passam a emitir 44% menos GEE do que os EVs em Portugal. Adicionalmente, em comparação com o Reino Unido, projeta-se que os EVs em Portugal emitirão 60% menos GEE.

No ciclo de vida dos materiais, a produção dos componentes e baterias são os principais fatores de contribuição para as emissões de GEE dos EVs. No cenário PDR, as baterias dos EVs representam cerca de 40% das emissões totais, enquanto os componentes representam aproximadamente 45-50%.

O cenário que apresentou os melhores resultados em termos de consumo energético e emissões foi o cenário de utilização de materiais 100% reciclados (REC). Nesse cenário, os veículos com motor de combustão interna (ICEVs) consomem 26% menos energia, o que resulta numa diminuição de 34% nas emissões de gases com efeito de estufa (GEE) em comparação com o cenário padrão (PDR). Para os veículos elétricos (EVs), observa-se uma redução de 24% no consumo energético, o que leva a uma diminuição de 27% nas emissões de GEE para este cenário.

Os resultados da Avaliação do Ciclo de Vida (LCA) revelam que o cenário de projeção para o ano de 2050 apresenta uma redução substancial nas emissões de GEE, com uma diminuição de aproximadamente 23% para os ICEVs e 60% para os EVs, comparativamente às emissões registadas no cenário padrão. Em seguida, o cenário de 100% energia renovável (REW)

indica uma redução de 55% nas emissões de GEE, para os EVs. Os cenários de utilização de materiais 100% reciclados (REC) e de aumento da vida útil para 300.000 km, as emissões de GEE são semelhantes em ambos, mostrando uma redução de 5% para os ICEVs e 8% para os EVs, respetivamente.

Os resultados da Avaliação do Ciclo de Vida (LCA) revelam variações significativas nas emissões de gases com efeito de estufa (GEE) entre os diferentes tipos de veículos, para os diversos cenários em análise.

No cenário de 100% energia renovável (REW), observou-se a maior redução nas emissões de GEE. O Nissan Leaf (EV) apresenta uma diminuição de 69% em comparação com o ICEV a gasolina e 68% em comparação com o ICEV a diesel, com emissões evitadas de 121 gCO_{2eq}/km e 114 gCO_{2eq}/km, respetivamente. Para o Leaf+ (EV+), as reduções são de 65% em comparação com o ICEV a gasolina e 64% em comparação com o ICEV a diesel, com emissões evitadas de 114 gCO_{2eq}/km e 107 gCO_{2eq}/km, respetivamente. Este cenário sublinha o impacto positivo do aumento da penetração renovável na rede elétrica, proporcionando a maior redução nas emissões entre todos os cenários analisados, quando comparamos ambas as tecnologias.

Em contraste, no cenário padrão (PDR), os resultados evidenciam as menores reduções nas emissões de GEE. O Nissan Leaf (EV) reduz as emissões de GEE em 31% em comparação com o ICEV a gasolina e 28% em comparação com o ICEV a diesel, o que se traduz em menos 54 gCO_{2eq}/km e 47 gCO_{2eq}/km, respetivamente. Para o Leaf+ (EV+), as reduções são de 24% em comparação com o ICEV a gasolina e 20% em comparação com o ICEV a diesel, com emissões evitadas de 42 gCO_{2eq}/km e 35 gCO_{2eq}/km, respetivamente. Este cenário representa as condições atuais de produção e utilização de materiais, sem a integração significativa de energias renováveis ou avanços tecnológicos futuros.

Estes resultados demonstram que, enquanto o cenário padrão (PDR) oferece reduções modestas nas emissões de GEE, a transição para uma rede elétrica baseada em 100% de energias renováveis (REW) proporciona reduções substanciais, evidenciando a importância crítica do setor energético para maximizar os benefícios ambientais dos veículos elétricos.

É necessária uma melhoria e desenvolvimentos contínuos dos modelos de LCA para refletir as mudanças rápidas nas tecnologias de veículos, na produção de energia e nos métodos de reciclagem. Os interessados devem considerar as misturas de eletricidade regionais e os perfis operacionais dos veículos para otimizar o desempenho ambiental dos veículos, pois as disparidades regionais na produção de energia podem influenciar significativamente as emissões do ciclo de vida dos EVs.

As tendências e análises derivadas dos estudos de LCA fornecem uma compreensão abrangente dos fatores que influenciam o consumo de energia e as emissões de diferentes tipos de veículos. Eles informam os interessados sobre os benefícios e desafios ambientais associados à adoção de EVs e ICEVs, destacando o papel crítico da tecnologia veicular, fontes de energia e medidas políticas na formação da sustentabilidade futura do setor automotivo.

A fim de melhorar esta análise sugere-se:

- Analisar novas tecnologias automóveis para o panorama europeu;
- Analisar a influência da utilização de diferentes elétrodos para as baterias dos EVs;
- Analisar o impacto da penetração de novas tecnologias automóveis na frota nacional;
- Analisar os impactos da utilização de energia renováveis no setor da indústria;
- Analisar economicamente a viabilidade da utilização de novas tecnologias de veículos comparativamente com as tecnologias automóveis convencionais;

7. Referências Bibliográficas

- [1] ENT, «Electric Road Transport Policies in Europe till 2015, opportunities, experiences and recommendations», n.º September 2011, 2011.
- [2] S. Ziemann, A. Grunwald, L. Schebek, D. B. Müller, e M. Weil, «The future of mobility and its critical raw materials», *Rev. Metall. Cah. Inf. Tech.*, vol. 110, n.º 1, pp. 47–54, 2013, doi: 10.1051/metal/2013052.
- [3] T. R. Hawkins, B. Singh, G. Majeau-Bettez, e A. H. Strømman, «Comparative Environmental Life Cycle Assessment of Conventional and Electric Vehicles», *J. Ind. Ecol.*, vol. 17, n.º 1, pp. 53–64, fev. 2013, doi: 10.1111/j.1530-9290.2012.00532. x.
- [4] P. Girardi, A. Gargiulo, e P. C. Brambilla, «A comparative LCA of an electric vehicle and an internal combustion engine vehicle using the appropriate power mix: the Italian case study», *Int. J. Life Cycle Assess.*, vol. 20, n.º 8, pp. 1127–1142, ago. 2015, doi: 10.1007/s11367-015-0903-x.
- [5] A. Nordelöf, M. Messagie, A.-M. Tillman, M. Ljunggren Söderman, e J. Van Mierlo, «Environmental impacts of hybrid, plug-in hybrid, and battery electric vehicles—what can we learn from life cycle assessment? », *Int. J. Life Cycle Assess.*, vol. 19, n.º 11, pp. 1866–1890, nov. 2014, doi: 10.1007/s11367-014-0788-0.
- [6] «Como a UE poderá atingir a neutralidade carbónica até 2050 | Atualidade | Parlamento Europeu». Acedido: 8 de setembro de 2022. Disponível em: <https://www.europarl.europa.eu/news/pt/headlines/society/20190926STO62270/como-a-ue-podera-atingir-a-neutralidade-carbonica-ate-2050>
- [7] S. Suh e G. Huppes, «Methods for Life Cycle Inventory of a product», *J. Clean. Prod.*, vol. 13, n.º 7, pp. 687–697, jun. 2005, doi: 10.1016/j.jclepro.2003.04.001.
- [8] «Life Cycle Assessment (LCA) explained - PRé Sustainability». Acedido: 19 de setembro de 2022. [Em linha]. Disponível em: <https://pre-sustainability.com/articles/life-cycle-assessment-lca-basics/>
- [9] P. Baptista, M. Tomás, e C. Silva, «Plug-in hybrid fuel cell vehicles market penetration scenarios», *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 35, n.º 18, pp. 10024–10030, set. 2010, doi: 10.1016/j.ijhydene.2010.01.086.
- [10] S. J. Curran, R. M. Wagner, R. L. Graves, M. Keller, e J. B. Green, «Well-to-wheel analysis of direct and indirect use of natural gas in passenger vehicles», *Energy*, vol. 75, pp. 194–203, out. 2014, doi: 10.1016/j.energy.2014.07.035.
- [11] «CE Center - Promoting Sustainable Design Through Life-Cycle Assessment Applications». Acedido: 19 de setembro de 2022. Disponível em: <https://continuingeducation.bnppmedia.com/courses/tally/promoting-sustainable-design-through-life-cycle-assessment-applications/2/>

- [12] «Alternative Fuels Data Center: How Do Gasoline Cars Work? » Acedido: 8 de setembro de 2022. Disponível em: <https://afdc.energy.gov/vehicles/how-do-gasoline-cars-work>
- [13] G. Zheng e Z. Peng, «Life Cycle Assessment (LCA) of BEV’s environmental benefits for meeting the challenge of ICExit (Internal Combustion Engine Exit) », *Energy Rep.*, vol. 7, pp. 1203–1216, nov. 2021, doi: 10.1016/j.egy.2021.02.039.
- [14] «Alternative Fuels Data Center: How Do All-Electric Cars Work? » Acedido: 8 de setembro de 2022. Disponível em: <https://afdc.energy.gov/vehicles/how-do-all-electric-cars-work>
- [15] «The History of the Electric Car | Department of Energy». Acedido: 8 de setembro de 2022. [Em linha]. Disponível em: <https://www.energy.gov/articles/history-electric-car>
- [16] «Camille Jenatzy». Acedido: 20 de setembro de 2022. Disponível em: <https://sportscardigest.com/camille-jenatzy/>
- [17] «La Jamais Contente – Wikipédia, a enciclopédia livre». Acedido: 8 de setembro de 2022. Disponível em: https://pt.wikipedia.org/wiki/La_Jamais_Contente
- [18] «20 Truths About the GM EV1 Electric Car | GreenCar.com». Acedido: 8 de setembro de 2022. Disponível em: <https://web.archive.org/web/20090123001021/http://www.greencar.com/features/gm-ev1/>
- [19] «ACAP | Estatísticas». Acedido: 8 de setembro de 2022. Disponível em: <https://www.acap.pt/pt/estatisticas>
- [20] «Aircraft – Eviation». Acedido: 8 de setembro de 2022. Disponível em: <https://www.eviation.co/aircraft/>
- [21] M. Zackrisson, L. Avellán, e J. Orlenius, «Life cycle assessment of lithium-ion batteries for plug-in hybrid electric vehicles – Critical issues», *J. Clean. Prod.*, vol. 18, n.º 15, pp. 1519–1529, nov. 2010, doi: 10.1016/j.jclepro.2010.06.004.
- [22] L. A. Ellingsen, G. Majeau-Bettez, B. Singh, A. K. Srivastava, L. O. Valøen, e A. H. Strømman, «Life Cycle Assessment of a Lithium-Ion Battery Vehicle Pack», *J. Ind. Ecol.*, vol. 18, n.º 1, pp. 113–124, fev. 2014, doi: 10.1111/jiec.12072.
- [23] J. B. Dunn, L. Gaines, J. C. Kelly, C. James, e K. G. Gallagher, «The significance of Li-ion batteries in electric vehicle life-cycle energy and emissions and recycling’s role in its reduction», *Energy Environ. Sci.*, vol. 8, n.º 1, pp. 158–168, 2015, doi: 10.1039/C4EE03029J.
- [24] E. Helmers, J. Dietz, e S. Hartard, «Electric car life cycle assessment based on real-world mileage and the electric conversion scenario», *Int. J. Life Cycle Assess.*, vol. 22, n.º 1, pp. 15–30, jan. 2017, doi: 10.1007/s11367-015-0934-3.
- [25] L. L. P. De Souza, E. E. S. Lora, J. C. E. Palacio, M. H. Rocha, M. L. G. Renó, e O. J. Venturini, «Comparative environmental life cycle assessment of conventional vehicles with different fuel options, plug-in hybrid and electric vehicles for a sustainable transportation system in Brazil», *J. Clean. Prod.*, vol. 203, pp. 444–468, dez. 2018, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.08.236.
- [26] L. A.-W. Ellingsen, B. Singh, e A. H. Strømman, «The size and range effect: lifecycle greenhouse gas emissions of electric vehicles», *Environ. Res. Lett.*, vol. 11, n.º 5, p. 054010, mai. 2016, doi: 10.1088/1748-9326/11/5/054010.
- [27] R. Faria, P. Marques, P. Moura, F. Freire, J. Delgado, e A. T. De Almeida, «Impact of the electricity mix and use profile in the life-cycle assessment of electric vehicles»,

- Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 24, pp. 271–287, ago. 2013, doi: 10.1016/j.rser.2013.03.063.
- [28] Z. Wu, M. Wang, J. Zheng, X. Sun, M. Zhao, e X. Wang, «Life cycle greenhouse gas emission reduction potential of battery electric vehicle», *J. Clean. Prod.*, vol. 190, pp. 462–470, jul. 2018, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.04.036.
- [29] J. D. Kim e M. Rahimi, «Future energy loads for a large-scale adoption of electric vehicles in the city of Los Angeles: Impacts on greenhouse gas (GHG) emissions», *Energy Policy*, vol. 73, pp. 620–630, out. 2014, doi: 10.1016/j.enpol.2014.06.004.
- [30] M. Jafari, A. Gauchia, K. Zhang, e L. Gauchia, «Simulation and Analysis of the Effect of Real-World Driving Styles in an EV Battery Performance and Aging», *IEEE Trans. Transp. Electrification*, vol. 1, n.º 4, pp. 391–401, dez. 2015, doi: 10.1109/TTE.2015.2483591.
- [31] S. Rangaraju, L. De Vroey, M. Messagie, J. Mertens, e J. Van Mierlo, «Impacts of electricity mix, charging profile, and driving behavior on the emissions performance of battery electric vehicles: A Belgian case study», *Appl. Energy*, vol. 148, pp. 496–505, jun. 2015, doi: 10.1016/j.apenergy.2015.01.121.
- [32] L. Gaines, «Life-Cycle Analysis for Lithium-Ion Battery Production and Recycling».
- [33] G. Majeau-Bettez, T. Hawkins, e A. Strømman, «Life Cycle Environmental Assessment of Lithium-Ion and Nickel Metal Hydride Batteries for Plug-In Hybrid and Battery Electric Vehicles», *Environ. Sci. Technol.*, vol. 45, pp. 4548–54, mai. 2011, doi: 10.1021/es103607c.
- [34] Q. Qiao, F. Zhao, Z. Liu, S. Jiang, e 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, out. 2017, doi: 10.1016/j.apenergy.2017.05.041.
- [35] M. Beuse, T. Schmidt, e V. Wood, «A “technology-smart” battery policy strategy for Europe», *Science*, vol. 361, pp. 1075–1077, set. 2018, doi: 10.1126/science.aau2516.
- [36] F. Larouche *et al.*, «Progress and Status of Hydrometallurgical and Direct Recycling of Li-Ion Batteries and Beyond», *Materials*, vol. 13, n.º 3, p. 801, fev. 2020, doi: 10.3390/ma13030801.
- [37] B. Makuza, Q. Tian, X. Guo, K. Chattopadhyay, e D. Yu, «Pyrometallurgical options for recycling spent lithium-ion batteries: A comprehensive review», *J. Power Sources*, vol. 491, p. 229622, fev. 2021, doi: 10.1016/j.jpowsour.2021.229622.
- [38] C. K. Kirwa, J. Coyle, e H. Luo, «Direct Recycling of End-of-Life Lithium-Ion Battery Cathode Materials through Redox Mediator Chemistry», *ECS Meet. Abstr.*, vol. MA2023-01, n.º 4, p. 853, ago. 2023, doi: 10.1149/MA2023-014853mtgabs.
- [39] O. Schmidt, M. Thomitzek, F. Röder, S. Thiede, C. Herrmann, e U. Krewer, «Modeling the Impact of Manufacturing Uncertainties on Lithium-Ion Batteries», *J. Electrochem. Soc.*, vol. 167, n.º 6, p. 060501, mar. 2020, doi: 10.1149/1945-7111/ab798a.
- [40] J. Zhu, «End-of-life or second-life options for retired electric vehicle batteries», *Cell Rep. Phys. Sci.*, vol. 2, n.º 8, p. 100537, ago. 2021, doi: 10.1016/j.xcrp.2021.100537.
- [41] C. Ioakimidis, A. Murillo-Marrodán, A. Bagheri, D. Thomas, e K. Genikomsakis, «Life Cycle Assessment of a Lithium Iron Phosphate (LFP) Electric Vehicle Battery in Second Life Application Scenarios», *Sustainability*, vol. 11, n.º 9, p. 2527, mai. 2019, doi: 10.3390/su11092527.
- [42] Y. Jiang, X. Chen, S. Yan, S. Li, e T. Zhou, «Pursuing green and efficient process towards recycling of different metals from spent lithium-ion batteries through Ferro-

- chemistry», *Chem. Eng. J.*, vol. 426, p. 131637, dez. 2021, doi: 10.1016/j.cej.2021.131637.
- [43] P. Mistry, M. Johnson, e U. Galappaththi, «Selection and ranking of rail vehicle components for optimal lightweighting using composite materials», *Proc. Inst. Mech. Eng. Part F J. Rail Rapid Transit*, vol. 235, n.º 3, pp. 390–402, mar. 2021, doi: 10.1177/0954409720925685.
- [44] H. C. Kim e T. Wallington, «Life-Cycle Energy and Greenhouse Gas Emission Benefits of Lightweighting in Automobiles: Review and Harmonization», *Environ. Sci. Technol.*, vol. 47, mai. 2013, doi: 10.1021/es3042115.
- [45] B. Resta, P. Gaiardelli, e G. Pezzotta, «Sustainability in the auto repair industry: a life cycle assessment application», *Int. J. Prod. Lifecycle Manag.*, vol. 4, n.º 1/2/3, p. 146, 2009, doi: 10.1504/IJPLM.2009.031671.
- [46] H. C. Kim e T. J. Wallington, «Life Cycle Assessment of Vehicle Lightweighting: A Physics-Based Model to Estimate Use-Phase Fuel Consumption of Electrified Vehicles», *Environ. Sci. Technol.*, vol. 50, n.º 20, pp. 11226–11233, out. 2016, doi: 10.1021/acs.est.6b02059.
- [47] «Argonne GREET Model». Acedido: 8 de setembro de 2022. Disponível em: <https://greet.es.anl.gov/>
- [48] «Excel Model». Acedido: 8 de setembro de 2022. Disponível em: https://greet.es.anl.gov/greet_excel_model.models
- [49] «Nissan Leaf 40 kWh - Watts On». Acedido: 8 de setembro de 2022. Disponível em: <https://welectric.pt/carros/nissan-leaf-40-kwh/>
- [50] Autof cil, «Renault Clio», *Autof Cil*, vol. 57, pp. 38–42, 2005.
- [51] «Nissan Leaf 40 kWh specs, price, photos, offers and incentives». Acedido: 8 de setembro de 2022. Disponível em: https://evcompare.io/cars/nissan/nissan_leaf_40kwh/
- [52] «Nissan Leaf 2 e+ 62kWh Technical Specs, Dimensions». Acedido: 8 de setembro de 2022. Disponível em: <https://www.ultimatespecs.com/car-specs/Nissan/117552/Nissan-Leaf-2-e+-62kWh.html>
- [53] «Nissan LEAF Teardown: Lithium-ion battery pack structure - MarkLines Automotive Industry Portal». Acedido: 8 de setembro de 2022. Disponível em: https://www.marklines.com/en/report_all/rep1786_201811#report_area_1
- [54] «Here Is The Nissan LEAF e+ 62 kWh Battery: Video». Acedido: 8 de setembro de 2022. Disponível em: <https://insideevs.com/news/342009/here-is-the-nissan-leaf-e-62-kwh-battery-video/>
- [55] Nissan, «Nissan Leaf | Tecnologia | Design exterior | Condução elétrica | Interior | Eletrifi que o mundo | Equipamento, dimensões, cores | Garantias e serviços Imprimir | Sair».
- [56] «What are the WLTP standards? a more realistic certification - Renault Group». Acedido: 8 de setembro de 2022. Disponível em: <https://www.renaultgroup.com/en/news-on-air/news/the-wltp-a-standard-that-car-drivers-can-understand/>
- [57] INE, «Inquérito à Mobilidade nas Áreas Metropolitanas do Porto e de Lisboa Predomínio do automóvel nas deslocações dos residentes das Áreas Metropolitanas de Porto e Lisboa», *Destaque Informação À Comun. Soc.*, pp. 1–22, 2018.
- [58] European Commission, *JEC Well-To-Tank Report v5: Annexes*. 2020. doi: 10.2760/06704.

- [59] «Eletricidade - Balanço Mensal». Acedido: 8 de setembro de 2022. Disponível em: <https://datahub.ren.pt/pt/eletricidade/balanco-mensal/>
- [60] J. Clauß, S. Stinner, C. Solli, K. B. Lindberg, H. Madsen, e L. Georges, «A generic methodology to evaluate hourly average CO₂eq. intensities of the electricity mix to deploy the energy flexibility potential of Norwegian buildings», 2018.
- [61] «Perfis Perdas 2019 | E-REDES». Acedido: 8 de setembro de 2022. Disponível em: <https://www.e-redes.pt/en/node/19441>
- [62] «Nissan Leaf», EV Database. Acedido: 17 de maio de 2024. Disponível em: <https://ev-database.org/car/1656/Nissan-Leaf>
- [63] «• Electricity transmission losses UK 2021 | Statista». Acedido: 8 de setembro de 2022. Disponível em: <https://www.statista.com/statistics/550583/electricity-losses-in-transmission-uk/>
- [64] «• France: electricity production by source 2021 | Statista». Acedido: 8 de setembro de 2022. Disponível em: <https://www.statista.com/statistics/768066/electricity-production-france-source/>
- [65] «Electric vehicle lithium-ion battery | Innovation | Nissan Motor Corporation Global Website». Acedido: 8 de setembro de 2022. Disponível em: https://www.nissan-global.com/EN/INNOVATION/TECHNOLOGY/ARCHIVE/LI_ION_EV/
- [66] A. Burnham, «Updated Vehicle Specifications in the GREET Vehicle-Cycle Model», July, pp. 1–40, 2012.
- [67] «• Portugal: energy production outlook by source 2050 | Statista». Acedido: 8 de setembro de 2022. Disponível em: <https://www.statista.com/statistics/1190045/portugal-energy-production-outlook-by-source/>
- [68] Portuguese Government, «Roadmap for Carbon Neutrality 2050 (RNC2050) Long-Term Strategy for Carbon Neutrality of the Portuguese Economy by 2050», *Rep. R 2622019*, vol. 2050, p. 102, 2019.
- [69] Department for Business Energy & Industrial Strategy, «Digest of UK Energy Statistics 2020», *Natl. Stat.*, p. ., 2020.
- [70] «• France: energy production outlook by source 2050 | Statista». Acedido: 8 de setembro de 2022. Disponível em: <https://www.statista.com/statistics/1190034/france-energy-production-outlook-by-source/>
- [71] G. Ault, D. Frame, N. Hughes, N. Strachan, J. Watson, e M. Pollitt, «Electricity Network Scenarios for Great Britain in 2050 Technical Appendices to Final Report for Ofgem’ s LENS Project», *Development*, n.º 157, 2008.
- [72] «Carbon capture, utilisation and storage - Fuels & Technologies - IEA». Acedido: 8 de setembro de 2022. Disponível em: <https://www.iea.org/fuels-and-technologies/carbon-capture-utilisation-and-storage>
- [73] F. Lanati, M. Benini, e A. Gelmini, «Impact of the penetration of electric vehicles on the Italian power system: A 2030 scenario», em *2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting*, San Diego, CA: IEEE, jul. 2011, pp. 1–8. doi: 10.1109/PES.2011.6039145.

8. Anexos

Tabela 8.1 - Emissões de gases com efeito de estufa referentes ao ciclo do combustível (WTT) e o ciclo de utilização (TTW), para o Renault Clio Tce100 e Renault Clio Blue dCi 85, para a área metropolitana de Lisboa.

AML	kgCO ₂ /ano [WTT]	kgCO ₂ /ano [TTW]
Renault Clio Tce100	277.45	1475.73
Renault Clio Blue dCi 85	288.39	1370.77

Tabela 8.2 - Emissões de gases com efeito de estufa referentes ao ciclo do combustível (WTT) e o ciclo de utilização (TTW), para o Renault Clio Tce100 e Renault Clio Blue dCi 85, para a área metropolitana do Porto.

AMP	kgCO ₂ /ano [WTT]	kgCO ₂ /ano [TTW]
Renault Clio Tce100	258.51	1374.98
Renault Clio Blue dCi 85	268.70	1277.19

Tabela 8.3 - Produção energética em Portugal entre 2015 e 2019, por tipo de fonte de energia.

Consumo (GWh)	2015	2016	2017	2018	2019
Fios de Água	5365	8160	2805	6211	4121
Albufeiras	3432	7137	3921	6056	4863
Total Hídrica Regime Ordinário	8797	15297	6726	12267	8984
Sines	9657	8082	9426	8067	4025
Pego	4021	3616	4182	3050	1062
Total Central a Carvão	13678	11698	13608	11117	5087
Ribatejo	748	1648	2559	2346	2515
Lares	1836	1954	3382	1745	3323
Pego C.C	596	1131	3635	2035	2337
T.Outeiro C.C	2062	2641	3902	4007	3445
Total Gás Natural	5242	7374	13478	10133	11620
Total Produção Líquida	27717	34369	33812	33517	25691
Importação	4549	1973	3072	2994	7035
Exportação	2283	7055	5756	5650	3640
Saldo Importador	2266	-5082	-2684	-2656	3395
Hidráulica	816	1332	614	1093	1058
Térmica	7540	7203	7293	7355	7540
Eólica	11334	12188	11973	12351	13423
Fotovoltaica	760	786	853	829	1062
Ondas	0	0	0	0	0
Total Produção Renovável	20450	21509	20733	21628	23083
Bombagem Hidroelétrica	1467	1519	2223	1582	1825
Consumo	48964	49274	49638	50905	50348
Consumo (s/Saldo + Bomb)	48167	55878	54545	55145	48774

Tabela 8.4 - Emissões de gases com efeito de estufa, em gCO₂ por tipo de produção energética em Portugal.

	2015	2016	2017	2018	2019
Total Hídrica Regime Ordinário	211128	367128	161424	294408	215616
Total Central a Carvão	13691678	11709698	13621608	11128117	5092087
Total Gás Natural	2568580	3613260	6604220	4965170	5693800
Total Produção Renovável	5758058	5531626	5581644	5642098	5800435
Total Emissões	22229444	21221712	25968896	22029793	16801938