



Avaliação de cenários de descarbonização do setor rodoviário português

JOÃO PAULO HENRIQUES SALVADOR
(Licenciado em Engenharia Mecânica)

Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, na Área de Especialização de Energia, Climatização e Refrigeração

Orientadores:

Doutor Gonçalo Nuno de Oliveira Duarte
Doutora Patrícia de Carvalho Baptista
Doutor Roberto Aliandro Varela

Júri:

Presidente: Doutor Mário José Gonçalves Cavaco Mendes

Vogais:

Doutor Tiago Alexandre Abranches Teixeira Lopes Farias
Doutor Gonçalo Nuno de Oliveira Duarte

Dezembro de 2024

Avaliação de cenários de descarbonização do setor rodoviário português

JOÃO PAULO HENRIQUES SALVADOR
(Licenciado em Engenharia Mecânica)

Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, na Área de Especialização de Energia, Climatização e Refrigeração

Orientadores:

Doutor Gonçalo Nuno de Oliveira Duarte, ISEL/IPL
Doutor Patrícia de Carvalho Baptista, IST/UL
Doutor Roberto Aliandro Varella, AVL Ibérica

Júri:

Presidente: Doutor Mário José Gonçalves Cavaco Mendes, ISEL/IPL

Vogais:

Doutor Tiago Alexandre Abranches Teixeira Lopes Farias, IST/UL
Doutor Gonçalo Nuno de Oliveira Duarte ISEL/IPL

Dezembro de 2024

Agradecimentos

À minha família e em especial aos meus pais pelo apoio e aconselhamento que nunca deixaram de me dar, e por me terem dado a possibilidade de continuar os meus estudos, apesar de todas as dificuldades.

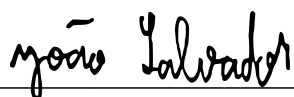
Aos meus orientadores, Prof. Doutor Gonçalo Duarte, Prof. Doutora Patrícia Baptista e Doutor Roberto Varella por todo o suporte imprescindível que me deram e pela disponibilidade que sempre demonstraram durante todo o processo de realização deste trabalho. Agradeço especialmente ao Prof. Doutor Gonçalo Duarte não só pelo apoio neste trabalho, mas também por tudo o que me ensinou durante todo o meu percurso no ensino superior mostrando sempre disponibilidade para me ajudar desde a primeira aula que tive.

Aos meus colegas de cursos, sem os quais não teria sido capaz de concluir mais um ciclo de estudo, por terem transformado todos aqueles fins de semana, feriados e horas a fio que passámos a trabalhar e a estudar em momentos inesquecíveis de companheirismo e amizade.

Declaração de integridade

Declaro que esta dissertação é o resultado da minha investigação pessoal e independente. O seu conteúdo é original e todas as fontes listadas nas referências bibliográficas foram consultadas e estão devidamente mencionadas no texto. Mais declaro que todas as referências científicas e técnicas relevantes para o desenvolvimento do trabalho estão devidamente citadas e constam das referências bibliográficas.

O autor

A handwritten signature in black ink that reads "João Salvador". The signature is written in a cursive style and is positioned above a horizontal line.

Lisboa, ..28 de Setembro. de .2024

Avaliação de cenários de descarbonização do sector rodoviário português

Resumo

Tendo em conta as metas nacionais e europeias de descarbonização, o sector dos transportes possui elevada relevância, considerando que representa cerca de 25% das emissões de gases de efeito de estufa. O presente trabalho tem como objetivo analisar estratégias de descarbonização no sector dos transportes, de forma a verificar as metas 2050. Foi utilizado um modelo que tem por base o histórico do parque automóvel nacional, as vendas de novos veículos e o abatimento dos mais antigos, para estimar a composição do parque automóvel até 2050. Pela elevada importância da mobilidade elétrica e considerando a que a partir de 2035 deixarão de ser vendidos veículos com motores de combustão interna, foram analisados cenários de penetração de veículos elétricos e de combustíveis sintéticos, que cumpram com reduções de 55% de gases de efeito de estufa em 2030 (face a 2005) e 90% em 2050 a nível europeu. Adicionalmente, também serão analisadas as premissas do Roteiro para Neutralidade Carbónica, que se prevê que a mobilidade elétrica nos ligeiros de passageiros seja superior a 36% até 2030 e atinja os 100% em 2050. Os resultados obtidos indicam que será difícil atingir as metas de descarbonização de curto prazo (2030) preconizadas para o sector dos transportes a nível nacional, mesmo num cenário em que os BEV atingem uma quota de mercado de 60% já em 2030 e 85% em 2050. No entanto os resultados demonstram também que mesmo assim as metas definidas para médio/longo prazo (2050) ainda são alcançáveis havendo mais que um caminho possível para o fazer, já que em todos os cenários desenvolvidos, é alcançada uma redução acima dos 90% das emissões WTW de CO₂, algo que está alinhado com as metas gerais de redução de 85-90% das emissões de GEE definidas no RNC2050.

Palavras-chave: descarbonização, mobilidade elétrica, gases efeito estufa, parque automóvel.

Evaluation of decarbonization scenarios for the Portuguese road sector

Abstract

Considering the national and European decarbonization targets, the transport sector is highly relevant, as it accounts for around 25% of greenhouse gas emissions. The aim of this study is to analyze decarbonization strategies in the transport sector in order to verify the 2050 targets. A model based on the history of the national vehicle fleet, sales of new vehicles and the scrapping of older vehicles was used to estimate the composition of the vehicle fleet up to 2050. Given the high importance of electric mobility and considering that vehicles with internal combustion engines will no longer be sold from 2035 onwards, scenarios were analyzed for the penetration of electric vehicles and synthetic fuels, which comply with greenhouse gas reductions of 55% in 2030 (compared to 2005) and 90% in 2050 at European level. In addition, the assumptions of the Roadmap for Carbon Neutrality will also be analyzed, with electric mobility in passenger cars expected to exceed 30% by 2030 and reach 100% by 2050. The results show that it will be difficult to achieve the decarbonization short term (2030) targets set for the transport sector at national level, even in a scenario where BEVs reach a market share of 60% by 2030 and 85% by 2050. This growth will result in a radical change in the car fleet, with electric passenger cars accounting for around 77% of it by 2050. With this transformation it will be possible to reduce net CO₂ emissions in the vehicle use phase by 27% in 2030 and 93% in 2050. However, the results also show that, the targets set for the medium to long term (2050) are still achievable and there is more than one possible way to do this, since in all the scenarios developed, a reduction of over 90% of WTW CO₂ emissions is achieved, something that is in line with the general targets of reducing GHG emissions by 85-90% set out in the RNC2050.

Keywords: *decarbonization, electric mobility, greenhouse gases, car fleet*

Lista de Símbolos e de siglas

Alfabeto romano

k	Idade do veículo
b	Inclinação da curva de sobrevivência
T	Tempo de vida previsto
$C_{x,y}$	Veículos vendidos no ano desde 2023, ainda em circulação no ano y
$C_{x,x}$	Total de veículos novos vendidos no ano x
VA_x	Veículos anteriores a 2023 ainda em circulação no ano x
T_x	Total de veículos no ano x
n	Quota mínima considerada
M	Quota máxima considerada
x_0	Ano inicial
a	Fator de crescimento
N_x	Número total de veículo da tecnologia x
V_x	Quilometragem anual de um veículo com x anos
E	Energia
e	Consumo específico de energia
L	Volume de combustível
m	Massa

Alfabeto grego

φ	Probabilidade de sobrevivência do veículo
β	Taxa de crescimento ou declive da curva de vendas
ρ	Massa específica

Siglas

<i>IEA</i>	<i>International Energy Agency</i>
<i>GEE</i>	<i>Gases com Efeito de Estufa</i>
<i>NEDC</i>	<i>New European Driving Cycle</i>

<i>WLTP</i>	<i>Worldwide Harmonized Light Vehicle Test Procedure</i>
<i>RDE</i>	<i>Real Driving Emission</i>
<i>UE</i>	<i>União Europeia</i>
<i>RNC</i>	<i>Roteiro para a Neutralidade Carbónica</i>
<i>PNEC</i>	<i>Plano Nacional Energia e Clima</i>
<i>AFR</i>	<i>Air Fuel Ratio</i>
<i>TWC</i>	<i>Three Way Catalyst</i>
<i>SCR</i>	<i>Selective Catalytic Reduction</i>
<i>DPF</i>	<i>Diesel Particle Filter</i>
<i>DOC</i>	<i>Diesel Oxidation Catalyst</i>
<i>FAME</i>	<i>Fatty Acid Methyl Esters</i>
<i>OAU</i>	<i>Óleo Alimentar Usado</i>
<i>HVO</i>	<i>Hydrotreated Vegetable Oil</i>
<i>FFA</i>	<i>Ácidos gordos livres, presentes na glicerina não refinada</i>
<i>RIND</i>	<i>Resíduos provenientes de cascas</i>
<i>EV</i>	<i>Electric Vehicle</i>
<i>BEV</i>	<i>Battery Electric vehicle</i>
<i>HEV</i>	<i>Hybrid Electric Vehicle</i>
<i>PHEV</i>	<i>Plug-in Hybrid Electric Vehicle</i>
<i>ICEV</i>	<i>Internal Combustion Engine Vehicle</i>
<i>FCEV</i>	<i>Fuel Cell Electric Vehicle</i>
<i>ICCT</i>	<i>International Council on Clean Transportation</i>
<i>ACV</i>	<i>Análise do ciclo de vida</i>
<i>WTW</i>	<i>Well-To-Wheel</i>
<i>WTT</i>	<i>Well-To-Tank</i>
<i>TTW</i>	<i>Tank-To-Wheel</i>
<i>APTA</i>	<i>American Public Transportation Association</i>
<i>ACAP</i>	<i>Associação Automóvel de Portugal</i>
<i>ACEA</i>	<i>European Automobile Manufacturers' Association</i>
<i>APA</i>	<i>Agência Portuguesa do Ambiente</i>
<i>VKT</i>	<i>Veiculos.km anuais</i>
<i>PCI</i>	<i>Poder calorífico inferior</i>
<i>DGEG</i>	<i>Direção Geral de Energia e Geologia</i>

Índice

1	INTRODUÇÃO	1.
1.1	CONTEXTO MUNDIAL/EUROPEU/NACIONAL DO SECTOR DOS TRANSPORTES	1.
1.2	NORMAS EURO	2.
1.3	OBJETIVO	3.
1.4	ESTRUTURA DO TFM	4.
2	ESTADO DA ARTE	5.
2.1	TECNOLOGIAS DE PROPULSÃO E FONTE ENERGÉTICAS NO TRANSPORTE RODOVIÁRIO	5.
2.2	CARACTERIZAÇÃO DE TENDÊNCIAS DA FROTA AUTOMÓVEL	12.
2.3	AValiação DE IMPACTES DOS TRANSPORTES RODOVIÁRIOS	15.
2.4	CENÁRIOS DE DESCARBONIZAÇÃO	20.
3	METODOLOGIA	27.
3.1	EVOLUÇÃO DA FROTA	28.
3.2	TECNOLOGIA DE PROPULSÃO	37.
3.3	FONTE ENERGÉTICA	46.
3.4	DEFINIÇÃO DE CENÁRIOS	47.
3.4.1	<i>Cenário 1: Substituição tecnológica e transição para a eletrificação</i>	47.
3.4.2	<i>Cenário 2: Alteração de fonte energética (gasóleo e gasolina)</i>	49.
3.4.3	<i>Cenário 3: Substituição tecnológica e alteração de fonte energética</i>	53.
4	RESULTADOS OBTIDOS	56.
4.1	CENÁRIO 1: SUBSTITUIÇÃO TECNOLÓGICA E TRANSIÇÃO PARA ELETRIFICAÇÃO	56.
4.2	CENÁRIO 2: ALTERAÇÃO DE FONTE ENERGÉTICA (GASÓLEO E GASOLINA)	61.
4.3	CENÁRIO 3: CENÁRIO 3: SUBSTITUIÇÃO TECNOLÓGICA E ALTERAÇÃO DE FONTE ENERGÉTICA	67.
4.4	DISCUSSÃO DAS SOLUÇÕES ADOTADAS	75.
5	CONCLUSÕES E TRABALHO FUTURO	86.
5.1	CONCLUSÕES	86.
5.2	TRABALHO FUTURO	87.
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	88.
7	ANEXOS	95.
	ANEXO 1	95.

Índice de figuras

FIGURA 1.1-ENERGIA FINAL CONSUMIDA POR SETOR NA UE EM 2021 [2].....	1.
FIGURA 2.1-REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO PROCESSO DE OXIDAÇÃO E REDUÇÃO NUM CATALISADOR DE 3 VIAS [11].....	6.
FIGURA 2.2-SISTEMA DE PÓS-TRATAMENTO DE GASES DE ESCAPE EM MOTORES DIESEL [15]	7.
FIGURA 2.3 - DESAGREGAÇÃO DE FAME PRODUZIDO NO MERCADO NACIONAL, EM 2020 [16]	8.
FIGURA 2.4 - ESQUEMA DE FUNCIONAMENTO DE UM VEÍCULO HÍBRIDO COM SISTEMA SÉRIE [20]	9.
FIGURA 2.5 - ESQUEMA DE FUNCIONAMENTO DE UM VEÍCULO HÍBRIDO COM SISTEMA PARALELO [20]	9.
FIGURA 2.6-ESQUEMA DE FUNCIONAMENTO DE UM VEÍCULO HÍBRIDO COM SISTEMA SÉRIE-PARALELO [20]	10.
FIGURA 2.7-EMIÇÕES DE CO ₂ E CONTRIBUIÇÃO NO MERCADO EUROPEU POR PAÍS EM 2022 [28].....	13.
FIGURA 2.8-EVOLUÇÃO DA CONTRIBUIÇÃO DE MERCADO DE VÁRIAS TECNOLOGIAS DE PROPULSÃO NA EU-27 [28].....	14.
FIGURA 2.9-CONTRIBUIÇÃO DE MERCADO DE DIFERENTES TECNOLOGIAS DE PROPULSÃO EM 2022 E 2023.....	15.
FIGURA 2.10-BALANÇO DA PRODUÇÃO DE ELETRICIDADE DE PORTUGAL CONTINENTAL EM 2023, POR FONTE DE ENERGIA PRIMÁRIA [35]	16.
FIGURA 2.11-REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DA ANÁLISE WTW [41].....	18.
FIGURA 2.12- CONTRIBUIÇÃO DE VÁRIOS TIPOS DE COMBUSTÍVEIS NO CONSUMO DE ENERGIA NO SETOR RODOVIÁRIO [50]	21.
FIGURA 2.13 - CENÁRIOS DE DESCARBONIZAÇÃO DESENHADOS PELA RICARDO [51].....	22.
FIGURA 2.14 - CENÁRIO DE DESCARBONIZAÇÃO "MISTO" [51]	22.
FIGURA 2.15 - EVOLUÇÃO DA QUOTA DE MERCADO DAS VÁRIAS TECNOLOGIAS PARA OS QUATRO CENÁRIOS PRINCIPAIS [53].....	23.
FIGURA 2.16 - EVOLUÇÃO DA QUOTA DE MERCADO DAS TECNOLOGIAS PARA CENÁRIO DE SENSIBILIDADE	24.
FIGURA 2.17 - METAS DEFINIDAS NO RNC20250 PARA ATINGIR A NEUTRALIDADE CARBÓNICA NO SETOR DOS TRANSPORTES [54]	25.
FIGURA 2.18-EVOLUÇÃO DA QUOTA DE ENERGIA DE FONTES RENOVÁVEIS NOS TRANSPORTES NO HORIZONTE 2030 [55]	26.
FIGURA 3.1-REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DA FERRAMENTA DE ANÁLISE CONSTRUÍDA.....	27.
FIGURA 3.2- EVOLUÇÃO DAS VENDAS DE VEÍCULOS LIGEIROS DE PASSAGEIROS ENTRE 1990-2023 [57]	28.
FIGURA 3.3- EVOLUÇÃO DAS VENDAS DE VEÍCULOS LIGEIROS COMERCIAIS ENTRE 1990-2023 [57].....	29.
FIGURA 3.4 - EVOLUÇÃO DA POPULAÇÃO E DA FROTA AO LONGO DOS ANOS	30.
FIGURA 3.5- QUOTAS DE MERCADO DE VEÍCULOS LIGEIROS DE PASSAGEIROS POR TECNOLOGIA EM 2023 [32]	34.
FIGURA 3.6-QUOTAS DE MERCADO DE VEÍCULOS LIGEIROS DE MERCADORIAS POR TECNOLOGIA EM 2023 [32].....	35.
FIGURA 3.7-CURVA DE DECAIMENTO DA QUILOMETRAGEM COM A IDADE DO VEÍCULO	39.
FIGURA 3.8-IDADE MÉDIA DO PARQUE AUTOMÓVEL NACIONAL[70]	45.
FIGURA 3.9 - EVOLUÇÃO DA QUOTA DE MERCADO DE LIGEIROS DE PASSAGEIROS, CENÁRIO 1	48.
FIGURA 3.10 - EVOLUÇÃO DA QUOTA DE MERCADO DE LIGEIROS COMERCIAIS, CENÁRIO 1.....	48.
FIGURA 3.11 - EVOLUÇÃO DA CONSTITUIÇÃO DA MISTURA DE GASOLINA, CENÁRIO 2	50.
FIGURA 3.12 - EVOLUÇÃO DA CONSTITUIÇÃO DA MISTURA DO GASÓLEO, CENÁRIO 2	51.
FIGURA 3.13 - EVOLUÇÃO DA QUOTA DE MERCADO DE LIGEIROS DE PASSAGEIROS, CENÁRIO 2.....	52.
FIGURA 3.14 - EVOLUÇÃO DA QUOTA DE MERCADO DE LIGEIROS COMERCIAIS, CENÁRIO 2.....	52.
FIGURA 3.15 - EVOLUÇÃO DA CONSTITUIÇÃO DA MISTURA DA GASOLINA, CENÁRIO 3	53.
FIGURA 3.16 - EVOLUÇÃO DA CONSTITUIÇÃO DA MISTURA DO GASÓLEO, CENÁRIO 3	54.

FIGURA 3.17 - EVOLUÇÃO DA QUOTA DE MERCADO DE LIGEIOS DE PASSAGEIROS, CENÁRIO 3.....	55.
FIGURA 3.18 - EVOLUÇÃO DA QUOTA DE MERCADO DE LIGEIOS COMERCIAIS, CENÁRIO 3.....	55.
FIGURA 4.1 - EVOLUÇÃO DO PARQUE DE AUTOMÓVEIS LIGEIOS DE PASSAGEIROS, CENÁRIO 1.....	57.
FIGURA 4.2 - EVOLUÇÃO DO PARQUE NACIONAL DE LIGEIOS COMERCIAIS, CENÁRIO 1.....	57.
FIGURA 4.3 - EMISSÕES WTT ASSOCIADAS À PRODUÇÃO DE ELETRICIDADE	59.
FIGURA 4.4 - DESAGREGAÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA POR FE (%).....	60.
FIGURA 4.5 - EVOLUÇÃO DO CONSUMO DE ELETRICIDADE, CENÁRIO 1.....	61.
FIGURA 4.6 - EVOLUÇÃO DO PARQUE DE AUTOMÓVEIS LIGEIOS DE PASSAGEIROS, CENÁRIO 2.....	62.
FIGURA 4.7 - EVOLUÇÃO DO PARQUE DE AUTOMÓVEIS LIGEIOS COMERCIAIS, CENÁRIO 2.....	62.
FIGURA 4.8 - EVOLUÇÃO DO CONSUMO DE ELETRICIDADE, CENÁRIO 2.....	65.
FIGURA 4.9 - EVOLUÇÃO DO CONSUMO DE BIOCOMBUSTÍVEIS/COMBUSTÍVEIS SINTÉTICOS E HIDROGÉNIO, CENÁRIO 2.....	66.
FIGURA 4.10 - EVOLUÇÃO DO PARQUE DE AUTOMÓVEIS LIGEIOS DE PASSAGEIROS, CENÁRIO 3.....	68.
FIGURA 4.11 - EVOLUÇÃO DO PARQUE DE AUTOMÓVEIS LIGEIOS COMERCIAIS, CENÁRIO 3.....	68.
FIGURA 4.12 - DESAGREGAÇÃO DAS EMISSÕES WTW POR FONTE ENERGÉTICA, CENÁRIO 3.....	72.
FIGURA 4.13 - EVOLUÇÃO DO CONSUMO DE ELETRICIDADE, CENÁRIO 3.....	73.
FIGURA 4.14 - CONSUMO ENERGÉTICO ASSOCIADO A BIOCOMBUSTÍVEIS, CENÁRIO 3.....	73.
FIGURA 4.15 - DESAGREGAÇÃO DO CONSUMO ENERGÉTICO POR FONTE ENERGÉTICA	74.
FIGURA 4.16 - EVOLUÇÃO DAS EMISSÕES WTW DE CO ₂ NOS 3 CENÁRIOS.....	75.
FIGURA 4.17 - EVOLUÇÃO DAS EMISSÕES DIRETAS TTW DE CO ₂ NOS 3 CENÁRIOS	77.
FIGURA 4.18 - EVOLUÇÃO DAS EMISSÕES LÍQUIDAS TTW DE CO ₂ NOS 3 CENÁRIOS.....	78.
FIGURA 4.19 - CONSUMO DE ENERGIA FINAL NOS 3 CENÁRIOS.....	80.
FIGURA 4.20 - EVOLUÇÃO DO CONSUMO DE ELETRICIDADE NOS 3 CENÁRIOS	82.
FIGURA 7.1 – RECURSOS NECESSÁRIOS PARA A PRODUÇÃO DE 1L DE COMBUSTÍVEL SINTÉTICO [78].....	95.
FIGURA 7.2-COMPARAÇÃO WTW DE EMISSÕES DE CO ₂ DE VÁRIOS COMBUSTÍVEIS PARA 2025+ [42]	97.
FIGURA 7.3-COMPARAÇÃO WTW DE ENERGIA GASTA DE CO ₂ DE VÁRIOS COMBUSTÍVEIS PARA 2025+[42]	98.
FIGURA 7.4- ENERGIA GASTA E EMISSÕES DE CO ₂ POR KM PARA CADA TIPO DE COMBUSTÍVEL [41]	99.

Índice de Tabelas

TABELA 1.1 – LIMITE DE EMISSÕES PARA NORMAS EURO [5]	3.
TABELA 2.1 - METAS DE EMISSÕES ESTABELECIDAS PELA EU [29]	12.
TABELA 3.1 - MÉDIA DE VEÍCULOS VENDIDOS E TAXAS DE CRESCIMENTOS NOS ÚLTIMOS 30 ANOS (ADAPTADO DE [57])	30.
TABELA 3.2 - PARQUE AUTOMÓVEL NACIONAL EM 2022, POR IDADE (ADAPTADO DE [53])	31.
TABELA 3.3 - DISTRIBUIÇÃO DA FROTA DE LIGEIOS DE PASSAGEIROS COM MAIS DE 10 ANOS POR NORMA EURO, EM 2021 (ADAPTADO DE [62])	32.
TABELA 3.4 -DISTRIBUIÇÃO DA FROTA DE VEÍCULOS COMERCIAIS COM MAIS DE 10 ANOS POR NORMA EURO, EM 2021 (ADAPTADO DE [62]).....	32.
TABELA 3.5 - MATRIZ DE CÁLCULO DE VEÍCULOS EM CIRCULAÇÃO.....	33.
TABELA 3.6 - DISTRIBUIÇÃO DA FROTA DE VEÍCULOS LIGEIOS DE PASSAGEIROS EM 2022 (ADAPTADO DE [61])	36.
TABELA 3.7 - DISTRIBUIÇÃO DA FROTA DE VEÍCULOS LIGEIOS COMERCIAIS EM 2022 (ADAPTADO DE [61])	37.
TABELA 3.8 - QUILOMETRAGEM MÉDIA ANUAL ADOTADA PARA CADA TIPO DE TECNOLOGIA (ADAPTADO DE [62]).....	38.
TABELA 3.9 - CONSUMO ENERGÉTICO MÉDIO DE BEV LIGEIOS DE PASSAGEIROS [60], [61]	41.
TABELA 3.10 -COMPARAÇÃO DE CONSUMOS DE GASOLINA DE VEÍCULOS PHEV E DE ICEV (ADAPTADO DE [69])	42.
TABELA 3.11 - CONSUMO TOTAL DE ENERGIA DE PHEV.....	43.
TABELA 3.12 - CONSUMO ENERGÉTICOS POR KM POR TIPO DE VEÍCULO (ADAPTADO DE [62]).....	44.
TABELA 3.13 - EMISSÕES DE CO ₂ /KM POR TIPO DE VEÍCULO (ADAPTADO DE [62])	45.
TABELA 3.14 - FATORES DE EMISSÃO [71].....	46.
TABELA 3.15 - EVOLUÇÃO DA QUOTA DE ELETRICIDADE RENOVÁVEL	49.
TABELA 4.1 - CRESCIMENTO DO NÚMERO DE BEV NA FROTA NACIONAL DE LIGEIOS	56.
TABELA 4.2 - EVOLUÇÃO DAS EMISSÕES TTW DE CO ₂	58.
TABELA 4.3 - EVOLUÇÃO DAS EMISSÕES LÍQUIDAS WTW DE CO ₂ , CENÁRIO 1	58.
TABELA 4.4 - EVOLUÇÃO DA INCORPORAÇÃO DE ENERGIAS RENOVÁVEIS, CENÁRIO 1	59.
TABELA 4.5 - VARIAÇÃO DA ENERGIA TOTAL CONSUMIDA	60.
TABELA 4.6 - EVOLUÇÃO DAS EMISSÕES DIRETAS TTW DE CO ₂ , CENÁRIO 2	63.
TABELA 4.7 - EVOLUÇÃO DAS EMISSÕES LÍQUIDAS TTW DE CO ₂ , CENÁRIO 2.....	63.
TABELA 4.8 - EVOLUÇÃO DAS EMISSÕES WTW, CENÁRIO 2.....	64.
TABELA 4.9 - EVOLUÇÃO DA INCORPORAÇÃO DE ENERGIAS RENOVÁVEIS, CENÁRIO 2.....	64.
TABELA 4.10 - VARIAÇÃO DA ENERGIA TOTAL CONSUMIDA, CENÁRIO 2	64.
TABELA 4.11 - COMPARAÇÃO ENTRE CONSUMOS DE BIOCMBUSTÍVEIS E HIDROGÉNIO, CENÁRIO 2.....	67.
TABELA 4.12 - CRESCIMENTO DO Nº DE BEV NA FROTA NACIONAL DE LIGEIOS, CENÁRIO 3	69.
TABELA 4.13 -CRESCIMENTO DO Nº DE PHEV E HEV NA FROTA NACIONAL DE LIGEIOS DE PASSAGEIROS, CENÁRIO 3	70.
TABELA 4.14 - CRESCIMENTO DO Nº DE FCEV E BEV NA FROTA NACIONAL DE LIGEIOS COMERCIAIS, CENÁRIO 3.....	70.
TABELA 4.15 - EVOLUÇÃO DAS EMISSÕES DIRETAS TTW DE CO ₂ , CENÁRIO 3	70.
TABELA 4.16 - EVOLUÇÃO DAS EMISSÕES LÍQUIDAS TTW DE CO ₂ , CENÁRIO 3.....	71.
TABELA 4.17 - EVOLUÇÃO DAS EMISSÕES WTW, CENÁRIO 3.....	71.

TABELA 4.18 - PERCENTAGEM DE INCORPORAÇÃO DE GASOLINA E GASÓLEO FÓSSIL NAS RESPETIVAS MISTURAS	71.
TABELA 4.19 - EVOLUÇÃO DA INCORPORAÇÃO DE ENERGIAS RENOVÁVEIS, CENÁRIO 3	72.
TABELA 4.20 - VARIAÇÃO DA ENERGIA TOTAL CONSUMIDA, CENÁRIO 3	74.
TABELA 4.21 - COMPARAÇÃO DA VARIAÇÃO DAS EMISSÕES WTW DE CO ₂	75.
TABELA 4.22 – EMISSÕES DE CO ₂ EM MTON CO ₂ EQ.....	79.
TABELA 4.23 - EVOLUÇÃO DO CONSUMO DE GASOLINA FÓSSIL, EM KTEP	81.
TABELA 4.24 - CONSUMO DE ELETRICIDADE EM 2050, CONSIDERANDO A PRODUÇÃO DE H ₂	83.
TABELA 4.25 - REPRESENTAÇÃO DE VEÍCULOS A COMBUSTÃO EURO 7 NO PARQUE DE LIGEIOS NACIONAL.....	84.

1 Introdução

1.1 Contexto Mundial/Europeu/Nacional do sector dos transportes

Nos últimos anos, as necessidades energéticas do mundo têm aumentado significativamente, originando uma preocupação acrescida no que toca ao consumo de combustíveis fósseis e consequente emissão de gases de efeito de estufa. Um dos setores que levanta maior preocupação é o setor dos transportes, cuja energia final é fortemente dependente (91%) da utilização de produtos petrolíferos [1]. Na europa, este setor representa cerca de 29,2% da energia final total sendo assim o setor com o maior consumo em 2021 [2].

Final energy consumption by sector, EU, 2021
(% of total, based on terajoules)

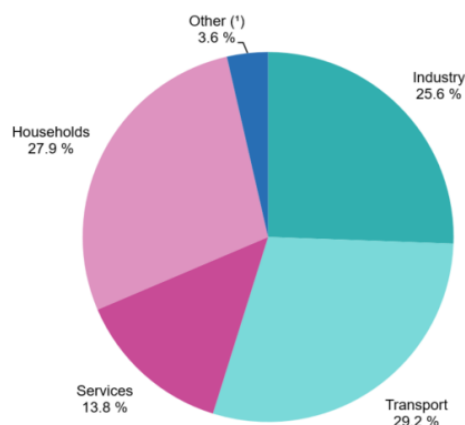


Figura 1.1-Energia final consumida por setor na UE em 2021 [2].

Em termos de emissões de CO₂, a pandemia de Covid-19 teve impactos de longo alcance na procura de energia em 2020, reduzindo as emissões globais de CO₂ em 5,2%. No entanto no ano seguinte, a rápida recuperação económica do mundo desde então, resultou no nível anual mais elevado de sempre de emissões de CO₂ representando um aumento de 6% em relação a 2020. Este aumento representa um total de cerca de 36,3 giga toneladas (Gt), segundo uma estimativa baseada na análise detalhada da IEA, região por região e por combustível [3].

No setor dos transportes, a pandemia foi também responsável pela diminuição da procura de produtos petrolíferos, o que resultou em emissões em 2021 cerca de 600 Mt mais baixas que em 2019 pré pandemia. Assim o setor dos transportes foi único setor em que as emissões globais de CO₂ permaneceram bem abaixo dos níveis de 2019 [3].

Em 2022, a recuperação da atividade de transporte de passageiros e carga na sequência da pandemia de coronavírus (Covid-19) levou a um aumento de 3% nas emissões de CO₂ dos transportes em comparação com o ano anterior. A aviação foi responsável por grande parte do aumento, à medida que as viagens aéreas continuaram a recuperar dos mínimos pandémicos para cerca de 70% dos níveis de 2019. No entanto a venda de mais de 10 milhões de carros elétricos globalmente, atingindo 14% de todas as vendas de automóveis, contribui para atenuar este aumento [1].

Também em Portugal é de notar a forte dependência de produtos provenientes do petróleo no setor dos transportes já que em 2019, 94% da procura de energia nos transportes foi coberta pelo petróleo e as emissões de GEE dos transportes aumentaram 10% entre 2014 e 2019 [4].

1.2 Normas Euro

Para além do CO₂ o setor dos transportes rodoviário é ainda responsável pela emissão de outros poluentes tais como NO_x, CO, PM (Particulate *matter* – Partículas sólidas) e outros hidrocarbonetos (HC).

É com vista a reduzir estas emissões que surge a primeira norma Euro (EURO 1) introduzida em 1992. Desde então já foram feitas mais cinco atualizações estando atualmente em vigor a EURO 6. Abaixo está uma tabela fornecida pela *Society of Motor Manufacturers and Traders (SMMT)*, que indica os limites de emissões consoante o ano de registo do automóvel e respetiva norma EURO.

Tabela 1.1 – Limite de emissões para normas EURO [5].

Euro standard	Introduction dates		Petrol		Diesel		Petrol & Diesel
	New approvals	All new registrations	NOx (g/km)	Mass of particles (g/km)	NOx (g/km)	Mass of particles (g/km)	Number of ultra-fine particles per km
Euro 1	1 July 1992	31 December 1992	0.97 ⁽¹⁾	-	0.97 ⁽¹⁾	0.14	-
Euro 2	1 January 1996	1 January 1997	0.5 ⁽¹⁾	-	0.9 ⁽¹⁾	0.1	-
Euro 3	1 January 2000	1 January 2001	0.15	-	0.5	0.05	-
Euro 4	1 January 2005	1 January 2006	0.08	-	0.25	0.025	-
Euro 5	1 September 2009	1 January 2011	0.06	0.0045 ⁽²⁾	0.18	0.0045	6 × 10 ¹¹ (3)
Euro 6	1 September 2014	1 September 2015	0.06	0.0045 ⁽²⁾	0.08	0.0045	6 × 10 ¹¹ (4) (5)

(1) Expressed as HC+NOx.
(2) Applicable to direct injection petrol engines.
(3) Applicable to diesel engines only.
(4) Limit of 6 × 10¹² in the case of direct injection petrol engines.
(5) Common limit of 6 × 10¹¹ for direct injection petrol engines and diesel engines from September 2017/September 2018.

Associado a estas imposições surgem também um conjunto de testes que asseguram o cumprimento desta legislação. Inicialmente estes ensaios eram realizados de acordo com o *New European Driving Cycle* (NEDC) que consiste numa série de testes baseados na aceleração e desaceleração de motores em banco de rolos, onde o veículo segue um ciclo de condução predefinido.

No entanto este tipo de teste, não é suficientemente representativo das emissões de um veículo em estrada e em circulação pelo que foi substituído no início de setembro de 2017 por um procedimento de teste reconhecido internacionalmente para veículos ligeiros de passageiros e comerciais, denominado *Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedure* (WLTP).

Este novo procedimento inclui um ciclo de testes que leva em conta velocidades mais elevadas, acelerações/desacelerações mais dinâmicas e autênticas e em geral condições de teste mais rigorosas [6].

Para verificar as emissões reais de cada veículo introduziu-se ainda o teste *Real Driving Emission* (RDE). O teste RDE consiste num percurso que dura entre 90 e 120 minutos e abrange uma combinação de condução “normal” urbana, rural e em autoestrada [7].

1.3 Objetivo

Tendo em conta a necessidade de delinear um plano de descarbonização para o setor rodoviário, este trabalho tem como objetivo avaliar cenários de descarbonização do sector rodoviário português com diferentes níveis de incorporação de mobilidade elétrica e biocombustíveis tendo em conta não só metas europeias como nacionais. Para tal será desenvolvida uma ferramenta de cenarização que, com base no consumo energético,

emissão de tecnologias de propulsão alternativas e sua evolução de vendas, é capaz de obter consumos energéticos e emissões de CO₂ de toda a frota de ligeiros. Posteriormente, com os resultados obtidos será possível comparar um conjunto de possibilidades quer a nível da tecnologia de propulsão quer ao nível da fonte energética. Esta comparação será não só feita entre os diversos cenários, mas também com os objetivos definidos nos roteiros nacionais (PNEC2030 e RNC2050) tudo com o intuito de avaliar o progresso e a viabilidade dos objetivos definidos nacionalmente.

1.4 Estrutura do TFM

O conteúdo desta tese está dividido em 5 capítulos principais. No Capítulo 1 é apresentado o contexto Mundial, europeu e nacional do setor dos transportes nomeadamente no que diz respeito à sua contribuição para a emissão de gases de efeito de estufa e consequentes alterações climáticas.

No capítulo 2 é feito um levantamento das tecnologias de mitigação de emissões de gases poluentes atuais e uma revisão da literatura existente no que toca a metodologias de análise incluindo variáveis relevantes para o modelo a criar. Nesta secção é ainda feita uma pesquisa sobre possíveis impactes energéticos e ambientais associados a esta transição tecnológica.

O capítulo 3 apresenta a estrutura geral do modelo desenvolvido, explorando todas as variáveis e hipóteses consideradas. É nesta secção também onde são definidos os cenários construídos e respetivos pressupostos associados.

Após caracterização do modelo, segue-se o capítulo 4, no qual são apresentados os resultados obtidos. Neste capítulo é feita ainda uma análise comparativa entre os diversos cenários construídos e os objetivos nacionais e europeus definidos.

Por último, no capítulo 5, são apresentadas as principais conclusões a retirar dos resultados sendo feita uma retrospeção de possíveis pontos a incluir num trabalho futuro.

2 Estado da arte

Como se constatou no capítulo 1, o setor dos transportes desempenha um papel fundamental na descarbonização da economia global. Deste modo há que estabelecer modelos de análise de emissões e consumos de energia para todo o tipo de veículos e todo o tipo de tecnologia de propulsão.

2.1 Tecnologias de propulsão e fonte energéticas no transporte rodoviário

Atualmente a maior parte dos automóveis em circulação têm como tecnologia de propulsão o motor de combustão interna (*ICEV – Internal Combustion Engine Vehicle*). Devido à natureza do processo de combustão de hidrocarbonetos, é inevitável a emissão de CO₂ e outros poluentes como NO_x, partículas sólidas, CO e HC (hidrocarbonetos). Além das emissões, outra desvantagem dos ICEVs é a sua eficiência que, no melhor dos casos, está entre 40 e 50 % [8], valores que em termos globais são relativamente baixos especialmente quando comparados com outras tecnologias de propulsão, especialmente BEV (*Battery Electric Vehicle*). Os ICEVs requerem sistemas de transmissão algo complexos para permitir manter o motor a funcionar em zonas operacionais relativamente eficientes. É ainda necessário ter em conta toda a manutenção associada a este tipo de veículo o que inclui trocas periódicas de óleo do motor, substituição filtros de ar, ajuste de correias, entre outros.

Uma parte dos veículos ligeiros funciona com motores de ignição por faísca (SI) e usam como combustível a gasolina. Neste tipo de motor a combustão é iniciada por uma faísca elétrica e a energia do combustível é libertada à medida que a chama se propaga através de uma mistura de combustível e ar que é comprimido. Para motores modernos em que $\lambda = 1$

(estequiométrico), emissões de CO, HC e NO_x no escape são reduzidas através do uso de um catalisador de três vias (*TWC- three way catalyst*) representado de forma esquemática na Figura 2.1 [9]. No entanto tal catalisador necessita de atingir a temperatura de conversão para se tornar eficaz na redução deste tipo de emissões.

Para além disso os catalisadores de 3 vias exigem ainda que o motor seja operado com AFR próximo do estequiométrico, isto para evitar a presença de oxigénio no escape [10].

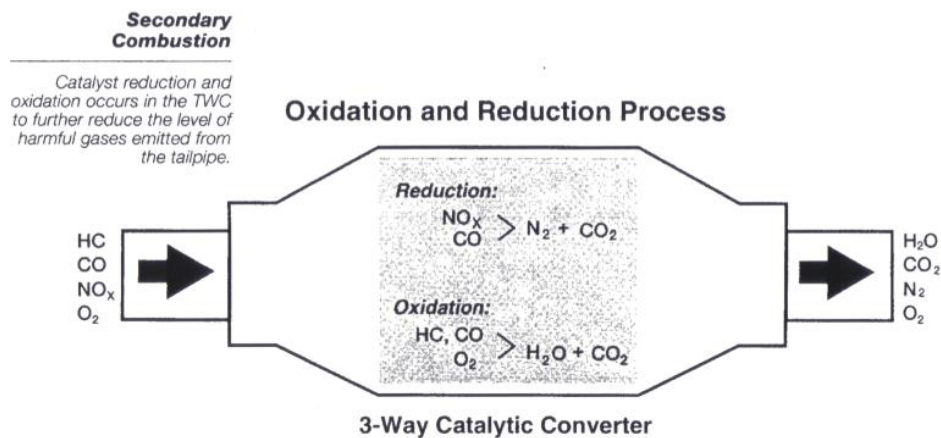


Figura 2.1-Representação esquemática do processo de oxidação e redução num catalisador de 3 vias [11].

Nos motores de ignição por compressão (CI), o combustível é injetado num ambiente de alta pressão e temperatura a provocando a autoignição à medida que o combustível (diesel) se mistura com oxigénio. No caso dos motores a gasóleo apesar da maior razão de compressão resultar numa eficiência superior comparativamente aos motores a gasolina, as condições de mistura pobre que se verificam na câmara de combustão conduzem à formação de poluentes gasosos como CO, HC e em especial NO_x e poluentes sólidos (PM) [12].

A remoção de NO_x dos motores diesel tem sido uma área foco, já que, por estes trabalharem $\lambda > 1$, não é possível utilizar um TWC normalmente usado em motores a gasolina. Tal como todos os outros poluentes, o NO_x pode ser controlado através de métodos relacionados com próprio motor (projeto do sistema de combustão, recirculação dos gases de escape ou calibração) ou através de sistema de tratamento dos gases de escape sendo que nos veículos modernos são utilizadas as duas abordagens são utilizadas em conjunto. Um exemplo moderno de um sistema de pós-tratamento dos gases de escape inclui um Lean NO_x Trap (LNT), que armazena NO_x e é submetido a uma regeneração periódica controlada, libertando o NO_x sob a forma de azoto e amoníaco, em conjunto com um sistema de redução catalítica seletiva (SCR) que captura o amoníaco gerado e utiliza-o para tratar o restante NO_x [13].

Os sistemas SCR são complexos e caros, exigindo uma injeção de solução aquosa de ureia (também conhecida como AdBlue ou Diesel exhaust fluid- DEF) a montante do catalisador.

Um SCR é normalmente seguido por um ASC (Ammonia Slip Catalyst) para remover possíveis resíduos de amoníaco do escape do motor [12].

Adicionalmente, devido ao tipo de combustão heterogénea, embora globalmente pobre, existem regiões ricas que levam a uma maior formação de partículas do que o motor a gasolina. Para combater a emissão deste poluente, quase todos os motores diesel estão equipados com filtro de partículas diesel (DPF).

Estes filtros têm uma eficiência de filtragem muito elevada (~99%), mas precisam de ser regenerados periodicamente, o que pode levar ao aumento das emissões de CO₂, devido ao alto consumo de combustível necessário para atingir as temperaturas necessárias para que ocorra a regeneração [14].

Semelhante ao TWC instalado em motores a gasolina, para motores diesel são usados Diesel Oxidation Catalyst (DOC) (Figura 2.2) para reduzir ou até mesmo remover os hidrocarbonetos não queimados (UHC) e CO no escape destes motores. O desenvolvimento atual adicional destes catalisadores, tem como um foco comum que consiste em melhorar a conversão para baixas temperaturas e reduzir a necessidade de metais preciosos [14].

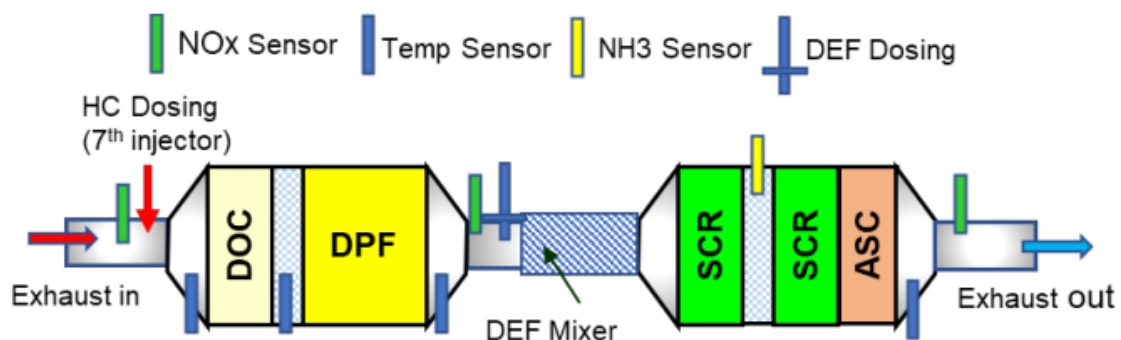


Figura 2.2-Sistema de pós-tratamento de gases de escape em motores diesel [15].

Outra forma que tem vindo a ser explorada para reduzir as emissões líquidas de CO₂, é a substituição de gasolina e gasóleo fóssil por biocombustíveis e combustíveis sintéticos sendo que a grande maioria dos biocombustíveis incorporados no mercado nacional, corresponde a substitutos do gasóleo como o biodiesel.

O biodiesel é um combustível renovável para utilização em motores de combustão interna a gasóleo. No processo de produção de biodiesel, são utilizados óleos e gorduras que são convertidos em compostos químicos chamados de ésteres monoalquílicos de cadeia longa. Esses compostos são mais conhecidos pela sigla inglesa FAME (*fatty acid methyl esters*), e o processo a partir do qual são obtidos designa-se transesterificação.

Em termos de matérias-primas, atualmente há uma clara prevalência do recurso a óleos alimentares usados (OAU) para a produção de FAME no mercado nacional, os quais representam, em todo o período analisado, mais de 50% no mix das matérias-primas utilizadas. A par desta tendência, registou-se uma utilização crescente dos OAU no total de FAME produzido no mercado nacional, com um peso de 61% no último ano analisado (2020) face a 57% em 2018 e 2019 [16]. Esses óleos de cozinha usados são maioritariamente de origem vegetal, mas também podem conter gorduras animais. O biodiesel pode ainda ser usado como aditivo, melhorando algumas propriedades do gasóleo convencional, como a lubrificação do motor. O biodiesel tem um índice de cetano alto, permitindo a mistura com o gasóleo de origem fóssil para ser utilizado em motores de ignição por compressão [16].

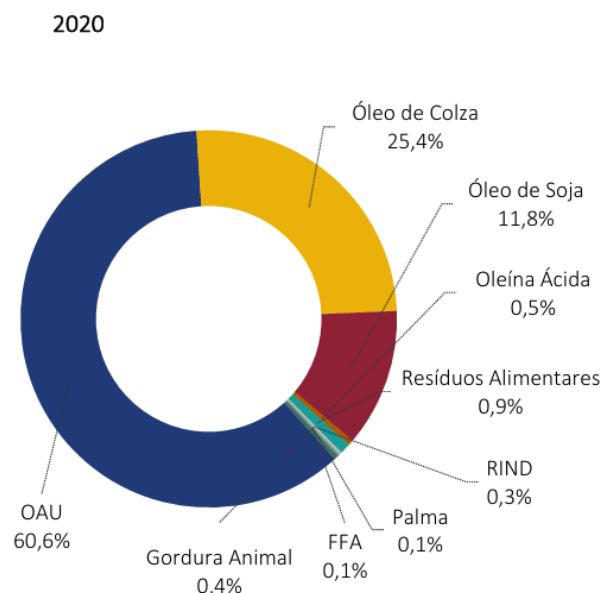


Figura 2.3 - Desagregação de FAME produzido no mercado nacional, em 2020 [16].

Para além do FAME, existe ainda outro tipo de biodiesel atualmente no mercado. O HVO (*hydrotreated vegetable oils*), comumente mencionados como gasóleo renovável ou HEFA (*hydroprocessed esters and fatty acids*), é produzido através do hidrocessamento de óleos e gorduras. O HVO oferece uma série de benefícios em relação ao FAME, como redução da emissão de NO_x [16], melhor estabilidade de armazenamento e melhores propriedades a frio, podendo ser utilizado em todos os motores a diesel. Outra vantagem deste tipo de biodiesel, é que pode ser produzido tanto investindo em instalações dedicadas como convertendo refinarias convencionais de petróleo em instalações de produção ou coprocessamento de óleos e gorduras em HVO [16].

Já no caso da gasolina, existem alguns biocombustíveis alternativos como o bioetanol, e o ETBE. No entanto, ao contrário dos combustíveis alternativos do gasóleo, o bioetanol e o ETBE, têm limites de incorporação de 5-20% (v/v) e 5-15% (v/v), respetivamente, sem que sejam necessárias modificações ou ajustes nos motores [17]. Por esse motivo tem sido vista como alternativa a produção de gasolina sintética.

Atualmente, o principal investimento na gasolina sintética tem sido feito pela *Porsche* através de uma fábrica de produção de gasolina sintética no Chile. O processo de produção utiliza CO₂, extraído diretamente do ar ambiente, com H₂ gerado por eletrólise. Por fim, o H₂ e o CO₂ reagem quimicamente produzindo Metanol (CH₃OH), que por sua vez passa pelo processo de síntese MtG (*methanol-to-gasoline*) e é convertido em gasolina sintética [18].

Atualmente e segundo o decreto de lei nº 84/2022 [19] os fornecedores de combustíveis estão obrigados a assegurar uma incorporação de 11,5%, em teor energético, de combustíveis de baixo teor em carbono para transportes com esta meta a subir para os 13% já em 2025.

Para além dos veículos convencionais com motor de combustão, existem ainda outros que utilizam a energia elétrica como forma de propulsão (EV). No entanto, mesmo dentro dos veículos elétricos é possível identificar diferenças ao nível das suas tecnologias de propulsão. Uma das formas de incorporar a eletricidade no transporte rodoviário é a introdução de um motor elétrico em série (Figura 2.4) ou paralelo (Figura 2.5) com um motor a combustão – veículo híbrido (HEV).

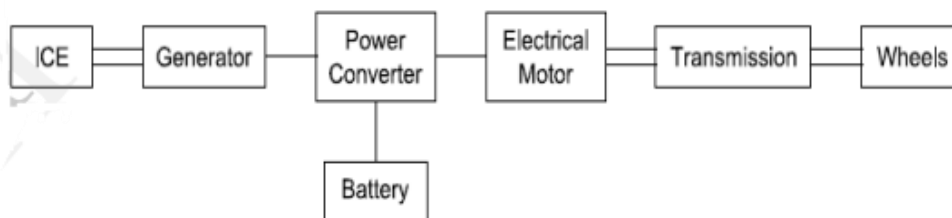


Figura 2.4 - Esquema de funcionamento de um veículo híbrido com sistema série [20].

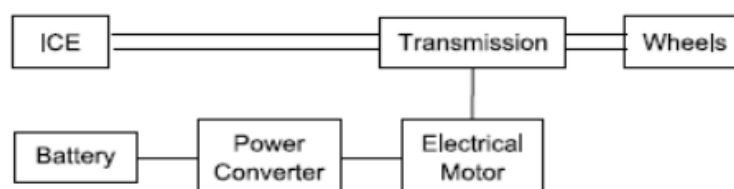


Figura 2.5 - Esquema de funcionamento de um veículo híbrido com sistema paralelo [20].

No caso de tal motor elétrico ser colocado em série com um motor de combustão a potência de tração é entregue pelo motor elétrico, enquanto o motor de combustão produz energia elétrica, através de um gerador, para acionar o mecanismo elétrico. O excesso de energia

produzida é armazenado em baterias a bordo do veículo bateria. A grande vantagem deste tipo de sistema é que permite que o motor de combustão funcione de forma uniforme a uma velocidade de rotação mais próxima da eficiência máxima [20].

Já nos veículos híbridos em paralelo, o motor elétrico e o motor de combustão interna estão diretamente ligados à sistema de tração do veículo. Neste tipo de sistema, a propulsão elétrica é geralmente usada para ajudar na locomoção do veículo para velocidades e potencias baixas, sendo que em situações em que é necessária maior potência o motor de combustão interna passa a ser a fonte principal de propulsão.

A principal vantagem da incorporação do sistema de propulsão elétrico está na recuperação de energia da travagem para carregar as baterias (travagem regenerativa) [20]. Atualmente alguns veículos já incorporam uma combinação de sistemas em série e paralelo (Figura 2.6) onde o ICE é capaz de fornecer energia diretamente ao motor elétrico ou carregar a bateria através de um gerador.

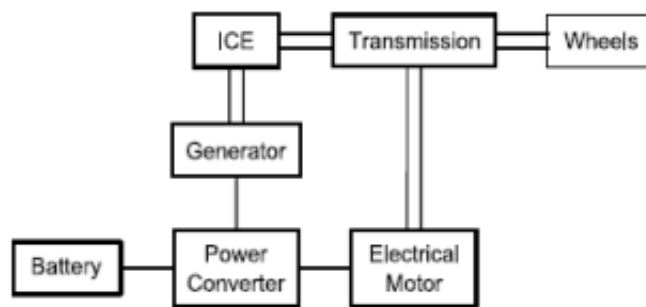


Figura 2.6-Esquema de funcionamento de um veículo híbrido com sistema série-paralelo [20].

Para além dos tipos de tecnologias híbridas referidas acima, existem ainda veículos que permitem o carregamento das baterias não só pelo motor de combustão interna como também pela ligação direta à rede elétrica (Plug-in hybrid vehicle- PHEV). Ao utilizarem energia elétrica de uma fonte externa, os PHEV permitem reduzir significativamente o consumo de combustível em condições normais de condução [21].

Se nos veículos híbridos a mobilidade elétrica surgia como complemento ao motor de combustão, nos BEV (Battery eletrric vehicles) este último é completamente descartado e os sistemas de propulsão utilizam apenas energia elétrica contida nas baterias [21]. Uma vantagem dos BEV é que não necessitam de sistema de escape já que não há emissões de gases vindos do próprio carro. No entanto, embora os BEV não tenham emissões de partículas de escape, as partículas emitidas através de outras fontes (travões e pneus) tendem a ser maior do que os veículos convencionais já que a baixa densidade energética das baterias comparativamente a depósitos de gasolina ou gasóleo, torna este tipo de

veículos geralmente mais pesados do que veículos a combustão convencionais. Esta relação entre o peso e as emissões de PM através de outros componentes do veículo é demonstrada no estudo feito no artigo [22].

Mais recentemente, surgiram ainda os veículos movidos a pilhas de combustível de hidrogénio (FCEV). Estes veículos são dotados de um motor elétrico que utiliza a energia libertada de um processo químico que mistura de hidrogénio comprimido com oxigénio (célula de combustível) e que tem como único resíduo água (H₂O). Embora este tipo de veículos seja considerado como veículos de “emissões zero”, é necessário referir que isto é verdade se a energia usada para os processos de eletrólise for produzida a partir de fontes renováveis (hidrogénio verde). Atualmente, grande parte desse hidrogénio ainda é produzido com recurso a centrais de gás natural e de carvão [21]. No final de 2021, quase 47% da produção mundial de hidrogénio provinha do gás natural, 27% do carvão, 22% do petróleo e apenas cerca de 4% provinha do eletrólise [23].

A introdução de novas tecnologias de propulsão e a necessidade de controlar de forma cada vez mais rigorosa as emissões dos veículos a combustão, levou a Comissão Europeia a propor substituir a norma euro 6 atual por uma nova norma (euro 7). A grande diferença desta nova norma é a neutralidade e simplificação de restrições em termos de combustível e tecnologia, estabelecendo os mesmos limites independentemente de o veículo utilizar gasolina, gasóleo, sistemas de transmissão elétricos ou combustíveis alternativos [24].

Outras alterações propostas pela Euro 7 incluem:

- Alargar o leque de condições de condução abrangidas pelos testes de emissões em estrada, passando a incluir viagens curtas típicas de deslocações diárias e viagens em condições climatéricas mais extremas;
- limites para a quantidade de emissões de partículas de pneus e travões que podem ser produzidas por carros novos;
- Aumento do período de verificação de emissões à medida que o automóvel se desgasta de cinco anos e 100.000 km a 10 anos e 200.000 km obrigando os fabricantes a instalar sensores eletrónicos em carros individuais que lhes permitam detetar automaticamente falhas no motor que levam a emissões mais altas;
- Regular a durabilidade das baterias instaladas em automóveis e carrinhas, verificando a diminuição da sua capacidade à medida que o tempo e a quilometragem aumentam [24].

2.2 Caracterização de tendências da frota automóvel

Com o objetivo de reduzir a dependência de combustíveis fósseis, a União Europeia começou nos últimos anos a implementar medidas e a estabelecer metas para o setor dos transportes que têm como finalidade alcançar a neutralidade carbónica em 2050.

Em 19 de abril de 2023, o Parlamento Europeu e o Conselho adotaram o Regulamento (UE) 2023/851 que altera o Regulamento (UE) 2019/631 [25] para reforçar os padrões de desempenho em matéria de emissões de CO₂ para automóveis novos de passageiros e veículos comerciais ligeiros novos.

Em particular, a alteração estabelece uma meta de redução de pelo menos, 55% das emissões de gases com efeito de estufa até 2030, em comparação com 1990, para automóveis de passageiros e veículos comerciais ligeiros, com o objetivo final de alcançar a neutralidade climática até 2050. Para além disso, este regulamento define ainda que para alcançar a neutralidade climática, será necessário alcançar até 2050 uma redução global de 90 % das emissões no setor dos transportes [26].

Na Tabela 2.1 estão algumas das metas de emissões de CO₂ estabelecidas para toda a frota da EU [27].

Tabela 2.1 - Metas de emissões estabelecidas pela EU [29].

	2020 a 2024	2025 a 2029	2030 a 2034
automóveis de passageiros	95 g CO ₂ /km	93,6 g CO ₂ /km	49,5 g CO ₂ /km
veículos comerciais ligeiros	147 g CO ₂ /km	153,9 g CO ₂ /km	90,6 g CO ₂ /km

A partir de 2035, a meta de emissões de CO₂ para toda a frota da UE, tanto para automóveis como para carrinhas, é de redução de 100%, o que significa 0 g de CO₂/km. Esta meta na prática representa uma proibição total das vendas de veículos com motores a combustão.

Atualmente as emissões médias de CO₂ dos carros recém-registados na UE-27 é de cerca de 110 g/km (2022), o que representa uma descida de 6 g/km comparativamente a 2021. No entanto os níveis médios de emissão de CO₂ em toda a frota variam amplamente entre os Estados-Membros, desde a Espanha e Itália onde o nível médio é superior ao limite médio estabelecido pelo WLTP (119 g/km) até à Suécia onde a média de CO₂ por km foi 68 g/km. Já em termos nacionais, o nível de emissões médio de CO₂ ficou não só abaixo da meta estabelecida, como também é menor que a média europeia [28] (Figura 2.7).

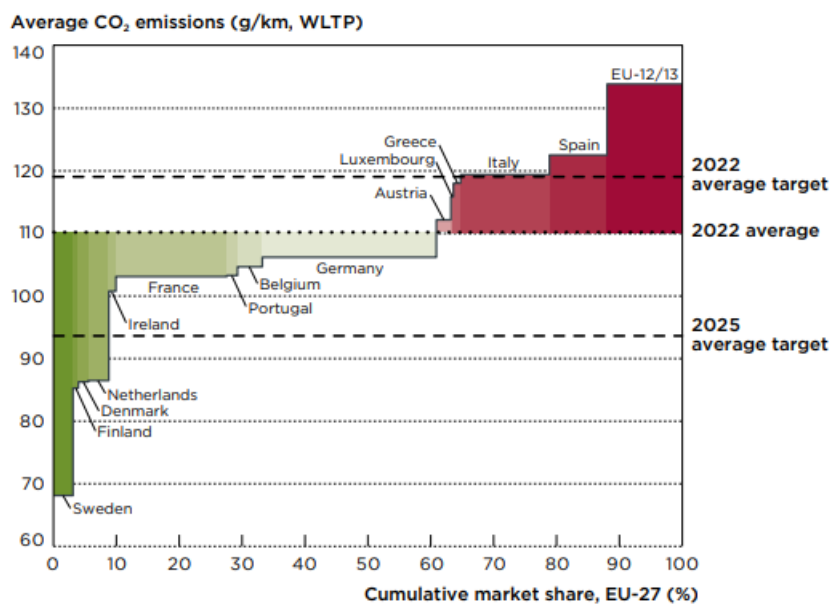


Figura 2.7-Emissões de CO₂ médias por país em 2022 [28].

É importante ainda referir que em motores de combustão a emissão de CO₂/km está intrinsecamente ligado ao consumo de combustível (l/100 km). Tendo em conta relação linear que existe entre o consumo de combustível e o CO₂ libertado, 1 litro por 100 km corresponde a aproximadamente 26,5g CO₂/km para o gasóleo e entre 23-24g CO₂/km para a gasolina, dependendo da composição exata do combustível [29].

Por sua vez os litros de combustível por 100km, podem ser transformados em consumo de energia (MJ/km) relacionando a quantidade de combustível como o seu poder calorífico. No caso do gasóleo, o PCI (Poder calorífico inferior) é de aproximadamente 42,6 MJ/kg (dependendo da composição exata do combustível), o que é ligeiramente inferior ao da gasolina, 43,4 MJ/kg [30]. No entanto, o gasóleo é mais denso que a gasolina e contém cerca de 15% mais energia em volume (aproximadamente 36,9 MJ/L em comparação com 33,7 MJ/L) [31].

Tão importante como os limites de emissões estabelecidos para novos veículos, são os valores de emissões de CO₂ médios totais da frota. Esta média tem em conta não só os limites estabelecidos para os novos veículos como considera também a sua taxa de penetração no mercado. Segundo um artigo publicado pelo ICCT (Internacional Council on Clean Transportation) em 2023, os números de vendas de automóveis a gasóleo vendidos na EU têm vindo a diminuir, sendo que em 2022 caíram para apenas 20%. Para referência, em 2017 os veículos ligeiros a gasóleo tinham uma quota de mercado de cerca de 44%. Enquanto isso, as vendas de HEV subiu para mais de 8% em 2022. Já os BEV, representaram 12% (+3 pontos percentuais a partir de 2021) de todas as vendas de automóveis novos na UE-27 em

2022. Por fim também os PHEV tiveram um aumento da sua quota de mercado subindo a sua contribuição para 9% [28].

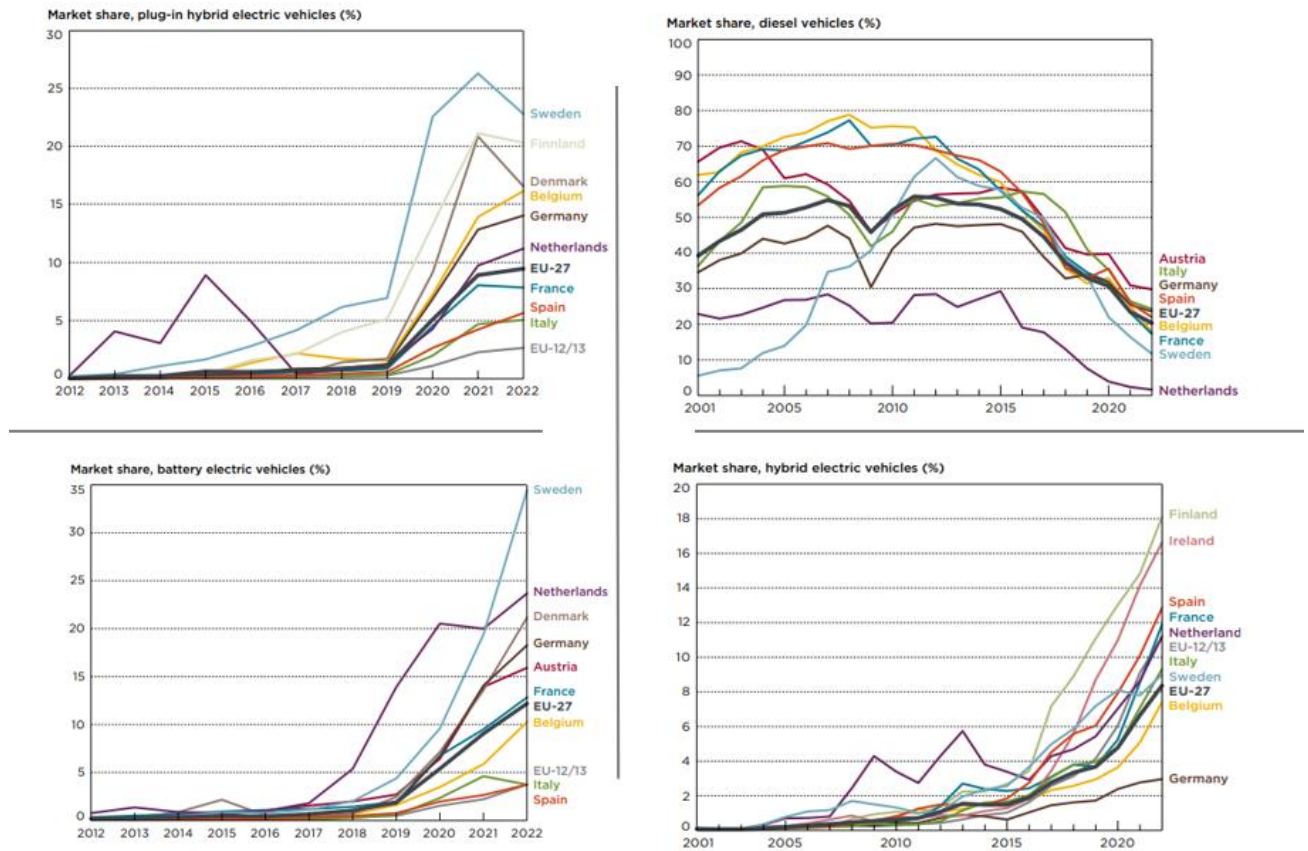


Figura 2.8-Evolução das quotas de mercado de várias tecnologias de propulsão na EU-27 [28].

Em 2023, a venda de automóveis da UE teve um crescimento de 13,9% em comparação com 2022, atingindo um volume anual de 10,5 milhões de unidades.

A nível nacional, o número de novos carros registados segue a tendência de aumento da EU, com os BEV a estabelecerem-se como a segunda escolha mais popular entre os compradores em 2023 (18,2 %) atrás apenas dos veículos a gasolina (36,2 %) [32] (Figura 2.9).

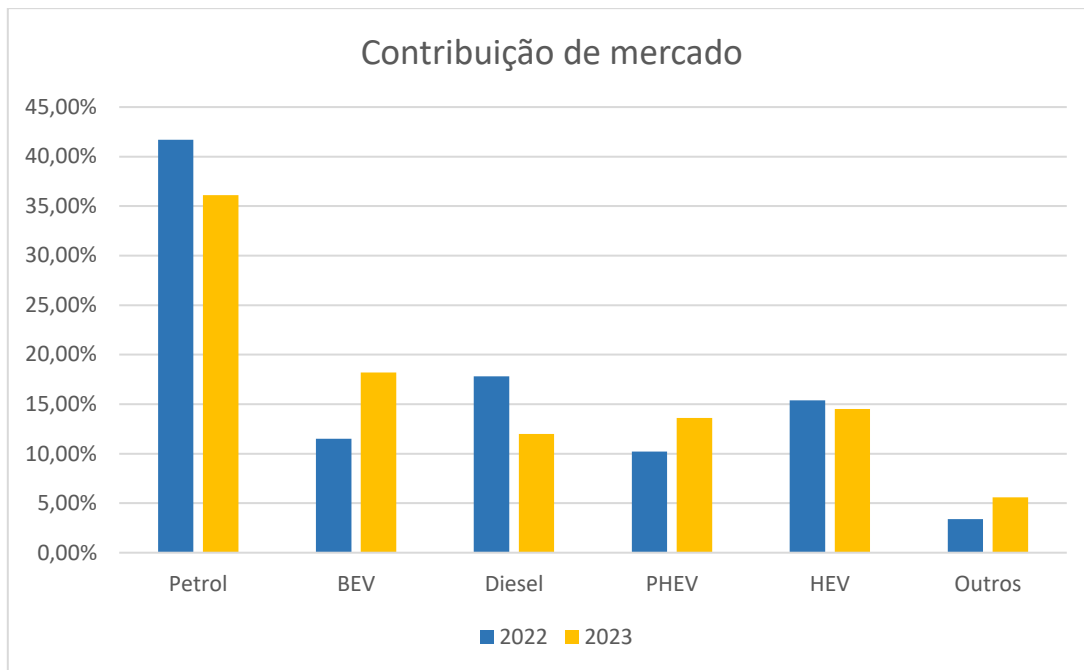


Figura 2.9-Quota de mercado de diferentes tecnologias de propulsão em 2022 e 2023.

2.3 Avaliação de impactes dos transportes rodoviários

A substituição tecnológica e a transição para uma indústria automóvel cada vez mais eletrificada, traz consigo um conjunto de desafios principalmente ao nível das infraestruturas. Com o aumento previsto do número de veículos elétricos, aumenta também a procura de eletricidade para carregar esses veículos. Este fenómeno pode representar desafios significativos para a rede elétrica em termos de carga adicional. No entanto, o impacto na rede dependerá de vários fatores, tais como o nível de energia e a hora do dia em que os veículos são carregados, e o potencial de carregamento do veículo para a rede (V2G). Esta tecnologia de gestão inteligente da rede elétrica permite que os ECV (*Electrically-chargeable vehicles*) atuem como uma fonte de energia o que pode ajudar a equilibrar a rede em altura de maior carga. Isto é feito permitindo que os ECV sejam carregados quando a procura de eletricidade é baixa e utilizando-os como fonte quando a procura é elevada [33].

Mesmo com os possíveis impactos negativos, os ECV também representam um grande potencial de flexibilidade já que o seu consumo médio diário pode ser carregado em menos de 3 horas com um carregador doméstico padrão de 3,7 kVA. Isto deixa ampla margem para controlar o processo de carregamento (carregamento inteligente) e até mesmo usar o ECV como um sistema de armazenamento que pode devolver energia à casa (V2H), ao edifício (V2B) ou à rede (V2G) [34]. No caso das redes de distribuição, a flexibilidade dos ECV pode ser utilizada para adiar ou evitar reforços dispendiosos das infraestruturas, com grandes

poupanças económicas. O projeto My Electric Avenue estimou que, até 2050, um terço das redes de baixa tensão (BT) no Reino Unido necessitariam de reforços (com uma utilização de EV entre 40% e 70%), mas um sistema de coordenação simples poderia gerar até £2,2 mil milhões em poupanças de investimento [34].

Para além disso a forma como essa eletricidade é produzida está diretamente relacionada com a pegada ecológica dos BEV. Apesar destes veículos não terem emissões de escape, a eletricidade gerada para os carregar pode estar associada à libertação de GEE.

Atualmente, e tendo em conta o contexto nacional, grande parte desta eletricidade já é gerada através de fontes renováveis. Segundo estatísticas da APREN (Associação Portuguesa de Energias Renováveis), entre 1 de janeiro e 31 de dezembro de 2023 foram gerados 44128 GWh de eletricidade em Portugal Continental, dos quais 70,7 % tiveram origem renovável (Figura 2.10) [35].

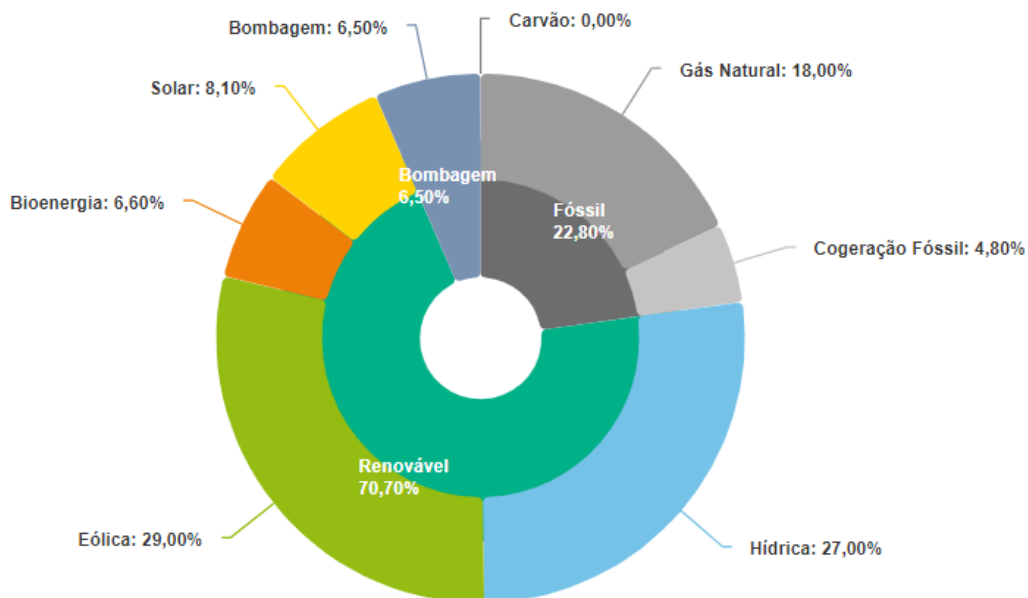


Figura 2.10-Balanço da Produção de Eletricidade de Portugal Continental em 2023, por fonte de energia primária [35].

Esta grande fatia que a energia renovável já ocupa na produção de energia em Portugal têm ainda tendência para crescer mais à medida que se aproximam os objetivos definidos no PNEC para 2030. Ora à medida que são incorporadas cada vez mais fontes de energia renovável na geração de eletricidade para a rede nacional, os veículos elétricos tornar-se-ão cada vez mais “limpos”, diminuindo assim o impacto destes no ambiente.

No entanto o aumento dos veículos elétricos traz também impactes ambientais [36]. Um deles é a produção das suas baterias. O impacto ambiental da produção de baterias vem dos

vapores tóxicos libertados durante o processo de mineração e da elevada quantidade de água necessária a esse processo. Um relatório de 2021 da *Ricardo* destaca a importância crescente de contabilizar as emissões de carbono ao longo da vida do veículo para comparar as emissões de gases com efeito de estufa dos veículos de baixo carbono [37]. Neste estudo feito no Reino Unido, chegou-se à conclusão de que as emissões de produção dos BEVs eram cerca de 50% superiores às dos automóveis a gasolina em 2020 (principalmente devido às baterias) e representavam 67% do total estimado de emissões de GEE ao longo do ciclo de vida. No entanto, neste mesmo estudo, os benefícios dos BEV em relação aos GEE aumentam nos anos futuros, atingindo uma redução de aproximadamente 76% até 2030, em comparação um automóvel convencional a gasolina equivalente, devido a uma combinação de tecnologia de bateria melhorada e uma rede elétrica do Reino Unido ainda mais descarbonizada.

Já a análise dos FCEV, mostra que estes podem ter um impacto de produção semelhante ao dos BEV. O componente mais significativo responsável pelas emissões adicionais de fabricação de FCEV é, na verdade, o recipiente de armazenamento de H₂ comprimido de alta pressão, uma vez que o plástico reforçado com fibra de carbono (CFRP) usado nestes depósitos têm emissões de produção de GEE extremamente elevadas [38].

A análise do ciclo de vida (ACV) aborda diversos aspetos ambientais ao longo do ciclo de vida de um produto, desde a aquisição da matéria-prima, passando pela produção, uso, tratamento de fim de vida e disposição final [39]. Dentro desta metodologia de análise pode ser criada ainda uma subdivisão especificamente para o setor dos transportes. Esta é conhecida como análise *well-to-wheel* (WTW) e é uma aplicação da ACV usada para comparar sistemas de propulsão/veículos de uma perspetiva global.

Tal análise proporciona uma visão global da utilização dos recursos energéticos e das emissões envolvidas desde o ponto de extração da fonte de energia primária (*well-* poço) até ao seu ponto de utilização (*wheel* - rodas). Esta análise mostra não apenas as emissões causadas pela queima dos combustíveis, mas também leva em consideração as emissões envolvidas na produção, transporte e distribuição dos combustíveis [40].

Dentro da análise WTW podem ser ainda feitas mais subdivisões tais como *well-to-tank* (WTT) e *well-to-wheel* (TTW). A avaliação do WTT contabiliza a energia gasta e respetivas emissões geradas até à entrega do combustível no depósito do veículo. De seguida é efetuada a avaliação TTW que contabiliza a energia despendida e respetivas emissões para cada combinação de combustível/sistema de propulsão e para uma determinada utilização do veículo. Para tornar a comparação entre diferentes sistemas de propulsão mais intuitiva, a necessidade energética no depósito é expressa em termos de “litros equivalentes de gasolina /100 km” e as emissões são expressas em “gramas equivalentes de CO₂/km” [40]. A Figura 2.11 ilustra um exemplo duma análise WTW aplicada aos combustíveis fósseis.

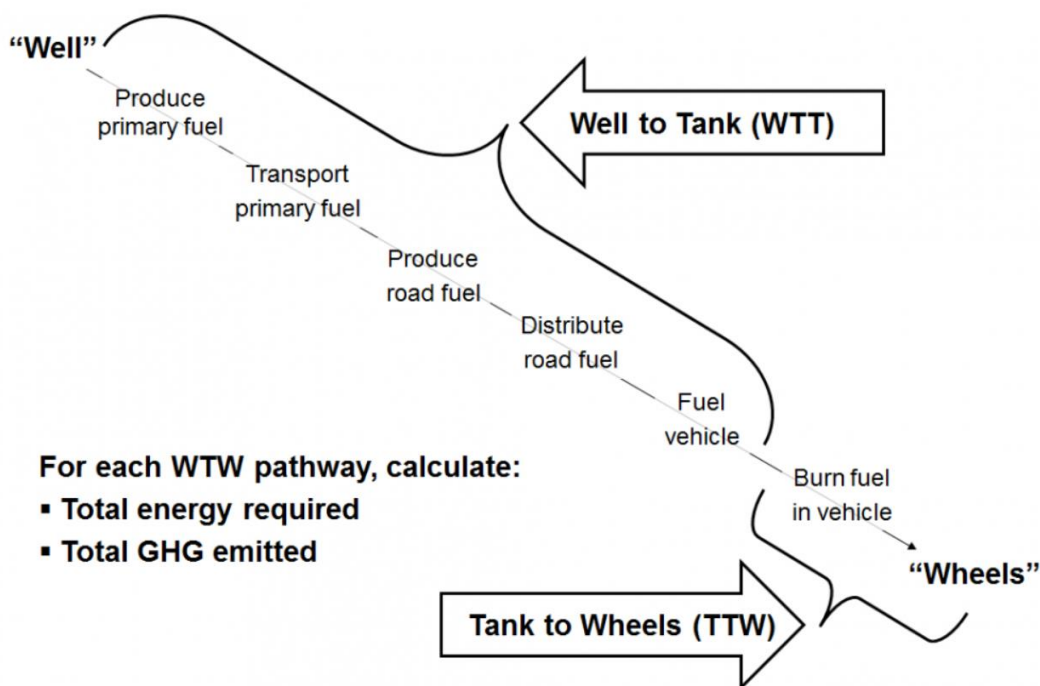


Figura 2.11-Representação esquemática da análise WTW [41].

Na Europa a realização de estudos *Well-To-Wheel* é frequentemente feita pela JEC. A JEC consiste numa colaboração entre o Centro Comum de Investigação da Comissão Europeia, a EUCAR e a ConcaWE (JEC). A análise feita pela JEC tem como objetivos estimar a emissão de gases de efeito estufa, eficiência energética e custos industriais de uma vasta gama de combustíveis automóveis e tecnologias de propulsão relevantes na Europa. A análise *Well-To-Wheel* descrita neste relatório, inclui vários tipos diferentes de combustível e várias configurações de sistema de propulsão sendo feita uma comparação entre os dados relativos a 2015 – NEDC e uma previsão para 2025 – WLTP.

Em veículos ligeiros, a análise da JEC concluiu que quase todos os combustíveis alternativos oferecem um melhor desempenho do WTW do que gasolina/diesel convencionais. Para além disso é possível perceber que a utilização de eletricidade e o hidrogénio renováveis em BEV e FCEV resulta em baixos valores de gCO_2 / km à semelhança do uso de biodiesel algo representado na Figura 7.2, no Anexo 2. Em relação aos veículos híbridos e de um modo geral, estes parecem oferecer uma opção eficaz para reduzir o consumo de combustível em veículos a combustão, até ~25% (melhor desempenho em motores a gasolina do que a diesel) quando focada em HEV e não nos PHEV [42].

Em termos energéticos, a tecnologia BEV mostra um uso de energia semelhante ao uso de FCEV em 2015 onde o hidrogénio ainda era produzido maioritariamente através do gás

natural convencional, sendo que as diferenças aumentam em direção a 2025+ a favor dos BEV (Figura 7.3, Anexo 3).

Para além destas conclusões acerca dos veículos e respetivos combustíveis, a JEC concluiu também que não existe nenhuma via única de combustível que ofereça uma solução de curto prazo e de “baixo carbono” para grandes volumes de combustível sendo por isso necessárias contribuições de uma série de tecnologias sendo a variedade da oferta de combustíveis uma solução a considerar para reduzir significativamente as emissões de GEE a um custo razoável.

Na Figura 7.4, do Anexo 4, está ilustrado o resumo final dos resultados obtidos neste estudo com a relação entre emissões e energia gasta por km para cada tipo de combustível, onde se verifica o potencial de redução nas emissões WTW da utilização de combustíveis alternativos como o HVO e o bioetanol os quais são capazes de alcançar reduções significativas de emissões de GEE sem grande aumento no consumo de energia WTW.

Num estudo elaborado em 2021 e aplicado ao Reino foi possível concluir também que as emissões WTT de gasolina e diesel representavam cerca de 20% das emissões de um carro convencional a gasolina em 2020. Verificando-se ainda os benefícios significativos dos veículos de tração elétrica ou híbrida (ou seja, HEV, PHEV, BEV e FCEV) em comparação com veículos convencionais com motor de combustão interna a gasolina e diesel. Já em 2020, um novo veículo elétrico a bateria (BEV) reduzia a emissão de GEE em 65% em comparação a um veículo convencional a gasolina, ao operar em condições reais por mais de 14 anos e 200.000 km de vida útil [38].

Para além da análise energética de cada veículo/tecnologia de propulsão, é ainda necessário ter conta outras variáveis relacionadas com a atividade, nomeadamente a integração de mobilidade partilhada, nº de pessoas por veículo e média de km por veículo.

As plataformas de partilha de carros fornecem acesso a uma frota partilhada distribuída na região. A utilização destes serviços induz mudanças no comportamento de mobilidade, bem como nos padrões de propriedade de veículos, que podem ter impactos ambientais positivos [43]. Em primeiro lugar, o número de veículos por pessoa geralmente tende a diminuir com a adesão aos sistemas de partilha de carros verificando-se que cada veículo novo adquirido para uma rede de mobilidade partilhada substitui pelo menos quatro a oito carros pessoais. Para além disso, a mobilidade partilhada de veículos ligeiros tem impacto nos quilómetros por veículo, nas taxas de utilização dos mesmos e, consequentemente, nas taxas de substituição de frota [44]. Em geral os participantes deste tipo de serviços fazem mais viagens e percorrem mais quilómetros utilizando modos de transporte alternativos. Este efeito foi também confirmado num sistema mobilidade partilhada por mais de 2.100 clientes de três grandes empresas alemãs de *Car-Sharing* foi comparado durante um período de quatro anos. No segundo ano, os participantes diminuíram os quilómetros percorridos com veículos *Car-*

Sharing em 1.170 km no ano (em média) [45]. Foram 520 quilómetros a menos do que no primeiro ano de participação. Algumas das razões para este fenómeno prendem-se com o facto de os clientes deste tipo de serviço aprenderem a aproveitar melhor as alternativas ao uso do carro, nomeadamente, o transporte público [46].

Para além da partilha de automóveis ligeiros, a utilização de transportes públicos também está diretamente ligada ao número de veículos e às taxas de substituição de frota. O efeito que o nível de desenvolvimento dos transportes públicos tem redução nas emissões de carbono que os transportes públicos prende-se com a diminuição de veículos privados à medida que as opções de transporte aumentam [47]. Esta diminuição foi quantificada pela APTA (*American Public Transportation Association*) onde se concluiu que uma única pessoa, numa viagem de ida e volta de 32 quilómetros, a viajar sozinha de carro particular, que mude para o transporte público existente, pode reduzir suas emissões anuais de CO₂ em 2177 kg por ano, o que equivale a uma redução de 10% em todos os gases de efeito estufa produzidos por uma família típica de dois adultos e dois carros, sendo que existe margem para reduzir a emissão de CO₂ até 30% [48].

2.4 Cenários de descarbonização

Devido a este aumento de preocupação em relação aos consumos energéticos e às consequentes alterações climáticas, foram estabelecidas algumas metas para o setor da energia. Num dos planos definido pela IEA (*Net Zero by 2050*), estima-se que a economia mundial em 2030 será cerca de 40% maior do que hoje, mas usa 7% menos energia. Para tal, seria necessário um grande esforço mundial para aumentar a eficiência energética, resultando numa taxa anual de melhoria de eficiência de cerca de 4% até 2030 – cerca de três vezes a taxa média alcançada nas últimas duas décadas [49].

Este cenário exige também uma expansão rápida da energia solar e eólica nesta década, atingindo aumentos de 630 GW de energia solar fotovoltaica e 390 GW de energia eólica até 2030, o que representa 4 vezes os níveis estabelecidos em 2020. Para a energia solar fotovoltaica, isto equivale a instalar um parque solar equivalente ao atual maior parque solar do mundo quase todos os dias. Também a energia hidroelétrica e nuclear, as duas maiores fontes de eletricidade de baixo carbono atualmente, fornecem uma base essencial para a transição energética. Este cenário prevê ainda que, devido ao aumento de produção de

eletricidade limpa, o número de vendas de veículos elétricos aumente dos 5% atuais nas vendas globais de automóveis para mais de 60% até 2030 [49].

Para atingir este cenário de emissões zero, este plano requer uma eletrificação transversal do setor dos transportes rodoviários. Na Figura 2.12 está ilustrada a evolução necessária no setor dos transportes para atingir os objetivos definidos por este relatório da IEA.

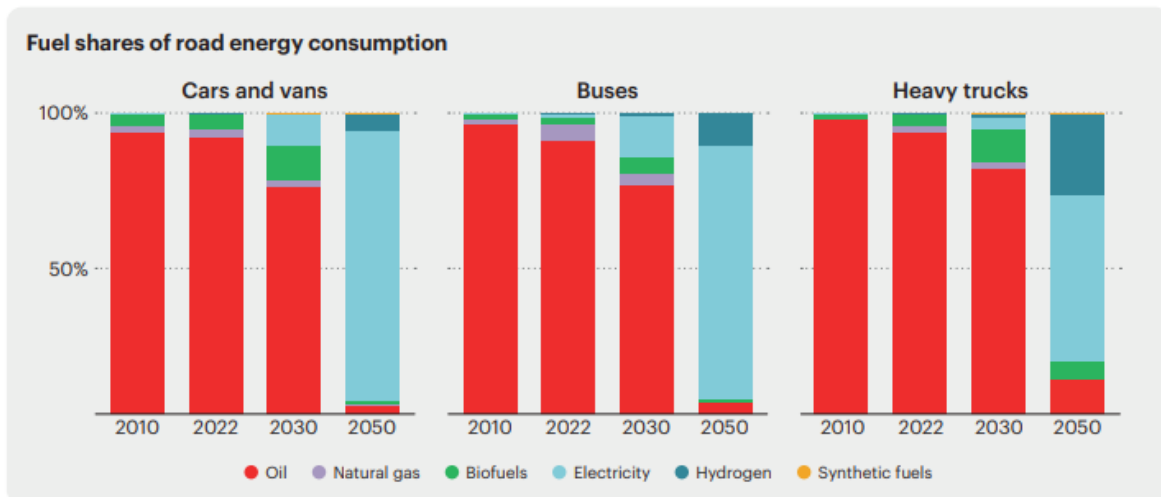


Figura 2.12- Contribuição de vários tipos de combustíveis no consumo de energia no setor rodoviário [50].

Como se verifica, neste cenário existe uma aposta forte na eletricidade como fonte de combustível primária representando cerca de 74 % da energia final consumida neste setor em 2050. Para além desta, também é considerado um crescimento de veículos a hidrogénio que atingem uma contribuição total de 16 % em 2050 [50].

Para além da eletrificação, têm sido estudadas outras formas de atingir a neutralidade carbónica como a introdução de biocombustíveis e combustíveis sintéticos. Num estudo feito pela *Ricardo* [51], para além do cenário indicado anteriormente onde existe uma elevada aposta na eletrificação dos veículos ligeiros, é também estudada a possibilidade de reduzir os GEE via introdução de combustíveis alternativos de baixo carbono. Neste cenário a incorporação de combustíveis biológicos e sintéticos na mistura de gasolina e gasóleo aumenta drasticamente a partir de 2030 chegando este a representar cerca de 68% da energia final consumida (Figura 2.13). Estes consumos energéticos estão diretamente relacionados com os pressupostos de frota adotados onde os BEV apenas representam cerca de 30% da frota em 2050 sendo a tecnologia mais popular os HEV com quase 50% de representação (Figura 2.13).

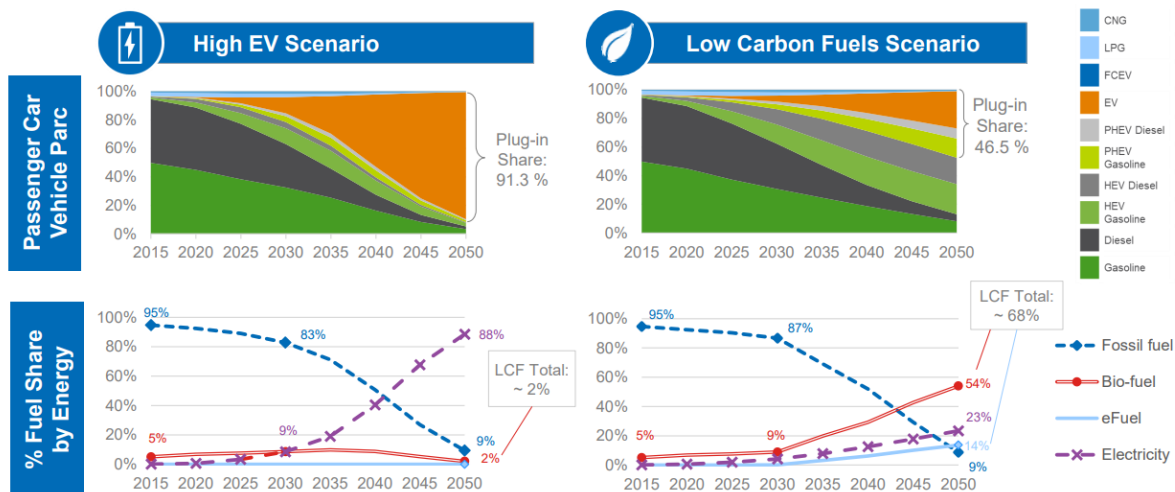


Figura 2.13 - Cenários de descarbonização desenhados pela Ricardo [51].

Complementar aos 2 cenários ilustrado na Figura 2.13, neste mesmo estudo é ainda explorado um terceiro cenário com base no estudo da “ERTRAC” sobre um potencial cenário com uma frota com maior diversidade de tecnologias [52]. Neste cenário os BEV e PHEV representam 64% da frota de ligeiros da união Europeia com o restante parque dividido entre HEV e ICEV convencionais (Figura 2.14). Avaliando estes 3 cenários, uma das conclusões retiradas é que qualquer uma destas abordagens é atinge reduções similares de GEE em 2050 (cerca de 85%).

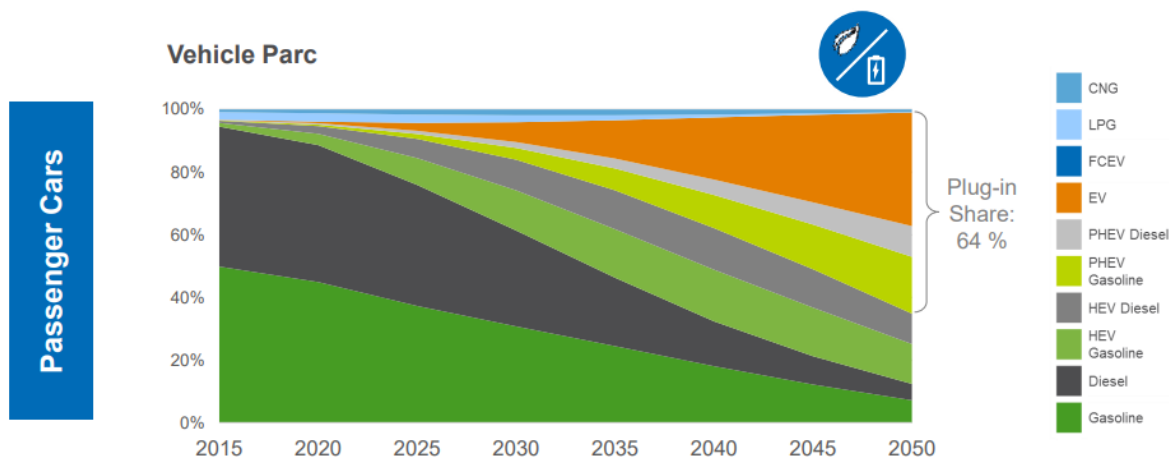


Figura 2.14 - Cenário de descarbonização "misto" [51].

Outro estudo que visa explorar a forma como as metas relativas às emissões de CO₂ estabelecidas para veículos ligeiros podem ser alcançadas foi realizado em 2021 pela ICCT (*International Council on Clean Transportation Europe*) [53]. Neste estudo são definidos quatro cenários principais para representar o potencial desenvolvimento futuro do mercado europeu de veículos automóveis ligeiros de passageiros. Cada cenário representa um nível de ambição

diferente, entendendo-se por ambição o esforço efetuado pelos fabricantes em cumprir os objetivos definidos pela União Europeia o mais cedo possível. Na Figura 2.15, está representada a evolução do mercado automóvel para estes 4 cenários principais.

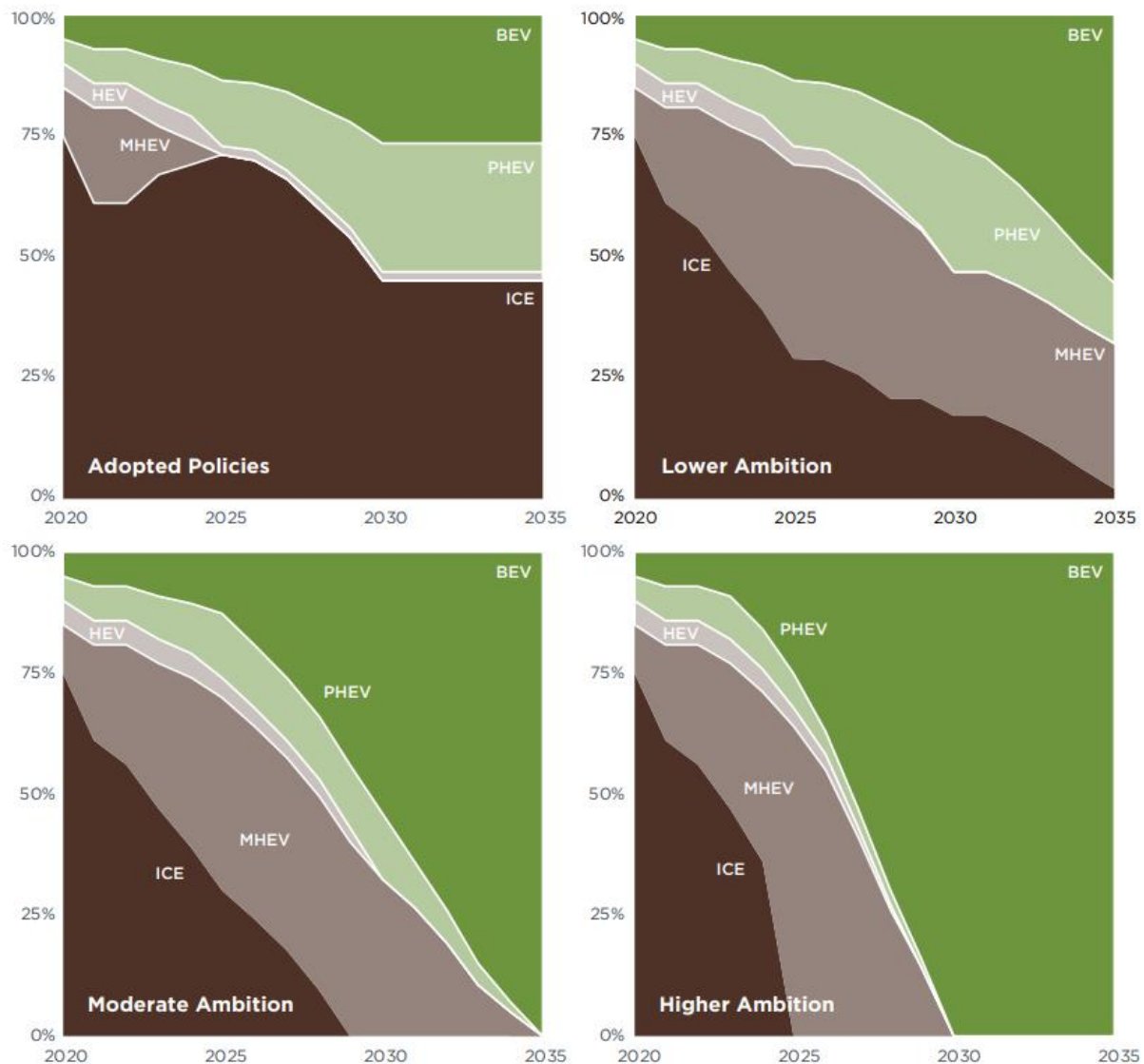


Figura 2.15 - Evolução da quota de mercado das várias tecnologias para os quatro cenários principais [53].

A Figura 2.15 ilustra bem o papel considerado para os BEV sendo esta tecnologia a principal solução adotada para cumprir as metas europeias. No entanto são ainda feitas análise de sensibilidade que têm em conta a introdução de combustíveis sintéticos. Estes são idênticos ao cenário de Ambição Moderada para os anos 2021-2025, sendo que a partir daí é assumido que os fabricantes irão depender fortemente dos PHEV, em combinação com combustíveis sintéticos ou biocombustíveis, para atingir o objetivo de redução de emissão de CO₂ estabelecido para 2030 neste cenário (-70% emissões de CO₂ segundo protocolo de teste WLTP) (Figura 2.16).

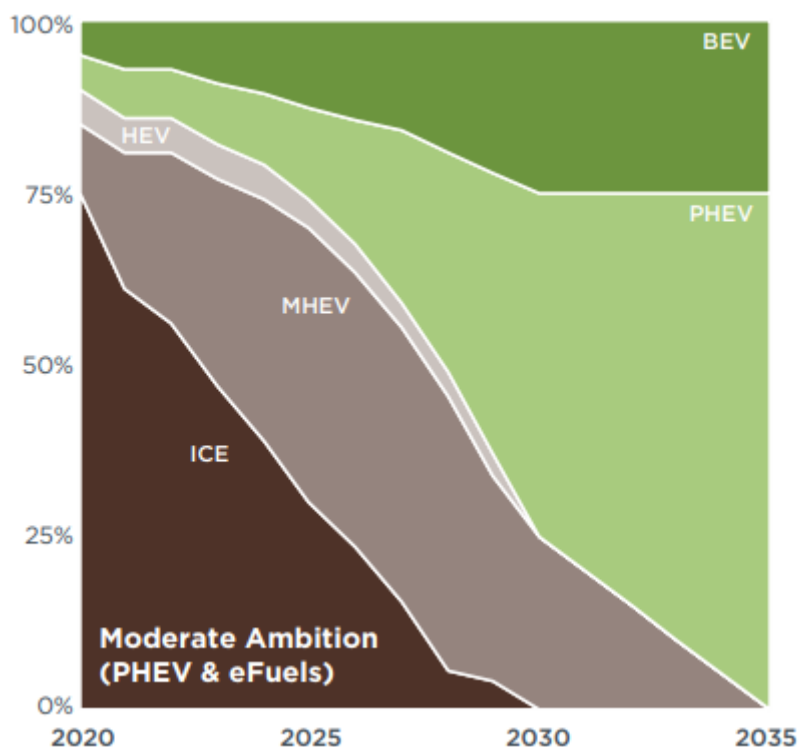


Figura 2.16 - Evolução da quota de mercado das tecnologias para cenário de sensibilidade "PHEV e eFuel" [53].

Uma das conclusões retiradas com este cenário adicional é que a utilização de PHEV em combinação com combustíveis sintéticos não cumpre o objetivo de redução de CO₂ para 2035 do cenário Ambição moderada. Este é capaz de alcançar as metas europeias (cenário "Adopted Policies") resultando ainda assim num custo extraordinariamente elevado.

A introdução de qualquer mecanismo de crédito para combustíveis sintéticos relativo às emissões de CO₂ dos veículos poderá também ser indevidamente alargado a créditos semelhantes para os biocombustíveis, com um custo muito inferior, mas com impactos ambientais e climáticos significativamente piores do que os dos combustíveis sintéticos.

Tendo em conta as diferentes previsões e estudos apresentados e com o objetivo de atingir a neutralidade carbónica em 2050, os Estados-Membros da UE desenvolveram estratégias nacionais a longo prazo onde se encontram definidas a forma como cada um pretende alcançar as reduções de emissões de gases com efeito de estufa necessárias para cumprir os seus compromissos no âmbito do Acordo de Paris e do objetivo de neutralidade climática da UE.

Portugal assumiu também o objetivo de atingir a Neutralidade Carbónica até 2050, tendo desenvolvido o Roteiro para a Neutralidade Carbónica 2050 (RNC2050) [54] que estabeleceu a visão, as trajetórias e as linhas de orientação para as políticas e medidas a concretizar nesse horizonte temporal algo representado na Figura 2.17. Neste documento é considerada a

eletrificação da frota como principal caminho para a atingir a neutralidade carbónica sendo o hidrogénio uma hipótese alternativa para os veículos pesados. Nos veículos ligeiros de passageiros considera-se já em 2030 a mobilidade elétrica irá representar cerca de 36% da procura com este valor a alcançar os 100% em 2050. Esta transformação do parque aliada à incorporação progressiva de energias renováveis para produção de eletricidade, prevê-se que seja possível reduzir em 43% as emissões de GEE em 2030 e 98% em 2050.

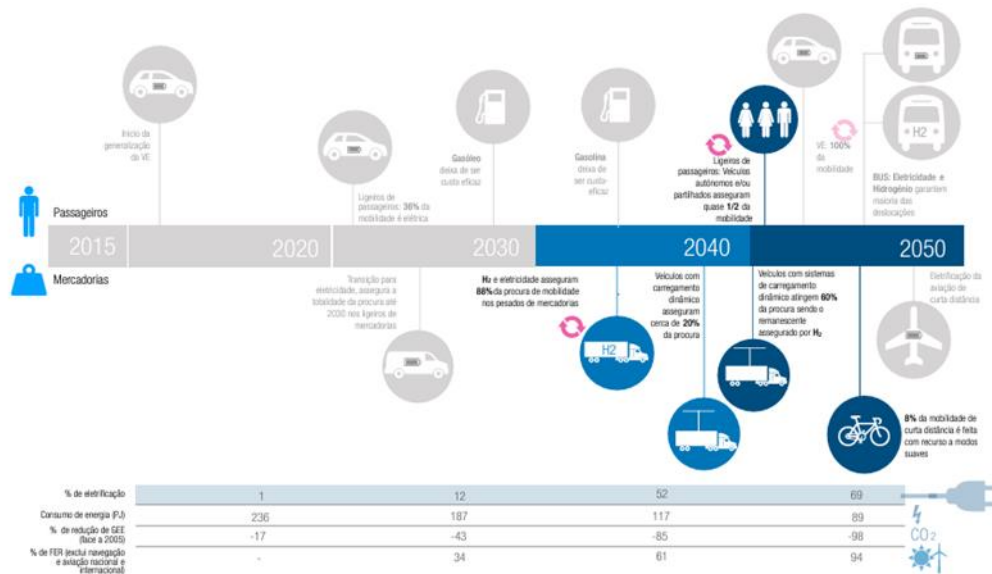


Figura 2.17 - Metas definidas no RNC20250 para atingir a neutralidade carbónica no setor dos transportes [54].

Em articulação com os objetivos do RNC2050, foram estabelecidas metas mais ambiciosas para o horizonte 2030, as quais se encontram vertidas no Plano Nacional Energia e Clima (PNEC) que se constitui como o principal instrumento de política energética e climática nacional para a década 2021-2030 [55].

O PNEC, lançado a 10 de julho de 2020, foi revisto pela primeira vez em 2023, tal como estava previsto no Regulamento relativo à Governação da União da Energia e da Ação Climática, que prevê a obrigatoriedade de revisão periódica dos PNEC por parte dos Estados-Membros. Esta revisão apresenta metas mais ambiciosas para Portugal, em que se destaca a antecipação em quatro anos da meta de incorporação de energias renováveis na produção de eletricidade. Assim, já a partir de 2026, 80% da energia produzida em território nacional será de origem renovável, contribuindo para que Portugal atinja a neutralidade climática em 2045.

Foram feitas ainda alterações às metas de emissões de GEE sendo que agora a ambição máxima é uma redução de 55% até 2030, em comparação com valores de 2005.

Também na incorporação de renováveis no consumo de energia foi aumentado o âmbito, subindo a meta de 47% para 49%. Destaca-se ainda, a ambição na potência instalada renovável para produção de eletricidade, em particular no solar fotovoltaico, cuja meta mais do que triplicou (de 9,0 GW para 20,4 GW, dos quais 5,5 GW serão potência descentralizada). Na tecnologia eólica, prevê-se instalar 12,4 GW, dos quais 2,0 GW correspondem a eólica offshore [56].

Relativamente ao setor dos transportes, este plano perspetiva um enfoque na mobilidade sustentável e na descarbonização do consumo de energia, através da promoção e do reforço do transporte público, da promoção da mobilidade elétrica e de combustíveis renováveis de origem não biológica, incluindo hidrogénio renovável [55].

Na Figura 2.18 está ilustrado um gráfico que representa a evolução pretendida para a quota de energias renováveis no setor dos transportes em Portugal até 2030

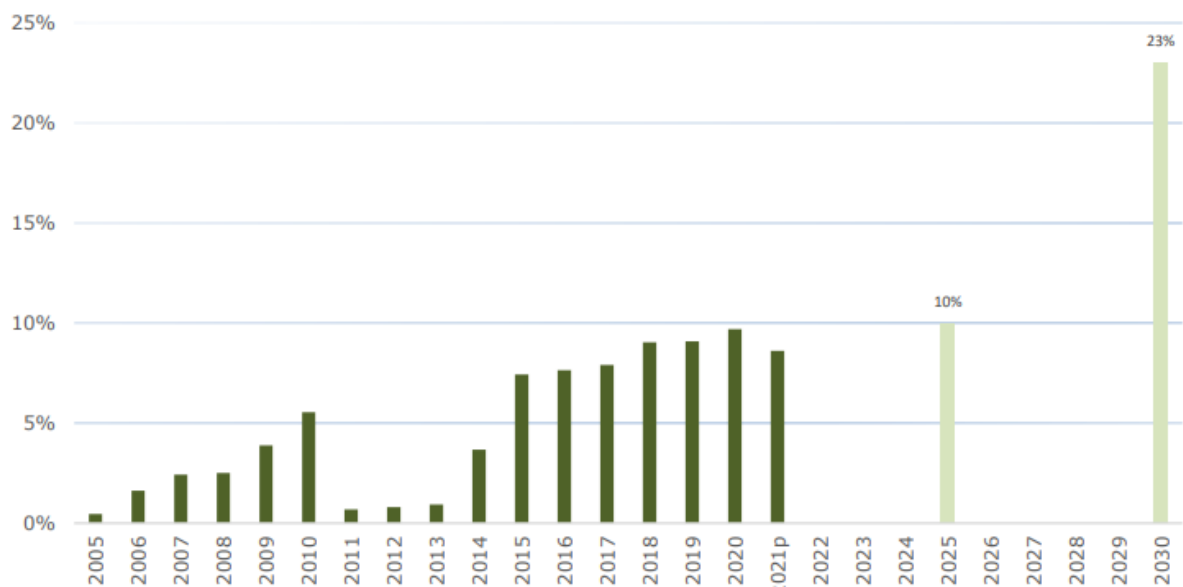


Figura 2.18-Evolução da quota de energia de fontes renováveis nos transportes no horizonte 2030 [55].

Como se pode perceber, a mais recente revisão do PNEC estabelece uma meta 23 % de fontes de energia renovável para o setor dos transportes cerca 3% mais do que era ambicionado na versão original deste documento.

3 Metodologia

Tendo em conta objetivo avaliar cenários de descarbonização do sector rodoviário português, foi necessário construir uma ferramenta de análise numérica que permitisse caracterizar detalhadamente a frota automóvel portuguesa de veículos ligeiros. Nesta secção apresenta-se estrutura geral do modelo desenvolvido, explorando todas as variáveis e hipóteses consideradas.

O modelo divide as variáveis de entrada essencialmente em 3 grandes grupos tal como é ilustrado na figura 16. Estas variáveis foram ajustados de acordo com os cenários definidos com objetivo de alcançar o consumo energético total e respetivas emissões de CO₂ associadas.

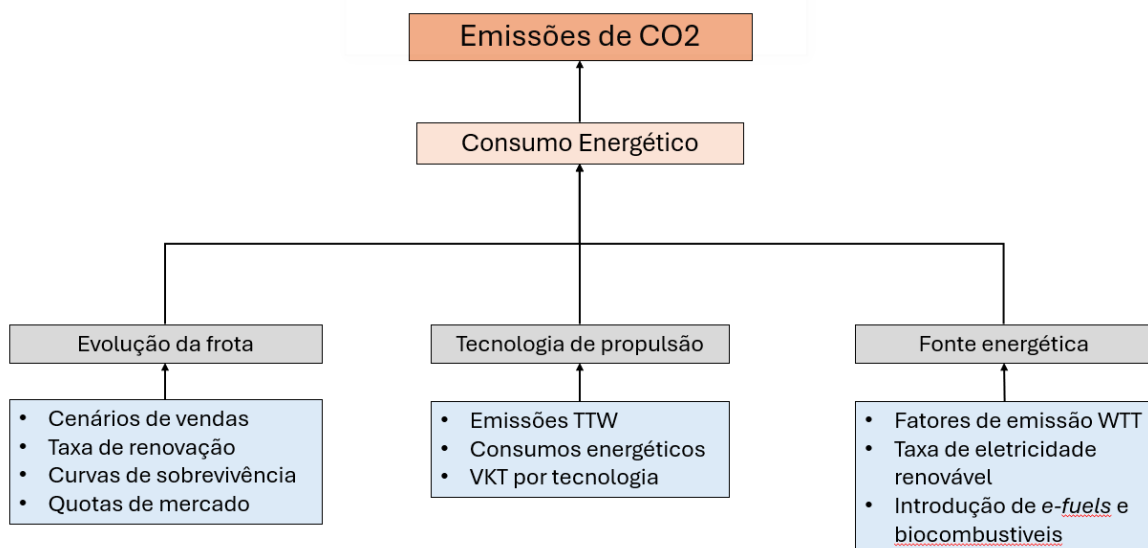


Figura 3.1-Representação esquemática da ferramenta de análise construída.

3.1 Evolução da frota

Os primeiros parâmetros definidos neste conjunto de variáveis estão relacionados com os cenários de vendas. A consulta do arquivo da ACAP (associação automóvel de Portugal) [57] permitiu obter dados históricos de vendas de todo o tipo veículos. Tendo em conta o âmbito deste trabalho, foram então recolhidos os dados relativos às vendas de automóveis ligeiros de passageiros (Figura 3.2) e ligeiros comerciais (Figura 3.3) desde 1990.

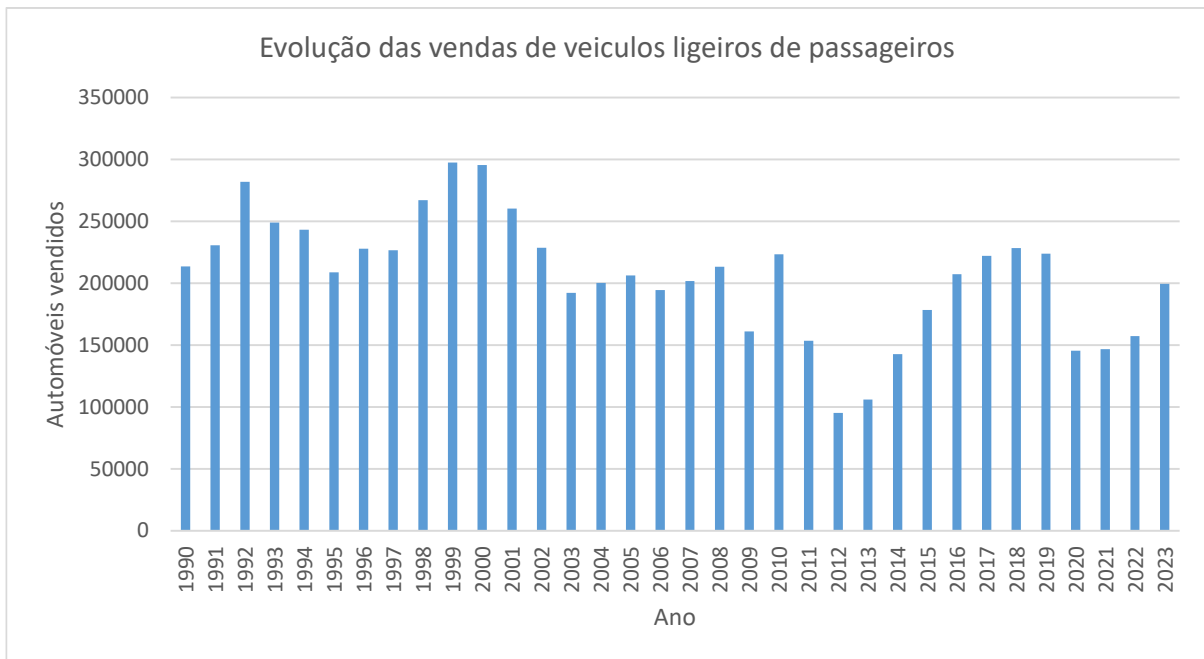


Figura 3.2- Evolução das vendas de veículos ligeiros de passageiros entre 1990-2023 [57].

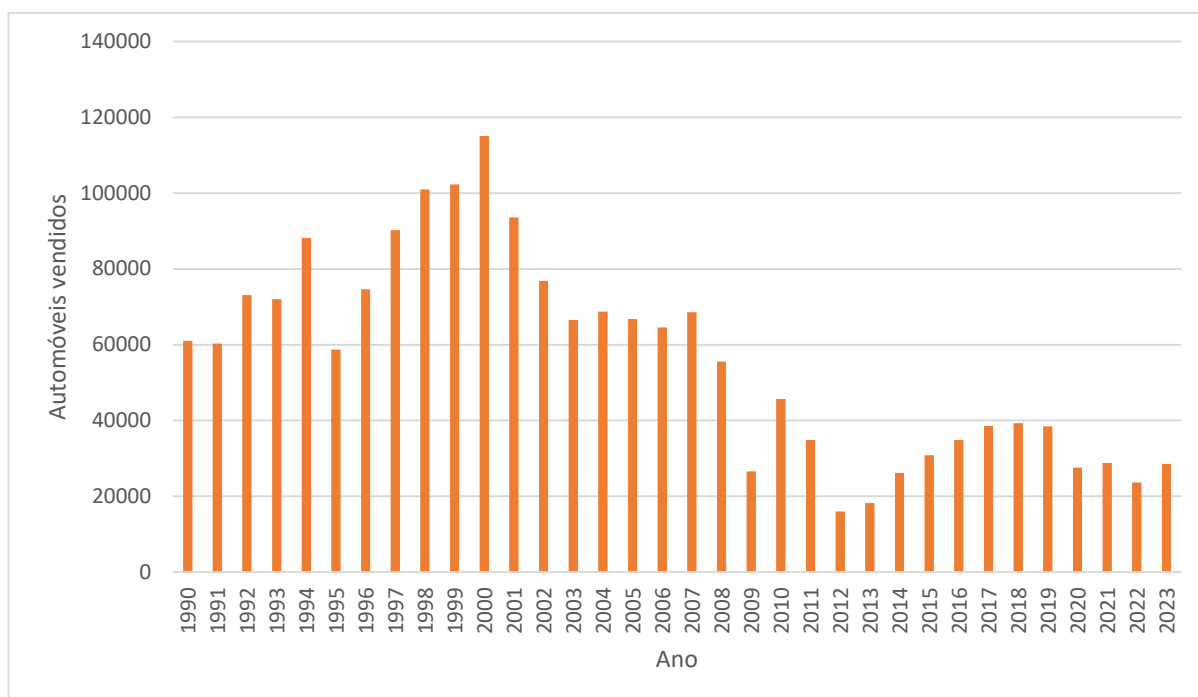


Figura 3.3- Evolução das vendas de veículos ligeiros comerciais entre 1990-2023 [57].

Apesar de em geral o número de vendas de automóveis ligeiros passageiros ter seguido uma tendência positiva de crescimento nos últimos anos, a análise dos dados das Figura 3.2 e Figura 3.3 releva dois períodos principais onde houve uma queda do número de vendas. A primeira anomalia acontece entre os anos de 2010 e 2013, que coincide com o período de crise económica atravessada pelo país, podendo ser essa a explicação mais razoável para o abrandamento do crescimento das vendas de automóveis. O outro período de decréscimo acentuado do número de vendas coincide com a pandemia COVID-19, durante a qual a maior parte das pessoas esteve fechada em casa não havendo por isso tanta necessidade de ter um automóvel.

Na Tabela 3.1 estão representadas as taxas médias de crescimento das vendas de automóveis ligeiros para vários intervalos temporais.

Tabela 3.1 - Média de veículos vendidos e taxas de crescimentos nos últimos 30 anos (adaptado de [57]).

Média	Passageiros		Comerciais	
	Taxa de crescimento	Nº de veículos	Taxa de crescimento	Nº de veículos
5 anos	-0,4%	212019	-4,7%	34057
10 anos	8,6%	176536	7,1%	31225
20 anos	1,7%	201544	-0,5%	51489
30 anos	0,6%	214102	0,5%	58284

O valor adotado para a taxa de crescimento das vendas em cada ano foi ajustado de modo a manter a taxa de motorização relativamente constante, tendo-se definido um valor de crescimento médio de 0,4% ao longo dos próximos 25 anos. A taxa de motorização pode ser expressa de forma normalizada, sendo definida como o número de veículos por 1000 habitantes. Adicionalmente, a evolução da taxa de motorização pode ser definida por uma curva sigmoide que se ajusta à evolução temporal da frota desde o aparecimento do mercado automóvel, até ao mercado em expansão, acabando por fim na saturação do mesmo [58].

Um dos pressupostos deste modelo considera que, apesar do crescimento ligeiro da taxa de motorização nos últimos 10 anos [59], o mercado aproxima-se da saturação, muito devido às previsões de crescimento da população que indicam uma diminuição de cerca de 8% em relação à população atual [60]. Na Figura 3.4 está representada a evolução da frota resultante da evolução da população e da taxa de motorização.

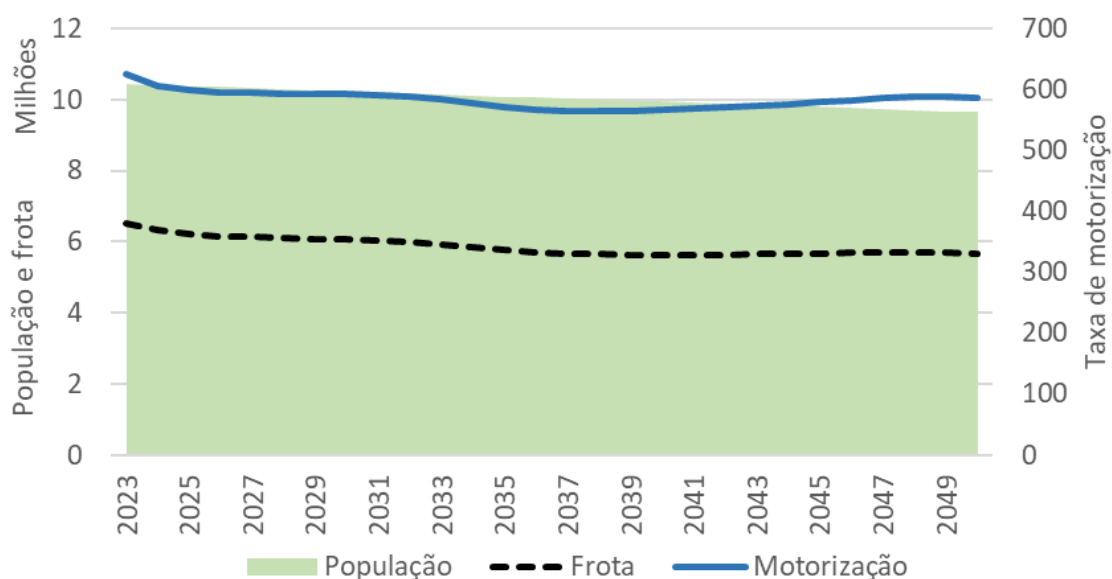


Figura 3.4 - Evolução da população e da frota ao longo dos anos.

Para além da taxa de crescimento atual das vendas, é ainda necessário definir as curvas de sobrevivências destes novos veículos. A sobrevivência de um veículo representa a probabilidade de avaria antes da vida planeada, a probabilidade de um carro após acidente ser considerado como perda total e a probabilidade de um carro ser substituído por um carro novo ou usado. Deste modo, as curvas anuais de sobrevivência de veículos podem ser definidas como o número de veículos que deixam de estar em circulação após k anos [58]. Neste caso foi usada uma distribuição de Weibull para descrever este fenómeno, de acordo com a equação (3.1) [[58]].

$$\varphi(k) = \exp\left(-\left(\frac{k+b}{T}\right)^b\right) \quad (3.1)$$

$$\varphi(0) = 1$$

Em que:

k = idade do veiculo

b = inclinação da curva

T = tempo de vida previsto

Estes parâmetros serão depois ajustados de acordo com os dados estatísticos e também de acordo com o tipo de renovação escolhido para cada um dos cenários em estudo.

Este tipo de curva é não só aplicável aos novos veículos que vão entrando na frota como também aos já existente no ano corrente. No entanto, de modo a melhor refletir o comportamento dos veículos atualmente em circulação, há que os dividir por categorias de idades. Consultando o relatório da ACEA, “VEHICLES ON EUROPEAN ROADS (2024)” [61] é possível obter a distribuição do parque por idade, em 2022 (Tabela 3.2).

Tabela 3.2 - Parque automóvel nacional em 2022, por idade (adaptado de [53]).

Idade	Nº de veículos (passageiros)	Nº de veículos (Comerciais)
>10	3472737	856935
9	165720	20151
8	206557	2747
7	250128	31547
6	260543	34525
5	268328	37304
4	254357	39487
3	232777	38501
2	149529	27309
1	150680	28698
0	148644	21073

É de notar que este relatório não discrimina a distribuição de idades para veículos anteriores a 2012, os quais representam a maior parte da frota. Para melhor dividir estes quase 4 500 000 veículos em categorias de idade, foi consultado o “*National Inventory report*”, produzido pela Agência Portuguesa do ambiente (APA) [62], onde está definida a frota nacional em 2021 por tipo de tecnologia e, mais relevante para este caso, por norma EURO (Tabela 3.3 e Tabela 3.4). Sabendo as datas de introdução de cada uma dessas normas, é possível fazer uma estimativa da percentagem que cada norma EURO representa nos veículos com mais de 10 anos.

Tabela 3.3 - Distribuição da frota de ligeiros de passageiros com mais de 10 anos por norma EURO, em 2021 (adaptado de [62]).

	ANO INICIAL	ANO FINAL	IDADE MÍNIMA	Nº VEICULOS	%
EURO 1	1992	1996	26	307 343	9%
EURO 2	1997	2000	22	692 290	19%
EURO 3	2001	2005	17	991 127	28%
EURO 4	2006	2010	12	991 975	28%
EURO 5	2011	2014	8	620 250	17%
TOTAL (2021)				3 602 985	100%

Tabela 3.4 - Distribuição da frota de veículos comerciais com mais de 10 anos por norma EURO, em 2021 (adaptado de [62]).

	ANO INICIAL	ANO FINAL	IDADE MÍNIMA	Nº VEICULOS	%
EURO 0		1991	31	185 767	18%
EURO 1	1992	1996	26	119 092	12%
EURO 2	1997	2000	22	183 425	18%
EURO 3	2001	2005	17	254 623	25%
EURO 4	2006	2010	12	214 938	21%
EURO 5	2011	2014	8	67 178	7%
TOTAL (2021)				1 025 023	100%

Aplicando estas percentagens aos dados de 2022 da ACEA, obtém-se então uma distribuição mais realista da frota nacional. Tendo definido a taxa de sobrevivência, conhecendo o número

de veículos atual do parque automóvel e estimando a taxa de crescimento anual das vendas, é possível criar uma matriz que permite calcular a quantidade de novos carros, por tipo de tecnologia de propulsão (automóveis vendidos a partir de 2023), que estão em circulação (Tabela 3.5).

Tabela 3.5 - Matriz de cálculo de veículos em circulação.

	Anos em circulação				
	2023	2024	...	2049	2050
2023	$C_{23,23}$	$C_{23,24}$...	$C_{23,49}$	$C_{23,50}$
2024	0	$C_{24,24}$	$C_{x,y}$	$C_{24,49}$	$C_{24,50}$
...	0	0	$C_{x,x}$	$C_{x,49}$	$C_{x,50}$
2049	0	0	...	$C_{49,49}$	$C_{49,50}$
2050	0	0	...	0	$C_{50,50}$
	$C_{23,23}$	$C_{23,24} + C_{24,24}$	$C_{x,x} + \sum_{x=23}^y C_{x,y}$	$C_{49,49} + \sum_{x=23}^{48} C_{x,49}$	$C_{50,50} + \sum_{x=23}^{49} C_{x,50}$

$$T_x = C_{x,x} + \sum_{x=23}^y C_{x,y} + VA_x \quad (3.2)$$

$C_{x,x}$ = total de veículos novos vendidos no ano x

$\sum_{x=23}^y C_{x,y}$ = somatório de veículos vendidos no ano desde 2023, ainda em circulação no ano y

VA_x = veículos anteriores a 2023 ainda em circulação no ano x

T_x = total de veículos no ano x

Este tipo de matriz pode ser aplicado não só às vendas, como também ao consumo de energia, às emissões de CO₂ e aos km.ano de cada tecnologia.

Dentro dos novos veículos que entram na frota é ainda necessário fazer a divisão por tipo de tecnologia. Esta diferenciação vai ser importante para o cálculo da energia total consumida por cada tipo de automóvel.

Segundo dados da ACEA (*European automobile manufactures' association*) apresentados anteriormente no capítulo 2.2, os BEV estabeleceram-se como a segunda escolha mais popular, entre os compradores em 2023 representando agora cerca de 18,2% do número total de veículos vendidos. Já os veículos a combustão continuam numa tendência negativa. No caso do diesel, a sua quota de mercado baixou de 17,8% em 2022 para 12% em 2023. Os

automóveis a gasolina apesar de continuarem a ser o tipo de tecnologia mais vendida tiveram também um decréscimo de vendas de 42% em 2022 para 36% em 2023 (Figura 3.5). Em relação aos veículos híbridos, vale a pena ainda destacar o crescimento dos PHEV que contrasta com a diminuição dos híbridos elétricos convencionais (HEV) [32].

Quota de mercado de veículos de passageiros de várias tecnologias em 2023

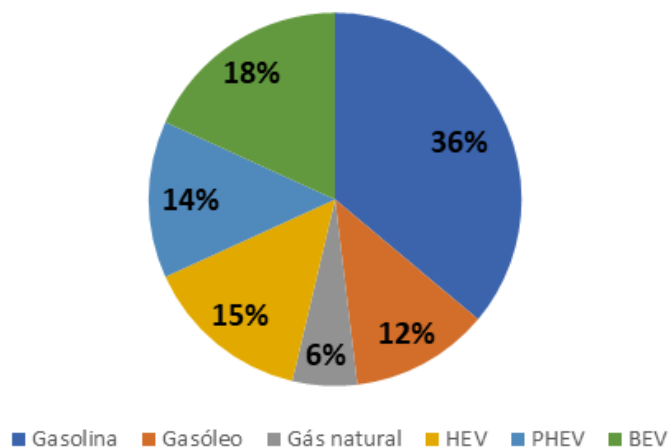


Figura 3.5- Quotas de mercado de veículos ligeiros de passageiros por tecnologia em 2023 [32].

Já nos veículos comerciais, em 2023, o gasóleo continuou a liderar (Figura 3.6). No entanto a sua quota de mercado diminuiu nestes últimos 2 anos passando de 95,1% em 2022 para 90,8% no ano passado. Simultaneamente, as carrinhas eletricamente carregáveis (PHEV + BEV) estão a ganhar força, contribuindo para uma mudança gradual na dinâmica das vendas de veículos comerciais.

Em relação às vendas de ligeiros de mercadoria elétricos, estas duplicaram em 2023, conquistando uma quota de mercado de 8,6 %, acima dos 4,3% em 2022. Nestes dados fornecidos pela ACEA não é especificado o contributo que cada tipo eletricamente carregável tem para os 8,6% de quota total [63]. No entanto tendo em conta os dados anteriores de veículos em circulação e os modelos mais populares deste tipo de veículos, percebe-se que a maior parte destes veículos serão certamente BEV. Por este motivo foi considerado que da quota total, 8 % seriam BEV e os restantes 0,6% seriam de PHEV.

Quota de mercado de várias tecnologias em 2023

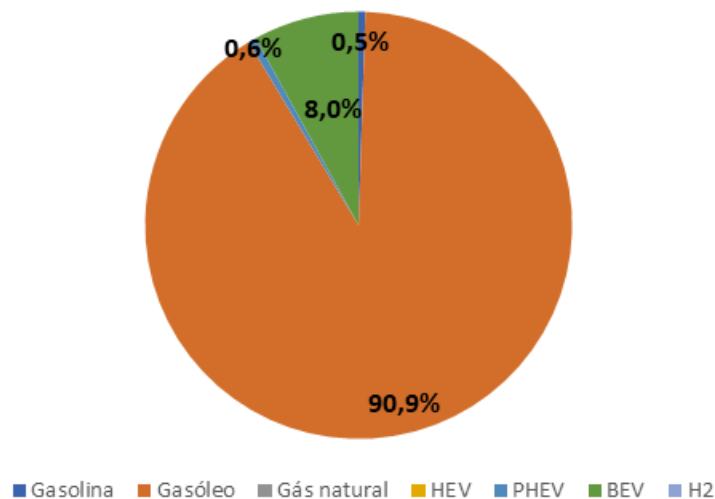


Figura 3.6-Quotas de mercado de veículos ligeiros de mercadorias por tecnologia em 2023 [32].

Em termos de evolução das vendas até 2050, a tendência adotada irá depender muito do tipo de cenário em estudo, algo que vai ser definido na secção 3.4. No entanto esta evolução pode ser tipicamente expressa matematicamente por meio de uma função de Gompertz ou uma função logística. Neste caso e para a frota automóvel portuguesa foi adotada a função logística representada pela equação (3.3), para a modelação do crescimento da frota.

$$Quota\ de\ mercado\ ano\ i\ (\%) = n + (M - n) \times \left(\frac{1}{1 + e^{-\beta(x_i - x_0)}} \right)^a \quad (3.3)$$

Em que:

n = quota mínima considerada

M = quota máxima considerada

β = taxa de crescimento ou declive da curva

x_0 = ano inicial

x = ano i

a = fator de crescimento

Ainda relacionado com a evolução da frota, é de notar que no contexto deste trabalho o termo “quota de mercado” representa a relação em percentagem entre os veículos vendidos de uma determinada tecnologia e o número de vendas total de veículos ligeiros.

Para além dos veículos novos que entram na frota todos os anos, é ainda necessário considerar os veículos já existentes. Para obter estes dados, foram consultados o relatório da ACEA, “*Vehicles on European roads*”, publicado em fevereiro deste ano [61], e o “*National Inventory report*”, produzido pela Agência Portuguesa do ambiente (APA) [62].

Segundo o relatório da ACEA, circulavam cerca de 5.560.000 veículos ligeiros de passageiros e 1.163.000 veículos comerciais nas estradas portuguesas em 2022. Para além do número total de automóveis, neste documento apresenta-se também discriminado o número de veículos por tecnologia de propulsão, em percentagem. Esta divisão de frota por tecnologia também pode ser estimada através do *report* produzido APA já que apesar de neste serem apresentados dados relativos a 2021, não seria de esperar uma distribuição do parque automóvel muito diferente entre 2021 e 2022. Quando comparados os dados de ambas as fontes, conclui-se que realmente a distribuição do parque é semelhante em ambos os anos algo que era expectável tendo em conta a proporção entre os veículos vendidos nesses anos e o número total de veículos.

O único dado que não coincide entre ambos os relatórios é o número de veículos ligeiros de passageiros a GPL. Apesar de o relatório da APA contabilizar cerca de 62.000 veículos a GPL (cerca de 1% da frota), no documento apresentado pela ACEA é dito que este tipo de veículos não tem representação em Portugal apresentando uma quota na frota de 0,0%. Sendo assim, sabendo que ainda aos dias de hoje existem veículos a GPL em circulação, para este tipo de veículos foi adotada uma quota de 1% na frota nacional.

Os dados da distribuição do parque de ligeiros de passageiros e comerciais estão apresentados nas Tabela 3.6 e Tabela 3.7, respetivamente.

Tabela 3.6 - Distribuição da frota de veículos ligeiros de passageiros em 2022 (Adaptado de [61])

Tipo de tecnologia	Percentagem	Nº de veículos ligeiros de passageiros
Gasolina	36,5%	2029400
Gasóleo	58,8%	3269280
GPL ou GN	1%	55600
HEV	1,6%	88960
PHEV	1%	55600
BEV	0,9%	50040
H2	0%	0%

Tabela 3.7 - Distribuição da frota de veículos ligeiros comerciais em 2022 (Adaptado de [61]).

Tipo de tecnologia	Percentagem	Nº de veículos ligeiros de passageiros
Gasolina	0,2 %	2326
Gasóleo	99,5 %	1157185
GPL ou GN	0%	0
HEV	0%	0
PHEV	0%	0
BEV	0,2%	2326
H2	0%	0

3.2 Tecnologia de propulsão

Para a quilometragem anual para cada tecnologia, foram consultados os dados presentes no “*National Inventory report*”, produzido pela APA [62]. Neste documento para além do número total de veículos em circulação em 2021 referido anteriormente, também são fornecidos dados relativos aos veículo.km anuais para veículos a combustão, organizados por norma Euro correspondente. Tendo em conta o número de veículos de cada tecnologia e os veículos.km associados a cada um deles é possível então obter um valor médio de km percorridos por ano para a cada sistema de propulsão (Equação (3.4)).

$$km/ano (Tecnologia x) = \frac{\sum VKT_x}{\sum N_x} \quad (3.4)$$

Em que x é o tipo de tecnologia (Diesel, gasolina, HEV, PHEV, GPL, BEV, H2), N é a quantidade de veículos de determinada tecnologia e VKT são os veículo.km anuais. Na Tabela 3.8 estão representados os valores considerados para cada tecnologia, sendo os valores a negrito resultantes das hipóteses consideradas e os restantes diretamente retirados de [62].

Tabela 3.8 - Quilometragem média anual adotada para cada tipo de tecnologia (Adaptado de [62]).

Média por tecnologia	Ligeiros de passageiros		Ligeiros de mercadorias	
	km/ano	Nº de veículos	km/ano	Nº de veículos
ICEV (Gasóleo)	10995	2 943 802	10957	1 228 025
ICEV (Gasolina)	6421	2 010 679	2840	9 503
HEV	9675	106 882	9675	-
LPG	7945	61 949	7945	-
PHEV	9675	-	9675	-
BEV	9138	-	9138	-
FCEV	10995	-	10995	-

Como é possível perceber, existem algumas tecnologias para as quais o relatório da APA não é suficiente para definir os quilómetros anuais, sendo por isso uma abordagem diferente principalmente para os PHEV, FCEV e BEV. Começando pelos BEV, um estudo feito pela *Nissan* em 2021 conclui que, na Europa, os veículos elétricos BEV percorriam em média apenas mais 600 km que os veículos a combustão [64]. Tendo em conta a própria diferença de km entre os veículos a gasolina e a gasóleo, optou-se por utilizar um valor médio para a quilometragem anual dos BEV (Equação (3.1)).

$$km_{elétrico} = \frac{N_{diesel} \times km_{diesel} + N_{gasolina} \times km_{gasolina}}{N_{diesel} + N_{gasolina}} \quad (3.5)$$

Já para os PHEV foram considerados os mesmos quilómetros anuais que os híbridos convencionais (HEV).

Para além destas tecnologias mais atuais, foram ainda considerados os veículos a hidrogénio (FCEV), os quais ainda estão numa fase de desenvolvimento embrionária. Devido à falta de dados relativos a este tipo de tecnologias e considerando o facto dos FCEV á partida não apresentarem problemas de autonomia, foi considerado que este tipo de veículos teria uma quilometragem anual semelhante aos veículos diesel, já que estes são o tipo de veículos com maior distância percorrida anualmente. Desta forma evita-se qualquer tipo de limitação a esta tecnologia ainda pouco explorada.

Por fim, para os veículos comerciais e considerando que os dados da APA demonstram que os quilómetros percorridos anualmente não são muito diferentes aos veículos de passageiros, foi considerado que as restantes tecnologias teriam um comportamento semelhante. É de notar que apesar de nos veículos a gasolina o número de quilómetros anuais é cerca de 3 vezes inferior aos ligeiros de passageiros, a sua contribuição total para a frota de comerciais

é menor que 1% tendo por isso sido considerado os dados correspondente ao gasóleo como mais representativos do comportamento geral desta classe de automóveis. A Tabela 3.8 contém os quilómetros anuais calculados para cada tecnologia.

No entanto, depois de calculados os quilómetros anuais por tecnologia é possível constatar comportamentos algo estranhos. Em primeiro lugar os veículos a gasóleo aparentam percorrer muitos mais km que os restantes veículos sendo a diferença maior em relação aos veículos a gasolina ($\approx 40\%$ superior). Este fenómeno poderá dever-se ao facto de os veículos a diesel serem preferencialmente utilizados em meio profissional e empresarial onde os automóveis tendencialmente percorrem mais distância anualmente. Sendo assim e devido ao facto de não ser possível diferenciar os dados recolhidos da APA por tipo de utilização, optou-se por adotar um valor médio de 9263 km/ano para todas as tecnologias.

Outra hipótese considerada está relacionada com o decaimento da quilometragem do veículo à medida que este envelhece (Figura 3.7). Este fenómeno já foi estudado num documento publicado em 2006 pelo Departamento de Transportes dos EUA [65], onde foi adotado um modelo exponencial para modelar os VKT anuais em função da idade do veículo que pode ser modelado de acordo com a Equação (3.6).

$$V_x = V_{x-1} \times e^{-0,0006x} \quad (3.6)$$

Sendo:

V_x = quilometragem anual de um veículo com x anos

x = idade do veículo em anos

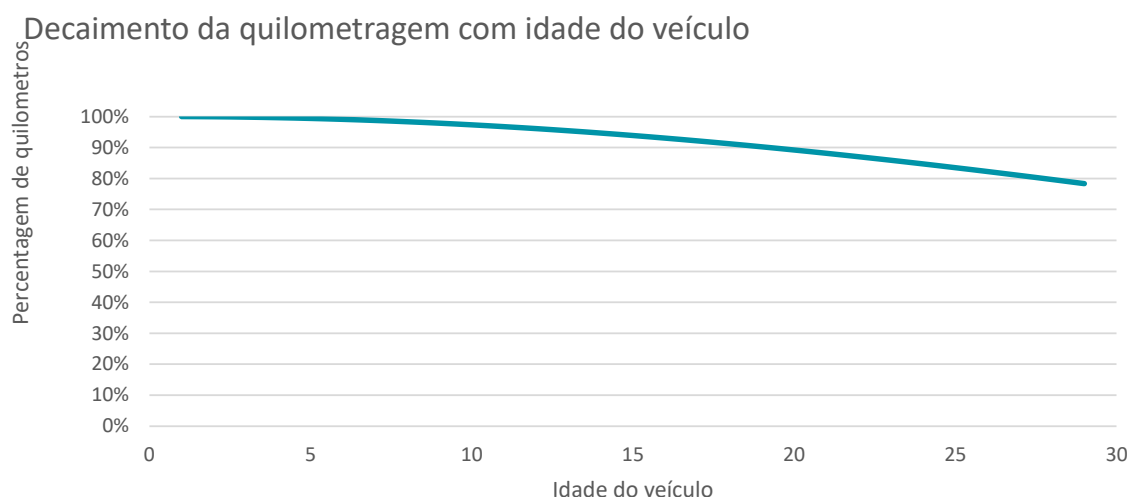


Figura 3.7-Curva de decaimento da quilometragem com a idade do veículo.

Para obter a energia total consumida anualmente, para além dos quilómetros percorridos é ainda necessário definir a energia gasta por km (MJ/km). Esta encontra-se intrinsecamente ligada às emissões de CO₂ para veículos a combustão, emissões essas que também são contabilizadas no ficheiro da APA (CO₂/km), [62].

Como descrito anteriormente (capítulo 2.2), para o gasóleo são emitidas cerca de 2650g CO₂/l, enquanto no caso dos veículos a gasolina, estes têm um fator de emissão de aproximadamente 2300-2400g CO₂/l, dependendo da composição exata do combustível. Estes fatores podem ser ainda validados recorrendo à UNECE [66], a qual define a seguinte relação:

- Gasolina:

$$\frac{\text{Emissões de CO}_2 \text{ (g/km)}}{24} = \text{Consumo de combustível (l/100 km)} \quad (3.7)$$

- Gasóleo:

$$\frac{\text{Emissões de CO}_2 \text{ (g/km)}}{26,5} = \text{Consumo de combustível (l/100 km)} \quad (3.8)$$

Com estes fatores é possível calcular o consumo em l/100 km para estas tecnologias. Por sua vez, este consumo pode ser transformado em MJ/km multiplicando o mesmo pela densidade do combustível e pelo seu poder calorífico (Equação 3.9)

$$E_{\text{consumida}}(\text{MJ})/\text{km} = \frac{\text{consumo de combustível (L/100 km)}}{100} \times \rho_{\text{fuel}} \times \text{PCI}_{\text{fuel}} \quad (3.9)$$

Em que:

$$\rho_{\text{gasolina}} = 0,737 \text{ kg/L}$$

$$\rho_{\text{gasóleo}} = 0,846 \text{ kg/L}$$

$$\text{PCI}_{\text{gasolina}} = 43,4 \text{ MJ/kg}$$

$$\text{PCI}_{\text{gasóleo}} = 42,6 \text{ MJ/kg}$$

No caso dos veículos a GPL o fator de emissão adotado foi de 1616gCO₂/l [67] (Equação ((3.10) e (3.11))

$$\frac{\text{Emissões de CO}_2 \text{ (g/km)}}{16,16} = \text{Consumo de GPL (L/100 km)} \quad (3.10)$$

$$E_{consumida}(MJ)/km = \frac{\text{consumo de GPL (L/100 km)}}{100} \times \rho_{GPL} \times PCI_{GPL} \quad (3.11)$$

Em que:

$$\rho_{GPL} = 0,537 \text{ kg/L}$$

$$PCI_{GPL} = 45,5 \text{ MJ/kg}$$

Já para os veículos elétricos BEV e PHEV a falta de emissões de escape torna necessária uma abordagem para o cálculo da energia consumida por quilómetro, que não utilize a relação entre CO₂ emitido e energia consumida. Começando pelos BEV, foram recolhidos os dados de venda em 2023 e selecionados os 10 modelos mais vendidos na europa [68]. Para obter uma estimativa dos consumos de cada um destes modelos foi consultado o *website spiritmonitor* onde é possível recolher dados reais colocados por diversos condutores [69]. Com estes é então possível realizar uma média ponderada do consumo médio para este este tipo de veículos.

Tabela 3.9 - Consumo energético médio de BEV ligeiros de passageiros [60], [61].

Modelo	Nº de veículos vendidos	Consumo (MJ/km)	Consumo médio
Tesla model Y	136564	0,73	0,69
Tesla model 3	42588	0,66	
Volkswagen ID.3	35233	0,68	
Volkswagen ID.4	41672	0,75	
Fiat 500	31340	0,60	
MG 4	30779	0,68	
Dacia Spring	26748	0,51	
Peugeot 208	26013	0,65	
MG 4	72212	0,68	
Bmw i4	48958	0,79	

Dentro dos veículos elétricos, falta ainda definir os PHEV. Este tipo de sistema é talvez o mais difícil de definir em termos de consumos energéticos, uma vez que depende extremamente do tipo de condução adotada e respetiva relação eletricidade/gasolina.

Sendo assim foram recolhidos dados de consumo do *spiritmonitor* de alguns dos modelos de PHEV mais vendidos que também tenham uma versão ICEV a gasolina.

Na Tabela 3.10 estão representados os dados recolhidos para o consumo de gasolina em ambos os sistemas.

Tabela 3.10 -Comparação de consumos de gasolina de veículos PHEV e de ICEV (adaptado de [69]).

Modelo	Consumo versão ICEV (L/100 km)	Consumo versão ICEV (MJ/km)	Consumo PHEV (L/100 km)	Consumo PHEV (MJ/km)
Ford Kuga	9,05	2,89	3,75	1,20
Mitsubishi Out Lander	9,2	2,94	4,49	1,44
Volvo XC60	9,62	3,08	5,64	1,80
Volvo XC40	8,49	2,72	5,34	1,71
Kia Sportage	8,76	2,80	4,36	1,39
BMW série 3	9,29	2,97	4,97	1,59
Peugeot 3008	7,66	2,45	3,9	1,25
Hyundai Tucson	8,6	2,75	4,5	1,44
BMW X1	8,32	2,66	4	1,28
Mercedes classe C	9,36	2,99	5,3	1,70
CONSUMO MÉDIO	8,84	2,83	4,63	1,48

Com as diferenças entre os consumos médios de gasolina dos 2 tipos de tecnologia, é possível calcular a redução de consumo associada ao modelo Híbrido plug-in fazendo a razão entre o consumo médio PHEV com o consumo médio ICEV. Esta relação demonstra que em média os PHEV consomem cerca de 52% da gasolina consumida por um veículo ICEV de um modelo idêntico.

Visto que a fonte consultada não define consumos de eletricidade para estes veículos, foi considerado que o consumo de eletricidade era semelhante ao de um BEV. Esta hipótese foi considerada adequada uma vez que apesar da autonomia em modo elétrico ser menor que um veículo 100% elétrico (resultado de uma bateria mais pequena), os dados acima mostram que os modelos mais vendidos, são tipicamente veículos maiores (SUV's) e por esse motivo acabam por ter um peso médio semelhante aos BEV. Na Tabela 3.11 está representado o consumo total considerado para os PHEV quando considerado o consumo de eletricidade mais o consumo de gasolina.

Tabela 3.11 - Consumo total de energia de PHEV.

	Consumo gasolina (L/100km)	Consumo gasolina (MJ/km)	Consumo eletricidade (MJ/km)	CONSUMO TOTAL (MJ/km)
PHEV	4,63	1,48	0,69	2,17

Por fim foram ainda considerados os veículos FCEV, sendo que neste caso o modelo mais desenvolvido é o Toyota Mirai. Segundo dados estatísticos retirados do *Spritmonitor* o consumo deste modelo é de cerca de 0,99 kg H₂/100km. Este consumo de hidrogénio pode ser depois transformado em MJ/km através da equação (3.12):

$$E_{consumida}(MJ)/km = \frac{\text{consumo de H}_2 \text{ (Kg/100 km)}}{100} \times PCI_{H_2} \quad (3.12)$$

Em que:

$$PCI_{H_2} = 120 \text{ MJ/kg}$$

Os dados da APA demonstram que os veículos comerciais tipicamente consomem mais energia por quilómetro fenómeno que pode ser associado a estes veículos serem tipicamente maiores e usados para transportes de mercadorias ligeiras. Na equação (3.13) ilustra a relação entre o consumo médio de um ICEV (gasóleo) ligeiro de passageiros e um ICEV (gasóleo) comercial.

$$E_{\text{gasóleo_passageiros}}(MJ/km) = 2,62 \text{ MJ/km}$$

$$E_{\text{gasóleo_comerciais}}(MJ/km) = 3,16 \text{ MJ/km}$$

$$\text{fator proporcional} = \frac{3,16}{2,62} = 1,2 \quad (3.13)$$

No entanto devido à baixa representatividade de outras tecnologias nesta frota, foi considerado que o consumo de BEV, HEV, PHEV e FCEV teriam uma relação semelhante à relação entre os ICEV (a gasóleo) de passageiros e comerciais.

Na Tabela 3.12 estão representados todos os valores considerados relativamente aos consumos energéticos das diferentes tecnologias. A diferenciação entre o consumo dos veículos EURO 6 e consumo médio geral é feita para melhor caracterizar os veículos novos EURO 6 que irão entrar na frota, sendo que as células não preenchidas dizem respeito a tecnologias ou com um número de vendas pouco significativo ou que não estão incluídas na

norma EURO 6 (BEV). Nestes casos foi considerado que o consumo dos novos veículos seria igual ao consumo médio.

Tabela 3.12 - consumo energéticos por km por tipo de veículo (Adaptado de [62]).

Média por tecnologia	Consumo médio passageiros (MJ/km)	Consumo Euro 6 passageiros (MJ/km)	Consumo médio comerciais (MJ/km)	Consumo Euro 6 comerciais (MJ/km)
ICEV (gasóleo)	2,62	2,52	3,16	3,24
ICEV (gasolina)	2,69	2,67	3,62	2,72
HEV	1,88	1,87	2,26	-
LPG	2,75	2,91	3,32	-
PHEV (gasolina)	1,41	-	1,70	-
PHEV (elétrico)	0,69	-	0,84	-
BEV	0,69	-	0,84	-
H2	1,19	-	1,43	-

Por fim, para calcular a energia total consumida por cada tipo basta multiplicar o consumo por km (MJ/km) pelo número de veículo V e pelo número médio de km viajados por ano, d , de acordo com a equação (3.14).

$$E_{t,x} = e_x \times V \times d \quad (3.14)$$

Sendo:

$E_{t,x}$ = energia total consumida por veículos da tecnologia x

e_x = consumo específico da tecnologia x (MJ/km)

d = número médio de km viajados por ano

Vale a pena ainda referir que no cálculo da energia total consumida dos veículos já existentes, foi definida uma idade média da frota. Segundo dados da ACAP, a idade média da frota em 2022 era de cerca de 13,4 anos algo que vindo a aumentar nos últimos 20 anos [70]. A Figura 3.8 apresenta a distribuição do parque de ligeiros de passageiros por escalões etários.

Envelhecimento do Parque Automóvel

Parque de ligeiros de passageiros por escalões etários

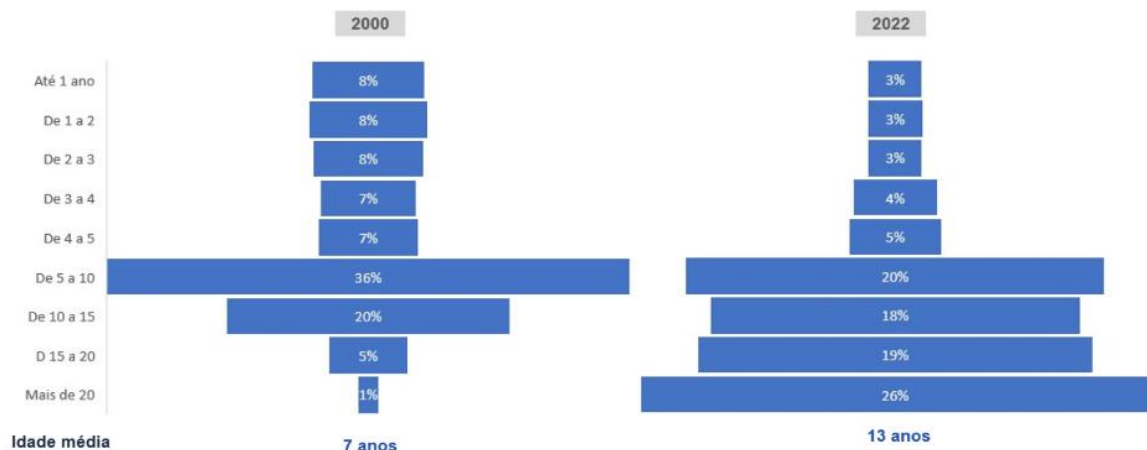


Figura 3.8-Idade média do parque automóvel nacional[70]

Tendo em conta as perspetivas de envelhecimento da frota, foi considerada uma idade média da frota em 2023 de 14 anos.

Por fim, falta ainda definir as emissões de CO₂ totais e por km. As emissões por km (g CO₂/km) são um dado retirado diretamente do relatório da APA e já utilizado anteriormente para o cálculo do consumo específico de combustível. Estes dados de emissões de CO₂ estão apresentados na Tabela 3.13.

Tabela 3.13 - emissões de CO₂/km por tipo de veículo (Adaptado de [62]).

Média por tecnologia	Emissões médias passageiros (gCO ₂ /km)	Emissões Euro 6 passageiros (gCO ₂ /km)	Emissões médias comerciais (gCO ₂ /km)	Emissões Euro 6 comerciais (gCO ₂ /km)
Diesel	192,8	185,2	232,1	238,3
Petrol	201,9	200,7	266,1	199,5
HEV	140,8	140,7	169,5	169,5
LPG	191,0	192,4	230,0	230,0
PHEV (gasolina)	105,7	105,7	127,3	127,3
PHEV (eletrico)	0,0	0,0	0,00	0,00
BEV	0,0	0,0	0,00	0,00
H2	0,0	0,0	0,00	0,00

É de notar que os valores a negritos representam valores que tiveram de ser calculados tendo em conta hipóteses já apresentadas. No caso das emissões de CO₂ dos PHEV, de acordo com o resultado da equação (3.13), foi considerado que este tipo de veículos emitia cerca de

52% do CO₂ emitido por um ICEV a gasolina. Para estabelecer valores de emissões para veículos comerciais de tecnologias com pouca ou nenhuma representação na frota atual foi usada a relação calculada na equação (3.13). Sendo assim considerou-se que os veículos comerciais emitem também cerca de 1,2 mais CO₂ que um veículo ligeiro de passageiros.

3.3 Fonte energética

Para analisar o ciclo WTW, é necessário considerar variáveis relacionadas com a fonte energética de cada sistema de propulsão. Isto porque, para além das emissões diretas do escape dos veículos a combustão, há que contabilizar as emissões associadas à transformação da energia primária em energia final (emissões WTT). Para tal foram definidos fatores de emissão que relacionam a energia produzida (MJ) com a quantidade de CO₂ emitido (gCO₂) (Tabela 3.14).

Tabela 3.14 - Fatores de emissão [71].

Fonte energética	Fator de emissão (gCO ₂ /MJ)
Gasolina fóssil	17,0
Etanol	23,5
ETBE	28,4
Gasolina Sintética	0,9
Gasóleo fóssil	18,9
FAME	25,2
HVO	32,5
Gasóleo Sintético	0,9
GN	11,4
Eletricidade	48,1
H2	3,6

A maioria destes fatores foram diretamente retirados de um estudo realizado pela JEC para a Comissão Europeia [71] onde são analisados os fatores de emissão no panorama atual da UE. No entanto, é necessária especial atenção para fontes energéticas como a eletricidade, combustíveis sintéticos e hidrogénio, já que a forma como estas são produzidas têm um grande impacto no fator de emissão resultante.

No caso da eletricidade, o fator de emissão é altamente dependente da forma como esta é produzida. Para obter um valor o mais próximo possível da realidade atual em Portugal, foi

consultado um estudo da *European Environment Agency* onde são definidos os fatores de emissão para a eletricidade produzida em cada país da EU [72]. É de notar que este fator é o único que varia com o passar dos anos, com o objetivo de atingir um fator de emissão de 0 MJ/gCO₂. A taxa de redução dependerá das premissas relacionadas com cada um dos cenários mais à frente apresentados.

Outra premissa considerada para a produção de energia está relacionada com a produção de combustíveis sintéticos e hidrogénio. Neste caso foram utilizados fatores de emissão assumindo que estes tipos de combustível serão produzidos com recurso apenas a eletricidade renovável, já que só dessa forma é que se tornam realmente uma solução para a atingir a neutralidade carbónica. Sendo assim os fatores de emissão destas fontes energéticas foram considerados constantes ao longo dos anos e iguais aos valores apresentados na Tabela 3.14.

No caso específico dos combustíveis sintéticos, devido à fase inicial de desenvolvimento em que se encontram, considerou-se que o método de produção destes seria semelhante ao utilizado pela *Porsche*, algo já explicado no capítulo 2.1.

A metodologia associada ao cálculo da energia elétrica necessária para produzir combustíveis sintéticos com recurso a hidrogénio está exemplificado no anexo 1.

3.4 Definição de cenários

3.4.1 Cenário 1: Substituição tecnológica e transição para a eletrificação

Neste primeiro cenário de descarbonização, os BEV são a principal aposta para cumprir com as normas de emissões cada vez mais restritas e atingir a neutralidade carbónica em 2050. Sendo assim, as vendas (quota de mercado) deste tipo de veículos cresce rapidamente atingindo os 52% de veículos ligeiros e 70% em veículos comerciais em 2030 e os 85% e 80% em veículos ligeiros e veículos comerciais, respetivamente em 2050.

É importante referir ainda que neste cenário a fraca aposta em combustíveis líquidos alternativos e os impostos mais elevados sobre os combustíveis convencionais levam ao gradual desaparecimento não só dos veículos a combustão convencionais, como também de qualquer outro tipo de veículo híbrido como os PHEV e os HEV. Estes últimos atingem uma quota de mercado nos ligeiros de passageiros de 9% e 5,5% em 2030, respetivamente, sendo que a partir de 2040% não são vendidos praticamente nenhum tipo de veículo com motor de combustão interna.

Em relação às vendas de veículos comerciais e seguindo o trajeto projetado pelo RNC2050 e pelo PNEC, a transição para a mobilidade elétrica (BEV) é extremamente rápida passando de uma quota de mercado de 9% em 2023 para 70% já em 2030. Para além dos BEV foi considerado ainda a introdução de FCEV a partir de 2029-2030. A intensa eletrificação leva à

necessidade de introduzir o hidrogénio principalmente como forma de armazenamento de energia elétrica.

Desta forma, assume-se que os planos definidos no RNC2050 se concretizam, começando a produção de hidrogénio verde por volta de 2030, sendo que só a partir daí é que os FCEV começam realmente a entrar. Estes veículos, desde a sua adoção, atingem uma quota de mercado de 15% nos ligeiros de passageiros e 20% nos comerciais. A maior autonomia e densidade energética do hidrogénio torna-o uma aposta mais viável para veículos comerciais devido principalmente ao facto de estes serem tipicamente maiores e percorrem mais km. Estas premissas de crescimento quando aplicadas à equação (3.3) resultam nas curvas representadas nas Figura 3.9 e Figura 3.10.

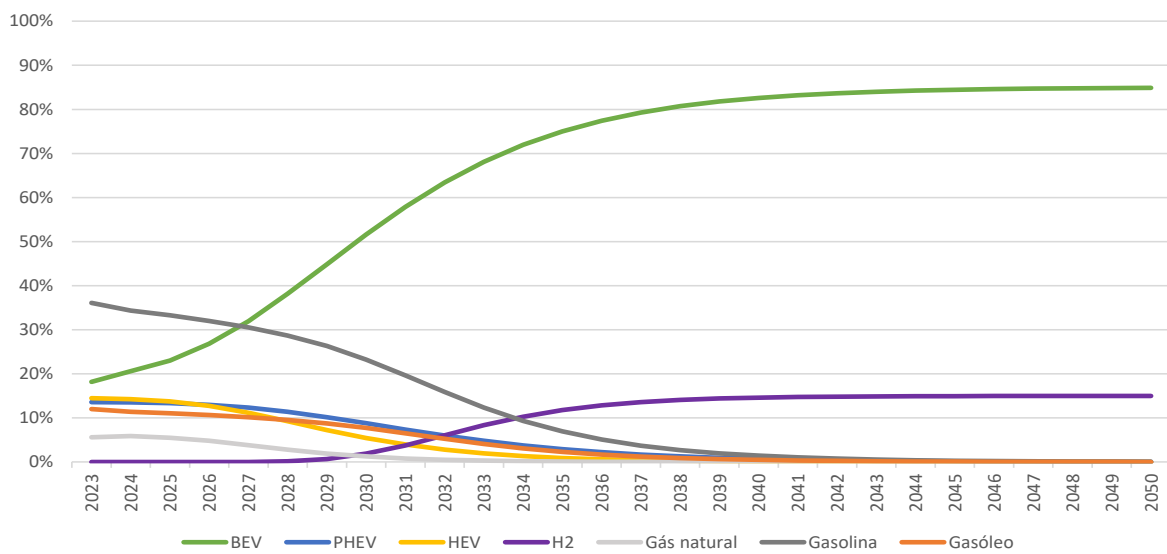


Figura 3.9 - Evolução da quota de mercado de ligeiros de passageiros, cenário 1.

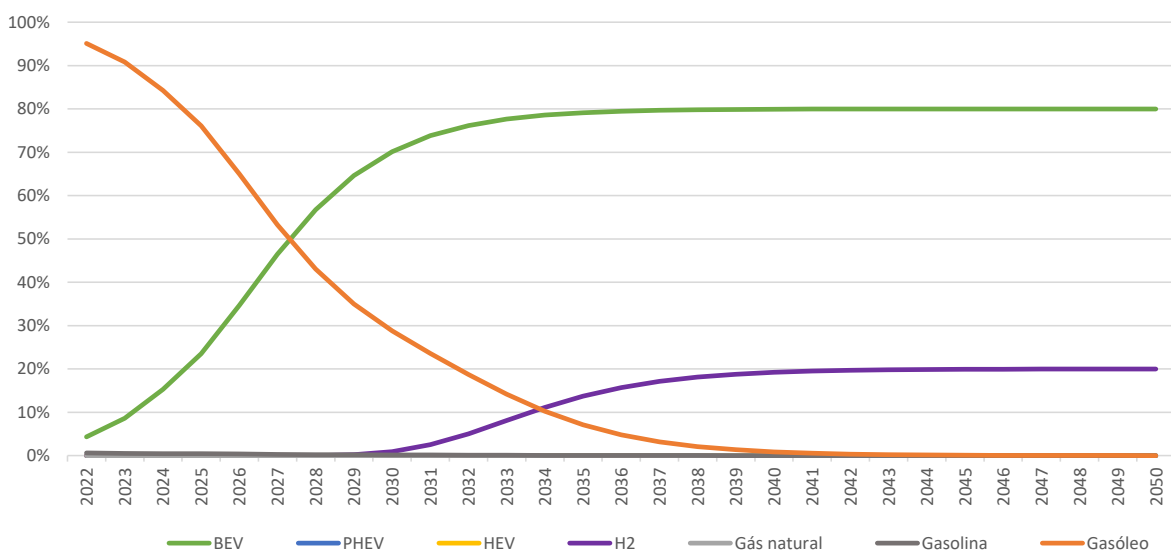


Figura 3.10 - Evolução da quota de mercado de ligeiros comerciais, cenário 1.

O maior número de BEV na frota leva a um crescimento significativo na procura de electricidade. Por esse motivo foi considerado que o investimento na electricidade verde passa a ser de facto uma grande prioridade tanto a nível europeu como nacional. Por este motivo, neste cenário a produção de energia elétrica passa a ser feita com recurso a fontes 100% renováveis logo a partir de 2040, sendo ainda mais ambicioso que a meta de 2050 proposta no RNC2050. A Tabela 3.15 demonstra a evolução da quota de electricidade renovável ao longo do tempo.

Tabela 3.15 - Evolução da quota de electricidade renovável.

	2022	2030	2040	2050
Quota de electricidade renovável	63%	83%	100%	100%

3.4.2 Cenário 2: Alteração de fonte energética (gasóleo e gasolina)

Noutro cenário desenhado, o objetivo da neutralidade carbónica é procurado cumprindo recorrendo a uma mudança na fonte energética dos veículos atuais através da introdução de combustíveis alternativos ao gasóleo e à gasolina, não sendo promovida uma transição drástica ao nível da tecnologia de propulsão.

Neste cenário, os combustíveis fósseis começam a ser substituídos já a partir de 2026. No caso da gasolina fóssil, a substituição é feita com recurso a gasolina sintética sendo que esta é incorporada a uma taxa média de 5% ao ano atingindo os 27% em 2030 e 80% já em 2040. Estes valores significam o fim da gasolina fóssil já em 2040, já que os restantes 20% representam os níveis de incorporação atual de etanol (5%) e ETBE (15%), considerando a mistura normalizada para gasolina E5 [73]. Vale a pena frisar que se considerou que as incorporações de etanol e ETBE se mantiveram constantes ao longo dos anos já que ambos têm níveis máximos de incorporação a partir dos quais seriam necessárias alterações ao nível dos próprios motores de combustão [17]. Estas premissas resultam na evolução representada na Figura 3.11.

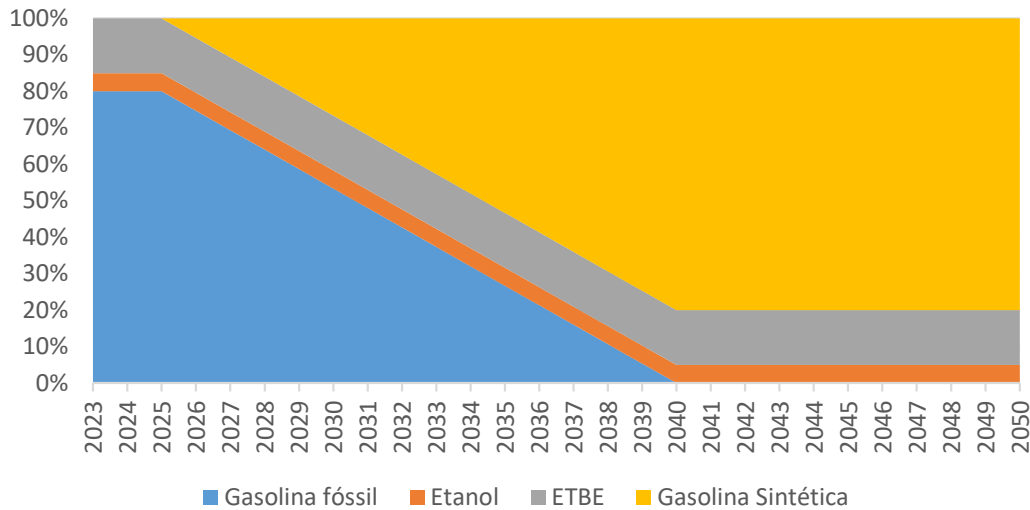


Figura 3.11 - Evolução da constituição da mistura de gasolina, cenário 2.

No gasóleo existe uma aposta inicial no biodiesel, mais especificamente no HVO, uma vez que as suas características são muito semelhantes às do gasóleo fóssil [16]. Pelo contrário, o FAME já se encontra no limite de incorporação (7%) [16] pelo que foi considerado que este não sofre alterações ao longo dos anos.

Sendo assim a percentagem de inclusão de HVO na mistura diesel aumenta gradualmente a uma taxa de $\approx 4\%$ ao ano até 2035, onde atinge os 35%. No entanto, a utilização de biocombustíveis está altamente limitada pela disponibilidade da matéria-prima. Por esse motivo considerou-se que a partir de 2035 a produção de hidrogénio aliada a esta falta de matéria-prima, têm como consequência a estagnação do biodiesel e subsequente introdução de gasóleo sintético como substituto do gasóleo fóssil, o qual se considera que é produzido com recurso a hidrogénio verde, tal como descrito no capítulo 2.1. Este investimento em combustíveis alternativos resulta na evolução apresentada na Figura 3.12 o que garante o fim dos combustíveis fósseis em 2050.

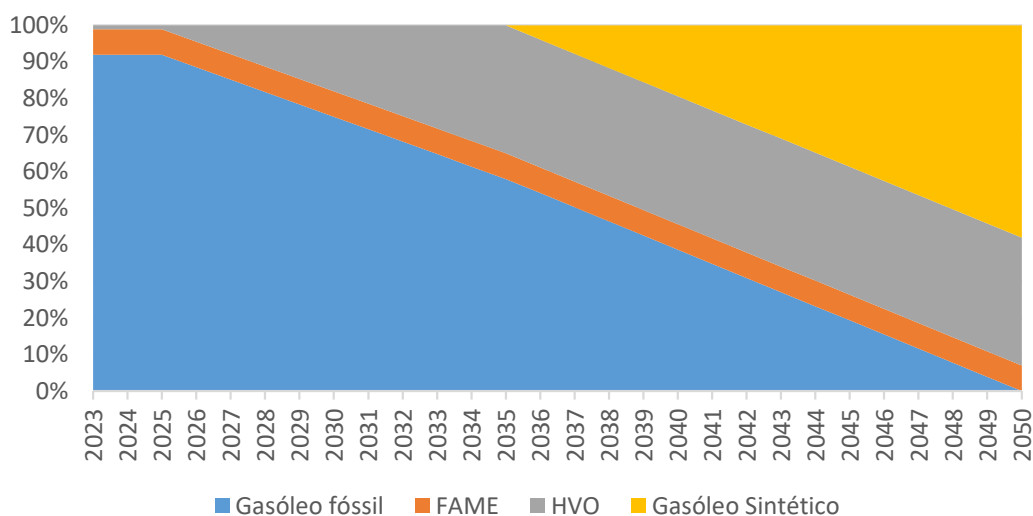


Figura 3.12 - evolução da constituição da mistura do gasóleo, cenário 2.

Ao nível das vendas, o desenvolvimento e aposta forte nos biocombustíveis e combustíveis sintéticos reduz a necessidade de veículos eletricamente carregáveis (PHEV e BEV) para atingir a neutralidade carbónica. Por esse motivo, o mercado de BEV rapidamente satura a partir da introdução de combustíveis alternativos, atingindo uma quota máxima de 20% nos ligeiros de passageiros já em 2030. Os PHEV neste cenário atingem também uma quota de 25%, porém só saturam em 2040, o que coincide com a substituição total da gasolina fóssil. O tipo de tecnologia de propulsão que mais cresce com este tipo de panorama são os HEV, pois possuem eficiências mais elevadas que ICEV o que aliado a um combustível neutro em carbono, torna-os no tipo de tecnologia mais predominante. Sendo assim as vendas de HEV crescem rapidamente a partir do momento que começam a ser introduzidos combustíveis alternativos atingindo os 26% em 2030 e 40 % em 2050.

Vale a pena ainda referir que neste cenário deixa de existir necessidade para a extinção total de ICEV, o que neste caso está representado pelo facto de em 2050 estes ainda terem uma quota de mercado de 5%.

Em relação aos FCEV, o facto de o hidrogénio estar a ser maioritariamente utilizado para produção de combustíveis sintéticos pela altura em que esta tecnologia está desenvolvida o suficiente para entrar no mercado (2030-2035), impede que estes automóveis estabeleçam uma quota de mercado significativa alcançando uma quota máxima de 10% em 2050 nos veículos ligeiros. Já nos veículos comerciais, e devido à fraca aposta nos BEV como alternativa aos ICEV, os veículos a hidrogénio tornam-se uma opção real para este subsector surgindo como forma de reduzir as emissões locais mais nocivas (NO_x, partículas sólidas) associadas à combustão de gasóleo, atingindo os 40% em 2050.

Mesmo assim, a introdução destes combustíveis neutros em carbono, reduzem bastante a necessidade de uma renovação da frota ao nível tecnológico, pelo que as vendas de veículos ligeiros continuam a ser dominadas pelos veículos a gasóleo que em 2050 ainda representam 45% do número de vendas totais de veículos ligeiros. A evolução das vendas de cada tecnologia para veículos de passageiros e comerciais estão representadas nas Figura 3.13 e Figura 3.14, respetivamente.

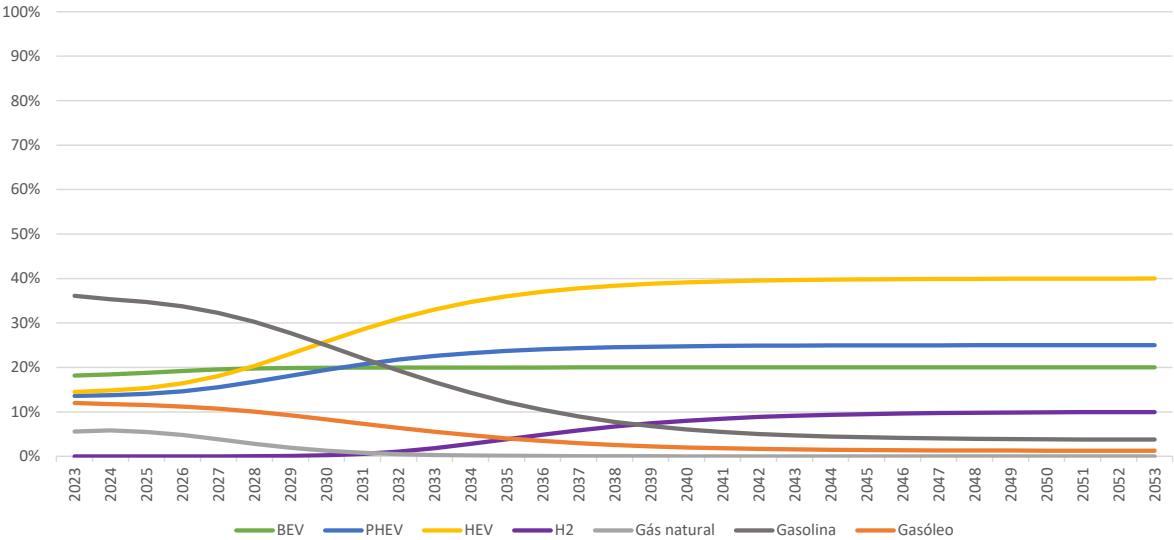


Figura 3.13 - Evolução da quota de mercado de ligeiros de passageiros, cenário 2.

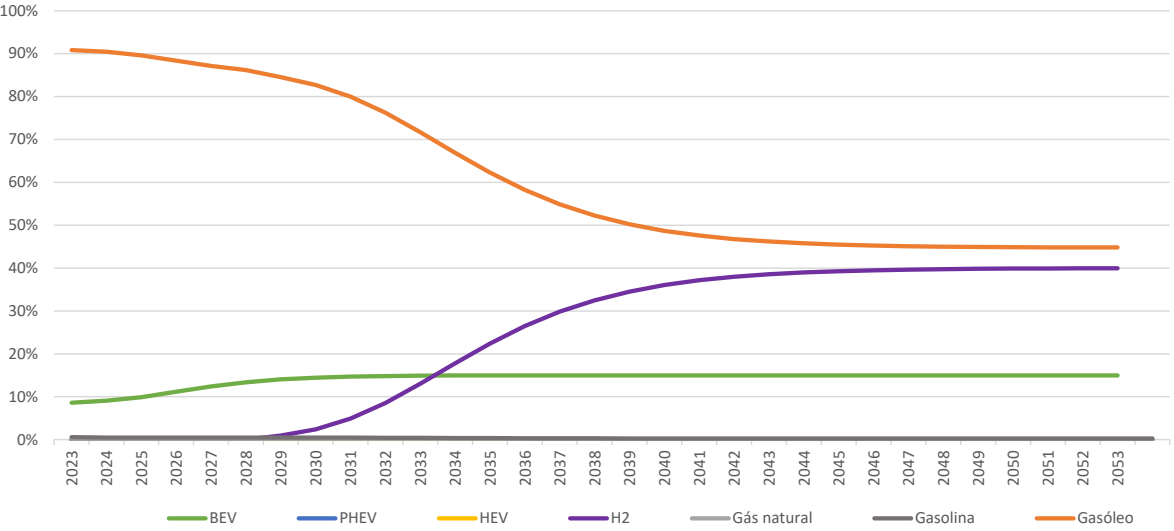


Figura 3.14 - Evolução da quota de mercado de ligeiros comerciais, cenário 2.

Vale a pena ainda referir que neste cenário não é feito nenhum esforço adicional para atingir o objetivo de eletricidade 100% renovável mais cedo que o previsto, pelo que, a produção de eletricidade apenas usando fontes de energia renováveis apenas é atingida em 2050.

3.4.3 Cenário 3: Substituição tecnológica e alteração de fonte energética

Definiu-se um outro cenário que se pode considerar como um ponto intermédio entre os dois definidos anteriormente. Os cenários anteriores baseiam-se em premissas de adoção de BEV (cenário 1) e biocombustíveis (cenário 2) que pela sua elevada taxa de crescimento, podem ser consideradas algo irrealistas.

Por este motivo, neste cenário apesar de continuar a existir uma aposta nos combustíveis sintéticos, estes só começam a ser introduzidos a partir de 2030 coincidindo com os planos atuais para o início da produção de hidrogénio, de acordo com o RNC2050 [54]. Até lá ocorre uma introdução de HVO como forma de substituir parcialmente o gasóleo fóssil, atingindo um nível de incorporação máximo de 35% em 2040. Uma das consequências desta entrada mais tardia dos combustíveis sintéticos é a impossibilidade de atingir o objetivo de eliminar completamente os combustíveis fósseis, sendo em que em 2050 a gasolina e o gasóleo fósseis ainda representam cerca de 24% e 17%, respetivamente. Nas Figura 3.15 e Figura 3.16 está ilustrada a evolução da mistura de gasolina e gasóleo, respetivamente.

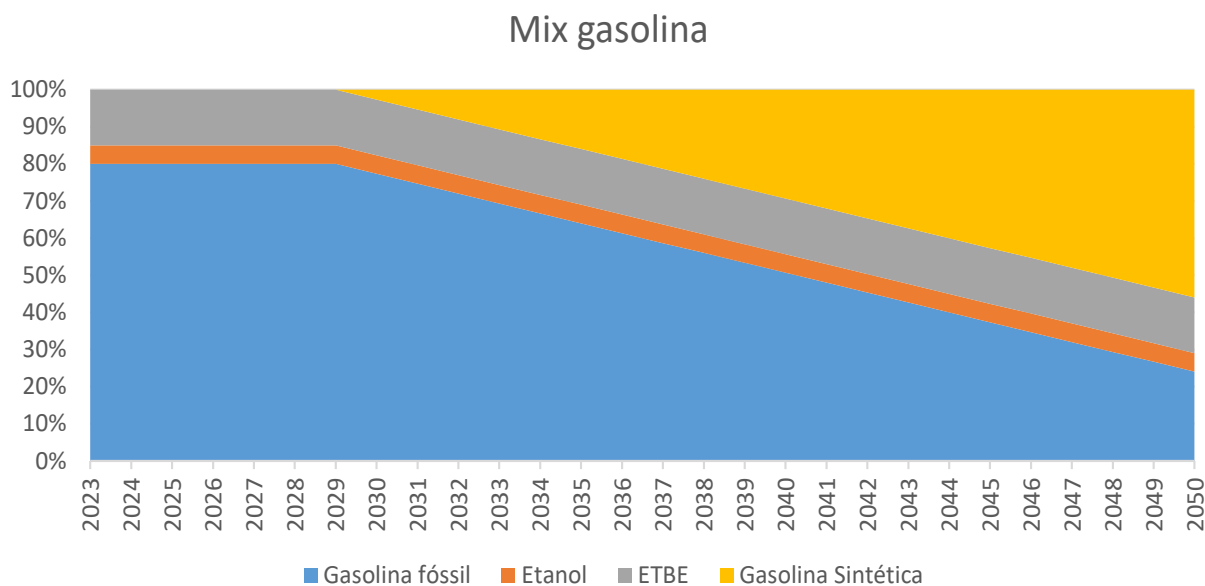


Figura 3.15 - evolução da constituição da mistura da gasolina, cenário 3.

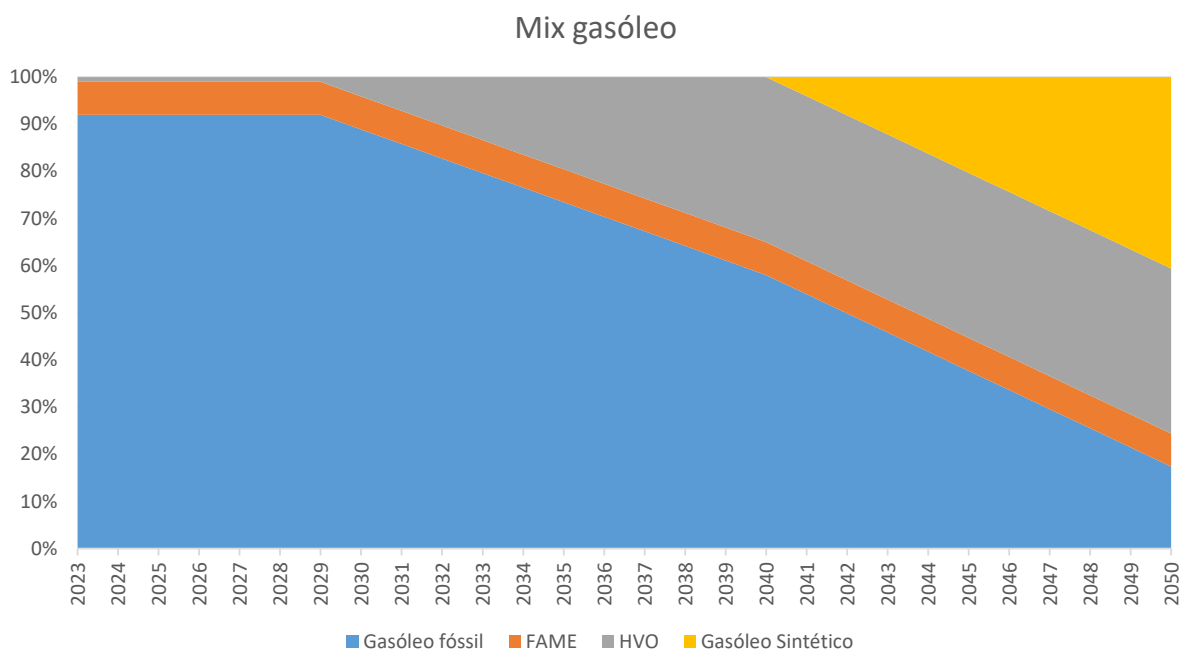


Figura 3.16 - evolução da constituição da mistura do gasóleo, cenário 3.

No que toca a vendas, a tendência de crescimento dos BEV mantém-se, especialmente até 2030, onde chegam a representar 40% das vendas. No entanto a falta de infraestruturas de carregamento e falha em reduzir o elevado preço de produção de baterias impedem que estes veículos atinjam uma quota de mercado superior a 45% em 2040. Para além disso, a introdução de combustíveis alternativos à gasolina e gasóleo fósseis a partir de 2030-2035, torna os veículos com motores a combustão, em particular os PHEV e os HEV, numa alternativa viável para atingir as metas de neutralidade carbónica, alcançando uma quota no mercado de ligeiros, em 2050, de 25% e 20% respetivamente. Isto na prática significa o fim dos ICEV convencionais em 2050, sendo os restantes 10% ocupados por FCEV, os quais começam a ser vendidos entre 2030 e 2035. Na Figura 3.17 está representada a evolução das vendas das várias tecnologias para veículos ligeiros de passageiros.

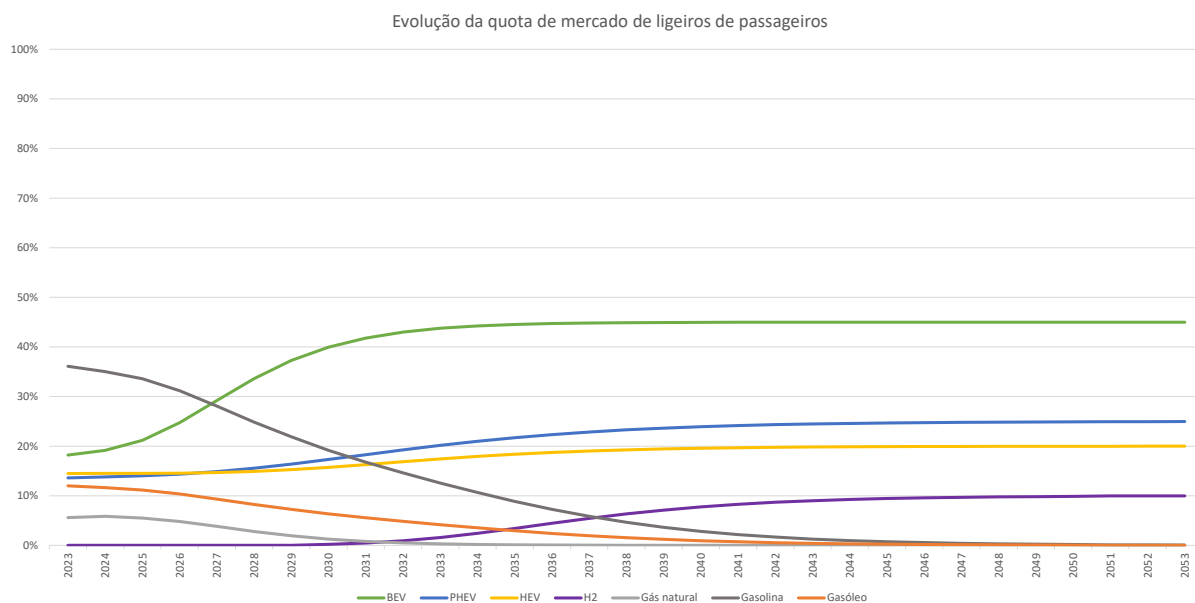


Figura 3.17 - Evolução da quota de mercado de ligeiros de passageiros, cenário 3.

Nos veículos comerciais, os ICEV a gasóleo continuam a ser a tecnologia mais vendida com uma quota de mercado de 50% em 2050. No entanto os outros 50% são substituídos por BEV (30%) e FCEV (20%). A trajetória desta substituição é semelhante à dos veículos ligeiros sendo os BEV a principal aposta até 2030-2035, período a partir do qual os veículos a hidrogénio, começam a ter um peso mais significativo nas vendas. Esta evolução das quotas de mercado de ligeiros comerciais está representada na Figura 3.18.

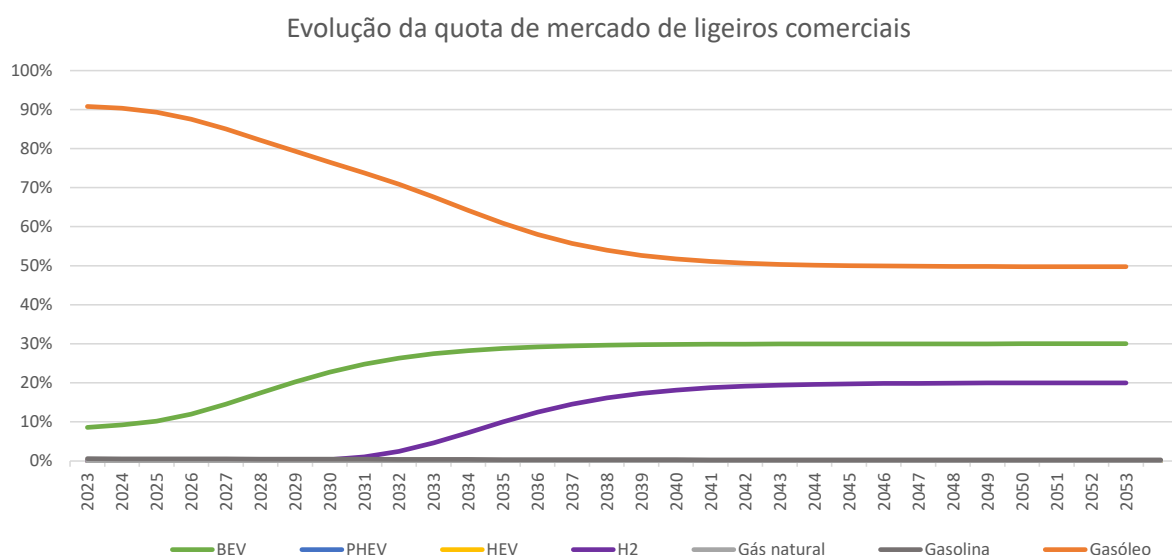


Figura 3.18 - Evolução da quota de mercado de ligeiros comerciais, cenário 3.

4 Resultados obtidos

Tendo definido os pressupostos de cada cenário, é então possível analisar os resultados obtidos.

4.1 Cenário 1: Substituição tecnológica e transição para eletrificação

Para um cenário onde os BEV representam cerca de mais de metade das vendas totais de veículos já a partir de 2030, será de esperar que o parque automóvel sofra uma grande alteração. Na Tabela 4.1 observa-se que este tipo de tecnologia passa a ser o principal constituinte tanto do parque de ligeiros de passageiros, como de comerciais.

Tabela 4.1 - Crescimento do número de BEV na frota nacional de ligeiros.

	2022	2030	2040	2050
Ligeiros Passageiros	1%	12%	49%	77%
Ligeiros comerciais	0%	12%	52%	74%

Para melhor ajudar a entender a evolução do parque nacional de ligeiros, as Figura 4.1 e Figura 4.2 ilustram a evolução da frota, quer ao nível de ligeiros de passageiros como de comerciais.

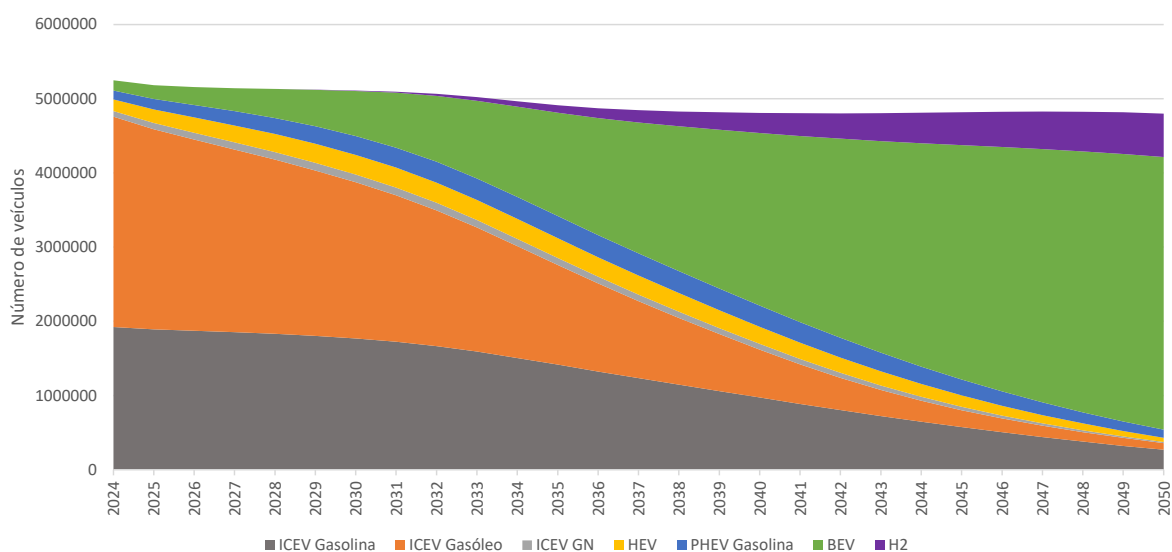


Figura 4.1 - Evolução do parque de automóveis ligeiros de passageiros, cenário 1.

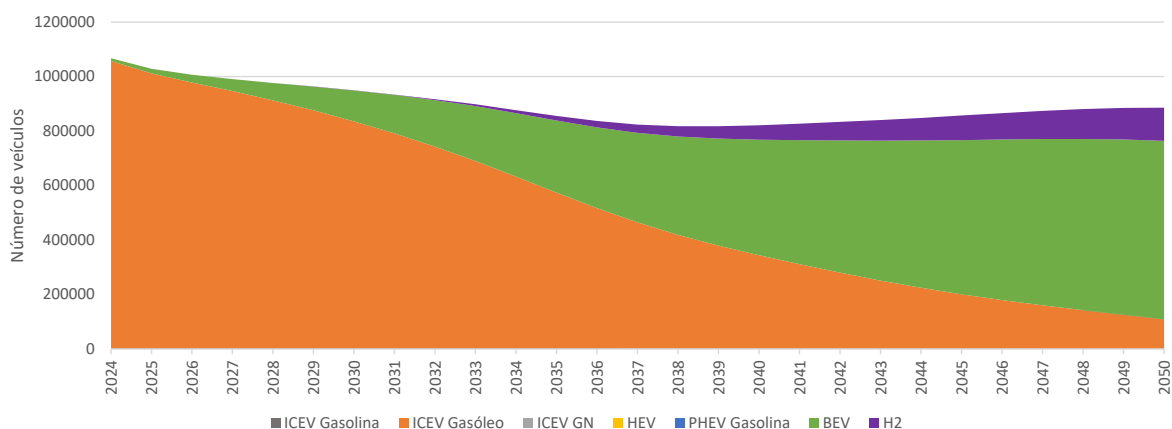


Figura 4.2 - Evolução do parque nacional de ligeiros comerciais, cenário 1.

O crescimento do número de BEV na frota é acompanhada pelo decaimento do número de veículos com motores a combustão, o que inclui não só os ICEV convencionais como os PHEV e HEV.

No caso dos veículos híbridos, estes atingem o pico de representação entre 2030 e 2040, onde constituem cerca de 11% da frota total de ligeiros de passageiros, sendo que a continua diminuição e sua eventual extinção faz com que, em 2050, representem os mesmos 3% que representavam em 2022. Já os ICEV começam a perder representatividade no parque rapidamente deixando de ser a tecnologia com mais representatividade já em 2040.

Esta transformação do parque tem um enorme impacto ao nível das emissões diretas (emissões *tank-to-wheel*). Com este tipo de evolução é possível diminuir as emissões de escape totais em 28% já em 2030 (face a 2022). Contudo é efetivamente a partir de 2030 que

realmente a entrada dos veículos elétricos ajuda a reduzir de forma exponencial as emissões de GEE atingindo uma redução de 93% em 2050. A Tabela 4.2 apresenta a evolução das emissões totais de CO₂ até 2050 e respetiva redução percentual face a 2022.

Tabela 4.2 - Evolução das emissões TTW de CO₂.

	2022	2030	2040	2050
Emissões de CO₂ (Mton)	13,5	9,9	4,1	0,9
Varição face a 2022	-	-26%	-70%	-93%

Apesar da diminuição nas emissões TTW associadas ao aumento de veículos sem emissões de escape, é ainda necessário considerar as emissões associadas à produção de energia elétrica. Já que a pegada carbónica dos FCEV (associada à produção de hidrogénio) e principalmente dos BEV depende muito da forma como é produzida a eletricidade.

Se o fator de emissão de produção elétrica atual (valor de 2023) se mantivesse até 2050 seria possível atingir uma diminuição total das emissões WTT de 50%, o que na prática resultaria numa redução de 82% nas emissões WTW. Este resultado ficaria aquém das metas definidas no RNC2050 onde o objetivo é assegurar a eletricidade renovável até 2050 (redução de 99% face a 2005). Por esse motivo, neste cenário considerou-se um panorama mais otimista, em que a eletricidade totalmente renovável é atingida em 2040. Esta mudança é responsável por uma diminuição de cerca de 90% nas emissões WTT e 93% nas emissões WTW em 2050 em relação aos níveis atuais, como se verifica na Tabela 4.3.

Apesar de não se alcançar o resultado de 98% de redução de GEE no setor dos transportes apresentado no RNC2050, já é possível cumprir o objetivo geral definido a nível europeu de reduzir as emissões de GEE em 90%.

Tabela 4.3 - Evolução das emissões líquidas WTW de CO₂, cenário 1.

	2022	2030	2040	2050
Emissões de CO₂ (Mton)	15,3	11,3	4,6	1,05
Varição face a 2022	-	-26%	-70%	-93%

Outro resultado relevante está relacionado com o nível de incorporação de energias renováveis, nomeadamente os objetivos definidos no PNEC onde se pretende uma quota de 23% de energia renovável no sector dos transportes em 2030.

Neste cenário, e mesmo com uma elevada adoção de BEV e rápida transição para eletricidade verde, esta meta só é atingida em 2035, sendo de cerca de 14% em 2030. Na Tabela 4.4 está representada a evolução da quota de energia renováveis nos transportes em conjunto com a percentagem de eletricidade produzida via fonte renovável.

Outro objetivo definido para o médio prazo é uma redução de 40% das emissões de GEE já em 2030, algo que também não é atingido pelo menos no grupo dos veículos ligeiros, alcançando estes uma redução das emissões WTW de apenas 22% em 2030 (Tabela 4.4).

Tabela 4.4 - Evolução da incorporação de energias renováveis, cenário 1

	2005	2022	2030	2040	2050
Incorporação de renováveis (%)	0%	10%	14%	38%	77%
Eletricidade renovável	28%	63%	83%	100%	100%

Apesar de existir uma redução das emissões TTW e WTW (como se constata nas Tabela 4.2 Tabela 4.3), o aumento das necessidades de energia elétrica leva a que as emissões WTT ainda aumentem até 2033, ano onde 88% da eletricidade já é produzida via energias renováveis (Figura 4.3).

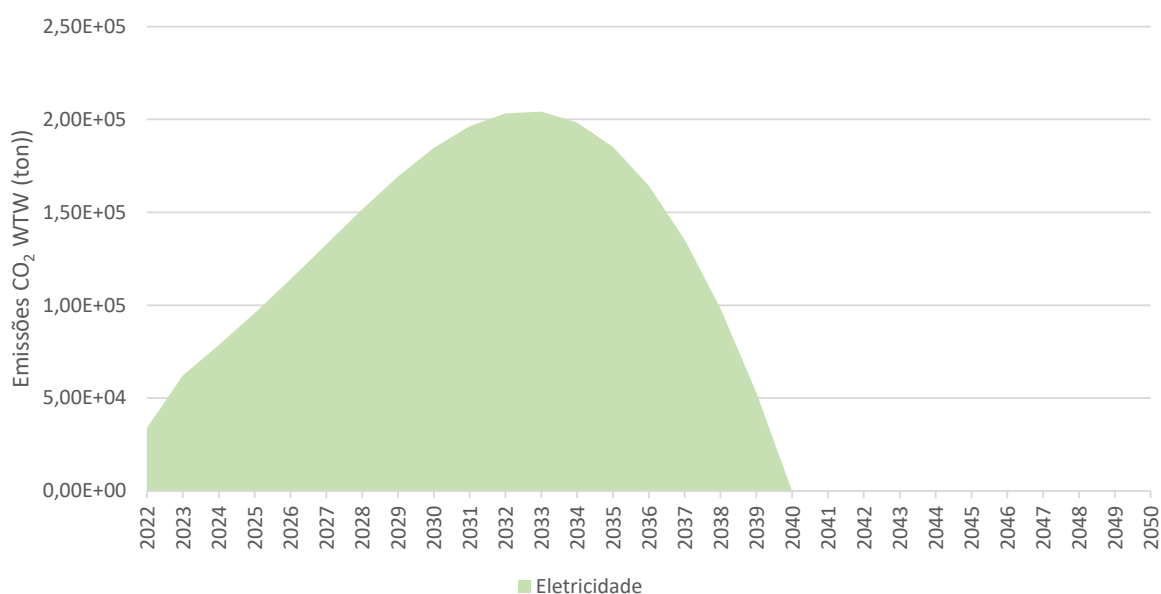


Figura 4.3 - Emissões WTT associadas à produção de eletricidade.

No que concerne ao consumo de energia, como seria de esperar, o aumento do número de veículos elétricos causa um aumento significativo na procura de eletricidade para veículos os

rodoviários ligeiros. Na Figura 4.4 verifica-se que o consumo de eletricidade aumentou de tal forma que em 2022 eram consumidos cerca de 707×10^6 MJ (17 kTep), menos de 1% da energia total consumida pelos veículos ligeiros e em 2050 estes já representam cerca de 58% (685 kTep) da energia final consumida. Nesta mesma figura (Figura 4.4) é ainda visível o aumento da representatividade do hidrogénio que em 2050 representa 16% da energia final consumida. No caso dos combustíveis fósseis existe uma diminuição progressiva de consumo. A maior variedade de tecnologias que utilizam gasolina, e o maior número atual de vendas de ICEV a gasolina comparativamente a ICEV a gasóleo, resulta num aumento ligeiro do consumo desta fonte energética que atinge um pico de 38% em 2035. A partir daí a predominância dos BEV resulta numa diminuição drástica dos combustíveis fósseis representado em 2050, 24% da energia final consumida (15% gasolina e 9% gasóleo).

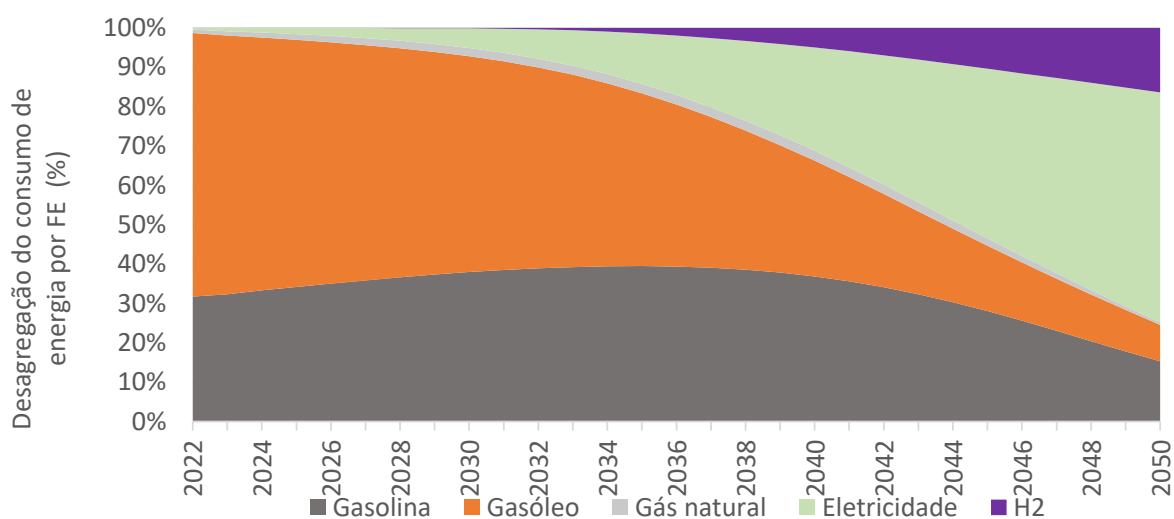


Figura 4.4 - Desagregação do consumo de energia por FE (%).

A Tabela 4.5 apresenta o consumo de energia total. Verifica-se que a maior eficiência dos BEV é a principal responsável pela diminuição progressiva do consumo energético, chegando a representar uma diminuição de 24% em 2030 e 71% em 2050, face ao ano base de 2022.

Tabela 4.5 - Variação da energia total consumida

	2022	2030	2040	2050
Energia total (kTep)	4216	3258	1869	1173
Variação face a 2022	-	-23%	-56%	-72%

No entanto vale a pena referir que apesar do consumo total do parque diminuir, o consumo de eletricidade aumenta significativamente. Como se constata na Figura 4.5, em 2030 serão consumidos 156 ktep de eletricidade, o que representa a necessidade de produzir 9 vezes mais energia elétrica só para abastecer veículos ligeiros. Este valor continua a crescer até 2050 onde atinge os 685 ktep cerca de 40 vezes mais eletricidade consumida por ligeiros veículos ligeiros que em 2022.

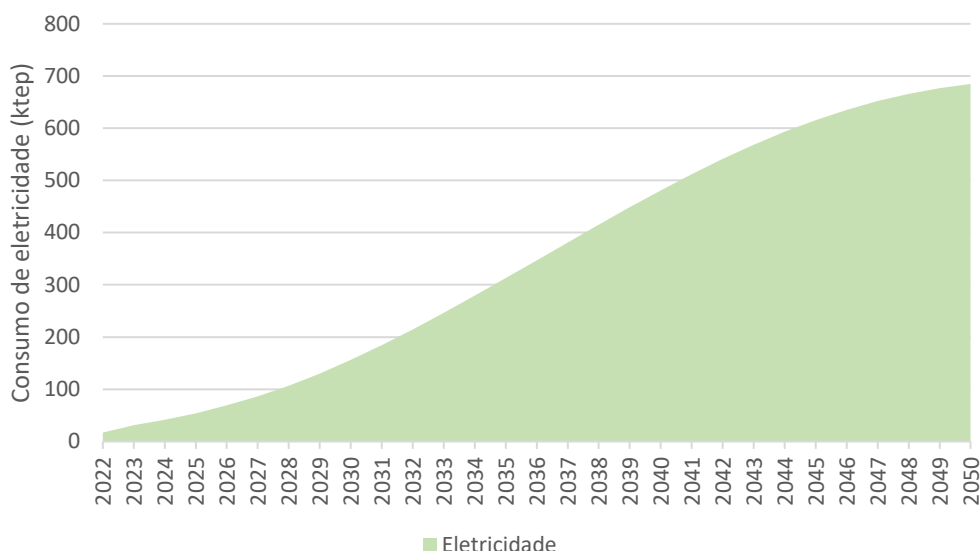


Figura 4.5 - Evolução do consumo de eletricidade, cenário 1

4.2 Cenário 2: Alteração de fonte energética (gasóleo e gasolina)

Neste cenário, a maior variedade de tecnologias resulta num parque automóvel mais diversificado. A introdução de combustíveis alternativos ao gasóleo e à gasolina ajudam a aumentar as vendas de veículos híbridos convencionais (HEV), o que torna este tipo de sistema de propulsão o maior constituinte da frota de ligeiros de passageiros, passando de uma representação de 2% em 2022 para 37% do parque em 2050. Os PHEV seguem uma tendência semelhante, sendo a segunda tecnologia mais relevante no parque de ligeiros (24%) em 2050. Os BEV atingem uma representação de 20% em 2050 sendo a terceira tecnologia mais predominante. Os restantes 20% estão divididos entre os FCEV (7%), tecnologia relativamente recente no mercado, e ICEV (13%) os quais a introdução de combustíveis biológicos e sintéticos reduz a necessidade de extinguir completamente esta tecnologia. Na Figura 4.6 está representada a evolução da frota ao longo tempo e até 2050.

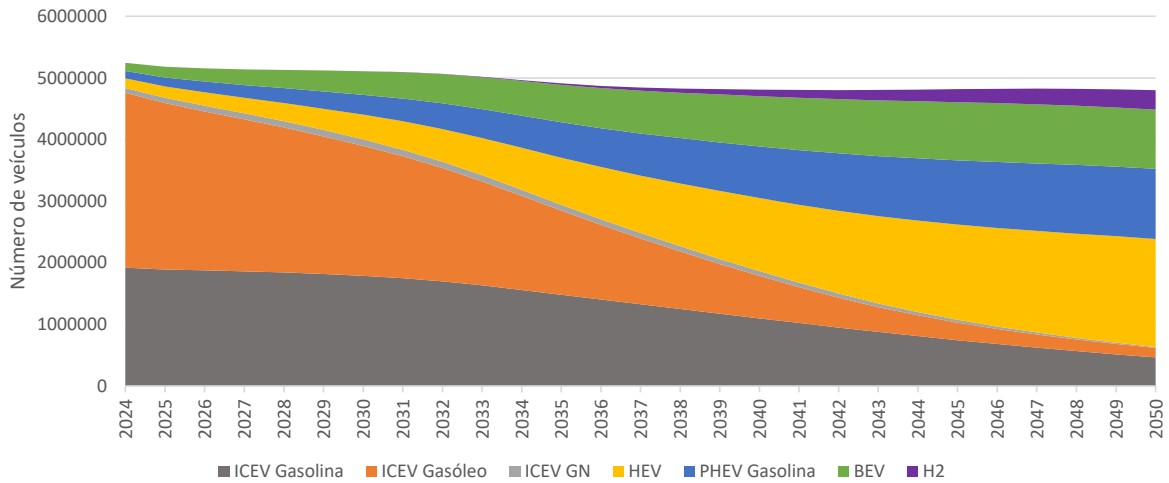


Figura 4.6 - Evolução do parque de automóveis ligeiros de passageiros, cenário 2

Na Figura 4.7 apresenta-se o número de veículos comerciais. Apesar existir uma certa aposta em BEV e principalmente em FCEV como alternativa, os ICEV a gasóleo continuam a ser a tecnologia mais popular representando em 2050 ainda cerca de 60% da frota de comerciais. A seguir a estes surgem os FCEV com 26% de representação e por fim os BEV com os restantes 15%.

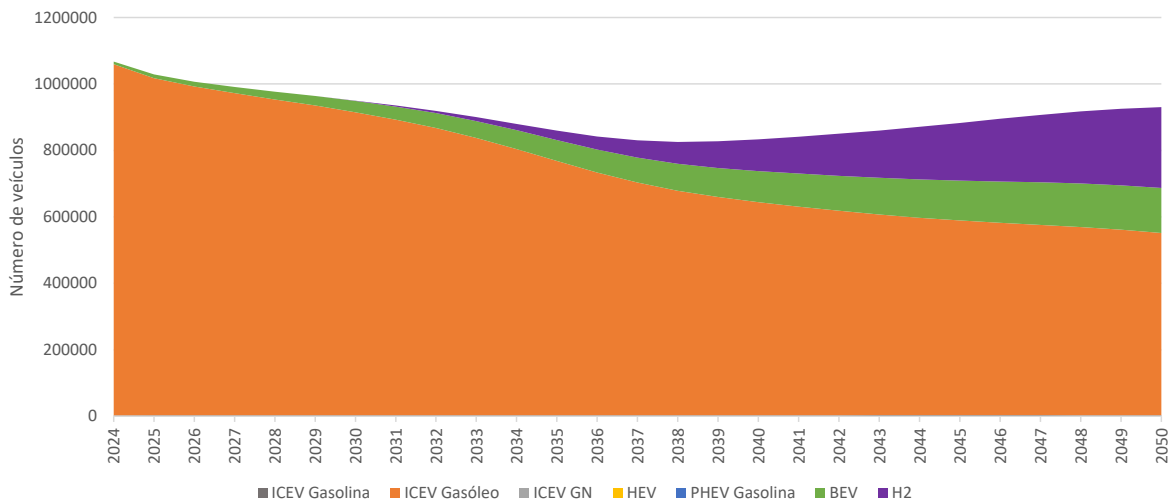


Figura 4.7 - Evolução do parque de automóveis ligeiros comerciais, cenário 2

A Tabela 4.6 apresenta as emissões TTW de CO₂. Mesmo utilizando combustíveis sintéticos, os produtos da combustão são equivalentes aos combustíveis fósseis. Aliado ao menor número de BEV na frota em comparação com o cenário 1, só é possível atingir uma redução das emissões de CO₂ de 26% em 2030 e 66% em 2050, ambos comparativamente ao valor base de 2022.

Tabela 4.6 - Evolução das emissões diretas TTW de CO₂, cenário 2.

	2022	2030	2040	2050
Emissões de CO₂ (Mton)	13,5	10,4	6,6	5,0
Varição face a 2022	-	-23%	-51%	-63%

Estes resultados parecem ficar muito aquém das metas tanto nacionais como europeias. No entanto, no caso das emissões associadas aos biocombustíveis e combustíveis sintéticos existe uma grande diferença entre as emissões líquidas e diretas. Sabendo que estes combustíveis sintéticos são produzidos com captura de CO₂, o dióxido de carbono emitido seria posteriormente utilizado para gerar mais combustível, pelo que no final a subtração entre o dióxido de carbono emitido e o capturado (emissões líquidas) seria praticamente nula, como se constata na Tabela 4.7

Tabela 4.7 - Evolução das emissões líquidas TTW de CO₂, cenário 2.

	2022	2030	2040	2050
Emissões líquidas de CO₂ (Mton)	11,9	7,0	1,2	0,02
Varição face a 2022	-	-42%	-90%	≈-100%

Ao comparar as Tabela 4.7 e Tabela 4.6, verifica-se a diferença entre as emissões líquidas e diretas varia entre 1,6 Mton em 2022 e 4,98 Mton em 2050. Os resultados da Tabela 4.7 demonstram também a possibilidade de atingir o objetivo da neutralidade carbónica. Este aspeto é bastante significativo, uma vez que no cenário 1 a neutralidade carbónica não era alcançada mesmo com uma transformação quase completa do parque para BEV.

A Tabela 4.8 apresenta as emissões totais WTW, verificando-se uma redução de 96% nas emissões de CO₂ em 2050. Apesar da eletricidade 100% renovável só ser atingida em 2050, o facto de esta estar a ser utilizada para a produção de combustíveis sintéticos, garante um fator de emissões associado à produção destes combustíveis bastante baixo (0,9 MJ/gCO₂), o que se traduz também numa pegada carbónica também relativamente baixa.

Tabela 4.8 - evolução das emissões WTW, cenário 2.

	2022	2030	2040	2050
Emissões de CO₂ (Mton)	15,3	9,3	2,1	0,4
Varição face a 2022	-	-39%	-86%	-97%

Neste cenário, a introdução rápida de combustíveis alternativos neutros em carbono oferece outra alternativa renovável no setor dos transportes para além da eletricidade. O facto de estes poderem ser implementados sem necessidade de uma mudança tecnológica radical, compensa a transição mais lenta para eletricidade 100% renovável e ajuda a alcançar os objetivos de incorporação de fontes de energia renovável definidos pelo PNEC (23% em 2030) já que em 2030, 32% da energia dos automóveis ligeiros é proveniente de fonte renovável. Esta evolução da quota de incorporação de energias renováveis está resumida na Tabela 4.9

Tabela 4.9 - Evolução da incorporação de energias renováveis, cenário 2.

	2005	2022	2030	2040	2050
Incorporação de renováveis (%)	0%	10%	32%	55%	96%
Eletricidade renovável	28%	63%	78%	89%	100%

Em termos de energia total neste cenário é alcançada uma diminuição da energia total consumida de 20% em 2030 e 50% em 2050 (Tabela 4.10).

Tabela 4.10 - Variação da energia total consumida, cenário 2.

	2022	2030	2040	2050
Energia total (kTep)	4080	3364	2446	2112
Varição face a 2022	-	-20%	-42%	-50%

A redução de energia final consumida demonstrada na Tabela 4.10 é resultado da substituição tecnológica por sistemas de propulsão mais eficientes, como BEV e HEV. À semelhança do cenário 1, a introdução de veículos com sistemas de propulsão que podem operar em modo 100% elétrico resultam num aumento da procura por eletricidade, especialmente até 2035. Também neste ano a gasolina sintética já representa mais de metade da mistura da gasolina e começa também a ser introduzido o gasóleo sintético, maioritariamente em veículos

comerciais. Este aumento do consumo de eletricidade consumida por veículos elétricos está representado na Figura 4.8 assim como a curva de variação anual do consumo de energia elétrica.

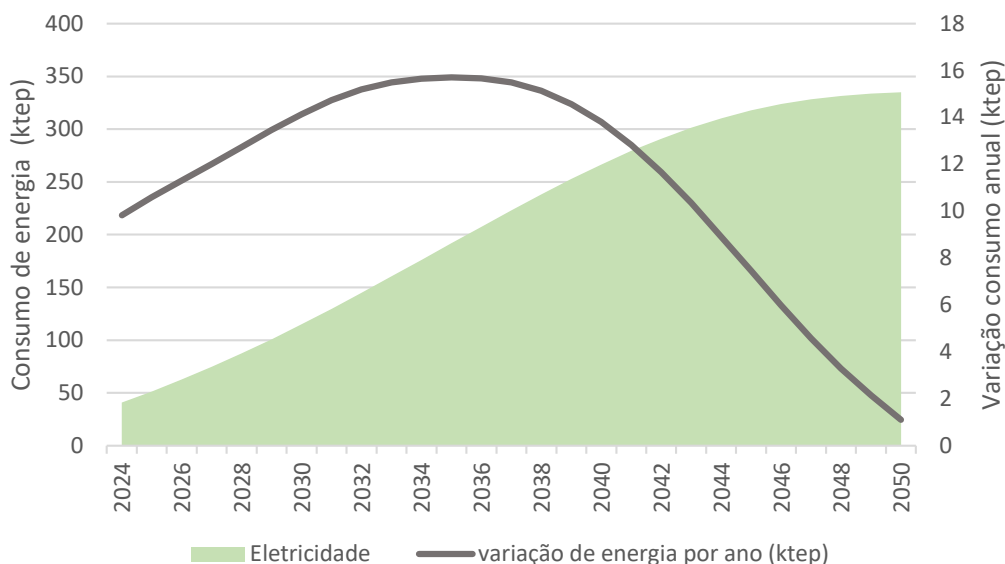


Figura 4.8 - Evolução do consumo de eletricidade, cenário 2.

Neste cenário é ainda importante analisar a evolução do consumo de biocombustíveis e combustíveis sintéticos. O consumo destes tipos de fonte energética sobe extremamente atingindo um pico de 1723 ktep em 2040, o que representa um crescimento de 262% em relação ao valor de 2022. No entanto, a análise gráfica da Figura 4.9 da variação de ano para ano permite identificar algumas particularidades em relação ao crescimento não linear do consumo destas fontes energéticas.

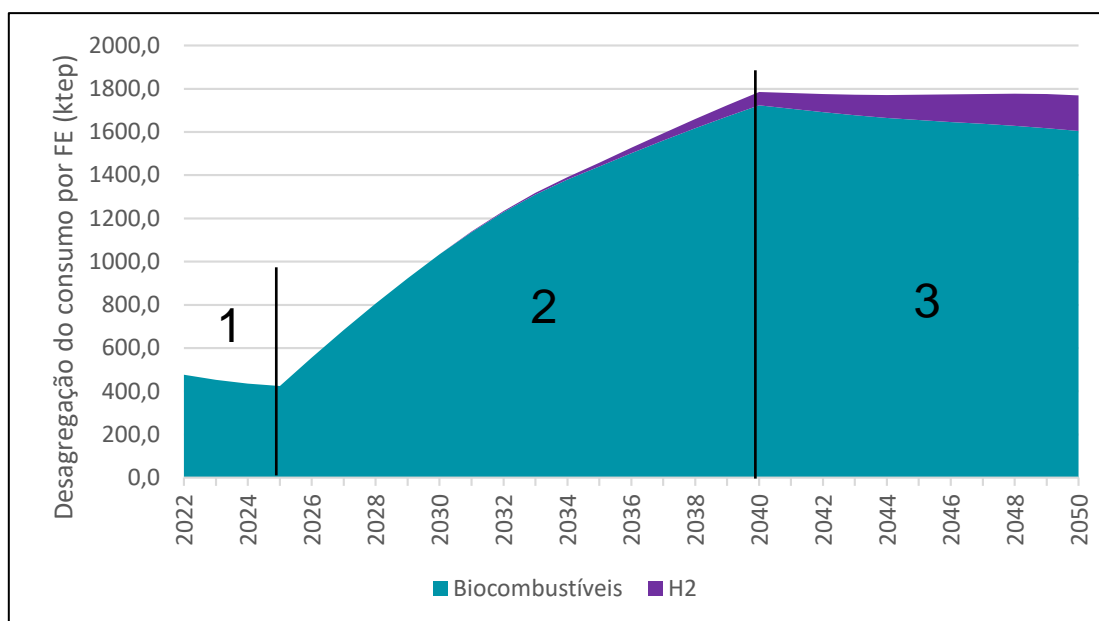


Figura 4.9 - Evolução do consumo de biocombustíveis/combustíveis sintéticos e hidrogênio, cenário 2.

A Figura 4.9, demonstra que a variação do consumo pode ser dividida em 3 fases específicas:

- **FASE 1**

Neste primeiro período, até 2025, não existe qualquer variação dos índices de incorporação de combustíveis alternativos. Adicionalmente, trata-se de um período em que os veículos a combustão se encontram a ser substituídos por BEV, resultando numa tendência negativa de consumo de biocombustíveis com uma diminuição de 11% face a 2022.

- **FASE 2**

A partir do momento em que os combustíveis sintéticos começam a ser introduzidos, a sua incorporação na mistura utilizada para os veículos ligeiros é acelerada e aumenta exponencialmente a sua contribuição para a energia total consumida passando de 424 ktep em 2025 para 1723 ktep em 2040 o que na prática representa um aumento de 262% face a 2022. O crescimento do consumo desta fonte energética acompanha o crescimento do número de veículos híbridos, que por esta altura passam a ser a principal opção para substituir ICEV convencionais.

- **FASE 3**

O ano 2040 representa o fim da gasolina fóssil, sendo por esta altura completamente substituída por gasolina sintética. A partir deste período, a incorporação da gasolina sintética mantém-se nos 80% definidos, abrandando o ritmo de crescimento do consumo total dos combustíveis sintéticos.

Vale a pena ainda referir que apesar de ser também a partir deste ano que começa a ser introduzido o gasóleo sintético, este é utilizado por uma parcela mais pequena do parque (28%), explicando-se assim o facto da estagnação da incorporação de gasolina sintética possuir um maior impacto no parque em geral (50% de veículos com motores de combustão são a gasolina).

Adicionalmente, a partir de 2035, surgem os FCEV, que surgem maioritariamente como opção para substituir ICEV a gasóleo comerciais. A redução do número de ICEV em circulação, acaba por reduzir também ligeiramente o consumo dos respetivos combustíveis associados. Na Tabela 4.11 e na Figura 4.9 é perceptível o efeito de transição de uma fonte energética para outra.

Tabela 4.11 - Comparação entre consumos de biocombustíveis e Hidrogénio, cenário 2.

	Consumo 2040	Consumo 2050	Varição (ktep)
Biocombustíveis (ktep)	1723	1604	-119
Hidrogénio (ktep)	63	166	103

Relativamente à energia total WTW, é importante referir que, nos resultados apresentados na Tabela 4.11 não é tida em conta a eletricidade necessária para produzir o hidrogénio via eletrólise. Este aspeto tem implicações neste cenário devido ao maior número de vendas de FCEV e também porque uma das premissas iniciais é a produção dos combustíveis sintéticos com recurso a hidrogénio verde. Isto significa que na verdade a energia elétrica total necessária produzir deverá ser superior à calculada. Esta situação será depois melhor estudada mais à frente no subcapítulo 4.4.

4.3 Cenário 3: Substituição tecnológica e alteração de fonte energética

Neste último cenário, é feito um esforço para atingir a neutralidade carbónica recorrendo tanto a combustíveis alternativos como pela substituição por veículos elétricos, embora de forma mais conservativa.

A Figura 4.10 apresenta a evolução global do parque de ligeiros de passageiros. À semelhança dos cenários anteriores, os FCEV começam a surgir a partir de 2030 com um nível de penetração baixo representando apenas 6% da frota em 2050. Os restantes 8%

representam veículos ICEV ainda continuam em circulação sendo que estes deixam de ser vendidos por volta de 2045.

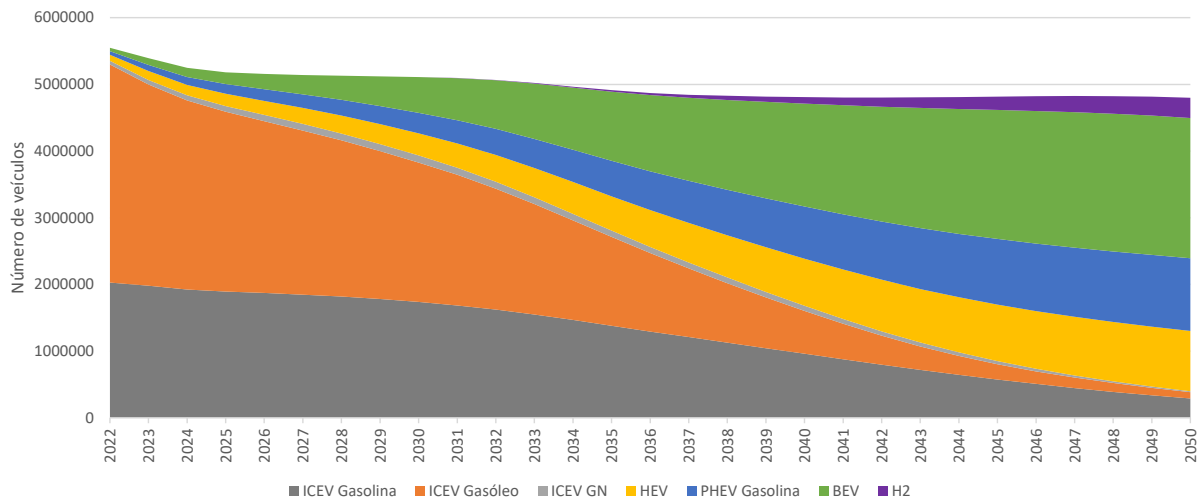


Figura 4.10 - Evolução do parque de automóveis ligeiros de passageiros, cenário 3.

Nos veículos comerciais o domínio do mercado por parte dos ICEV a gasóleo e o facto de estes representarem praticamente 100% da frota, torna-os na tecnologia mais representativa ainda em 2050 (60% da frota de comerciais), como se verifica na Figura 4.11.

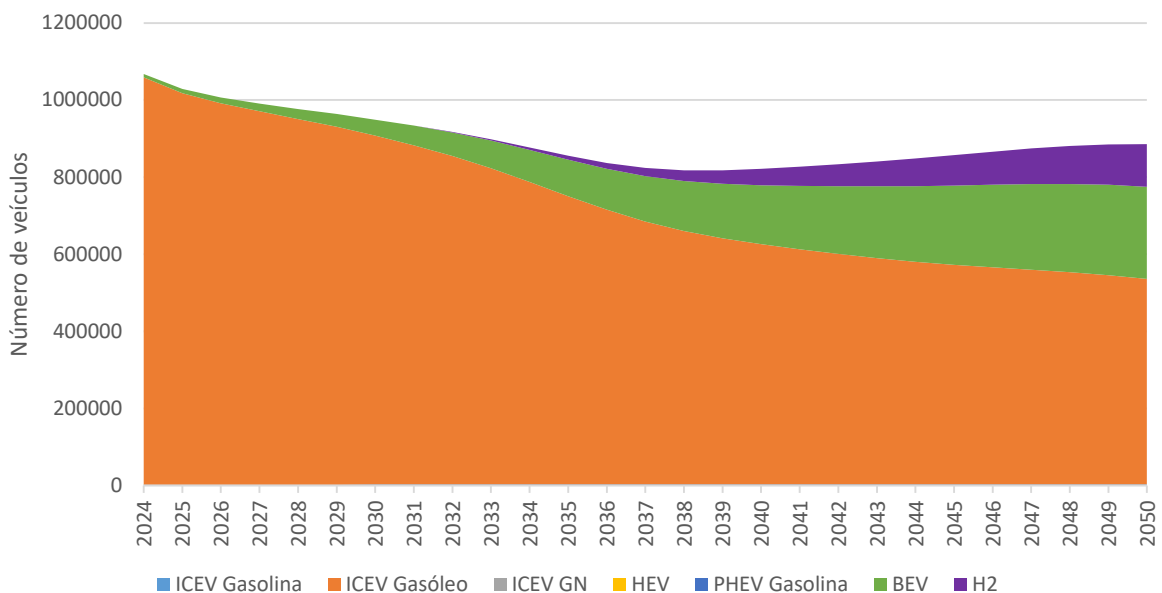


Figura 4.11 - Evolução do parque de automóveis ligeiros comerciais, cenário 3.

Em termos de veículos elétricos, os BEV são sem dúvida o tipo de tecnologia com o crescimento mais acelerado. Em 2030 estes representam cerca de 10% da frota total de ligeiros de passageiros, o que representa um aumento de aproximadamente 10 vezes

relativamente a 2022. O número de BEV continua a aumentar a um ritmo acelerado especialmente até 2040, altura a partir da qual atinge um ponto de estagnação nas vendas muito devido a introdução de combustíveis sintéticos.

Este ritmo de adoção de BEV torna-os no tipo de tecnologia de propulsão mais popular em 2050, representando cerca de 44% de todos os veículos ligeiros de passageiros em circulação.

Também nos veículos comerciais existe um aumento significativo de BEV atingindo um valor máximo de representação de 27% em 2050, algo que apesar de representar um crescimento de mais de 30 vezes em relação a 2022, continua muito aquém comparativamente à tecnologia mais popular para esta linha de automóveis, os ICEV a gasóleo.

A Tabela 4.12 representa o crescimento número de BEV na frota nacional de ligeiros de passageiros e ligeiros comerciais.

Tabela 4.12 - Crescimento do nº de BEV na frota nacional de ligeiros, cenário 3.

	2022	2030	2040	2050
Ligeiros Passageiros	1%	10%	32%	44%
Ligeiros comerciais	0%	4%	19%	27%

Com a introdução de biocombustíveis e combustíveis sintéticos a começar entre 2035 e 2040, os veículos com motores a combustão começam a tornar-se uma opção viável para atingir a neutralidade carbónica. Ainda assim os ICEV convencionais continuam a desaparecer gradualmente dando lugar a veículos com outras tecnologias mais eficientes que também incorporam o motor a combustão, como os HEV e PHEV, sendo que os PHEV acabam por ter uma representação um pouco superior aos HEV.

Apesar de atualmente existirem em circulação mais HEV (3% da frota de ligeiros de passageiros) do que PHEV (2% da frota de ligeiros de passageiros), o investimento inicial na infraestrutura elétrica torna os veículos eletricamente carregáveis numa opção mais viável para reduzir as emissões de GEE. Para além disso, os PHEV são capazes de beneficiar também com a introdução de combustíveis sintéticos a partir de 2035, o que torna esta tecnologia na segunda mais representada no parque nacional em 2050. Na Tabela 4.13 está resumida a evolução do crescimento do número de PHEV e HEV na frota nacional de ligeiros de passageiros

Tabela 4.13 - Crescimento do nº de PHEV e HEV na frota nacional de ligeiros de passageiros, cenário 3.

	2022	2030	2040	2050
PHEV	1%	6%	16%	23%
HEV	2%	7%	15%	19%

Nos veículos comerciais começam a aparecer tecnologias alternativas como os BEV e mais tarde os FCEV que em 2050 que atingem uma representação de 27% e 12%, respetivamente. A Tabela 4.14 resume a evolução até 2050 do número de BEV e FCEV na frota de ligeiros comerciais.

Tabela 4.14 - Crescimento do nº de FCEV e BEV na frota nacional de ligeiros comerciais, cenário 3.

	2022	2030	2040	2050
BEV	0%	4%	19%	27%
FCEV	0%	0%	5%	12%

Com esta transformação do parque e transição para tecnologias de propulsão mais eficientes é possível reduzir as emissões diretas TTW em 34% já em 2030 e 76% em 2050, como se verifica na Tabela 4.15.

Tabela 4.15 - Evolução das emissões diretas TTW de CO₂, cenário 3.

	2022	2030	2040	2050
Emissões de CO₂ (Mton)	13,5	10,2	5,8	3,6
Varição face a 2022	-	-24%	-57%	-73%

No entanto, para se perceber realmente a verdadeira ordem de grandeza da redução de CO₂ é necessário analisar as emissões líquidas, apresentadas na Tabela 4.16. A comparação entre as Tabela 4.15 e Tabela 4.16 demonstra que a diferença entre a emissões líquidas e diretas começa a aumentar com a introdução de combustíveis sintéticos, nomeadamente a partir de 2035.

Tabela 4.16 - Evolução das emissões líquidas TTW de CO₂, cenário 3.

	2022	2030	2040	2050
Emissões de CO₂ (Mton)	12,0	8,7	3,2	0,8
Varição face a 2022	-	-27%	-73%	-93%

Como já foi explicado anteriormente esta diferença entre emissões líquidas e diretas associadas aos combustíveis sintéticos surge por estes serem produzidos via CO₂ capturado da atmosfera em conjunto com hidrogénio produzido via eletricidade renovável. Apesar da eletricidade 100% renovável só é atingida em 2050 foi considerado que para produzir combustíveis sintéticos seria apenas usada eletricidade renovável. Com esta aposta na infraestrutura de eletricidade renovável é possível alcançar uma redução nas emissões totais WTW de 26% em 2030 e 91% em 2050, como se demonstra na Tabela 4.17.

Tabela 4.17 - evolução das emissões WTW, cenário 3.

	2022	2030	2040	2050
Emissões de CO₂ (Mton)	15,4	11,3	4,6	1,3
Varição face a 2022	-	-26%	-70%	-92%

Apesar destes resultados serem algo semelhantes aos obtidos no cenário 1, é importante salientar que neste cenário os combustíveis fósseis continuam a fazer parte da mistura de gasolina e gasóleo ainda 2050 com os níveis de incorporação apresentados na Tabela 4.18 Vale a pena salientar ainda que em 2050 cerca de 73% das emissões WTW de CO₂ são provenientes da produção e queima destes combustíveis (Figura 4.12).

Tabela 4.18 - percentagem de incorporação de gasolina e gasóleo fóssil nas respetivas misturas.

	2022	2030	2040	2050
Gasolina fóssil	80%	77%	51%	24%
Gasóleo fóssil	92%	89%	58%	17%

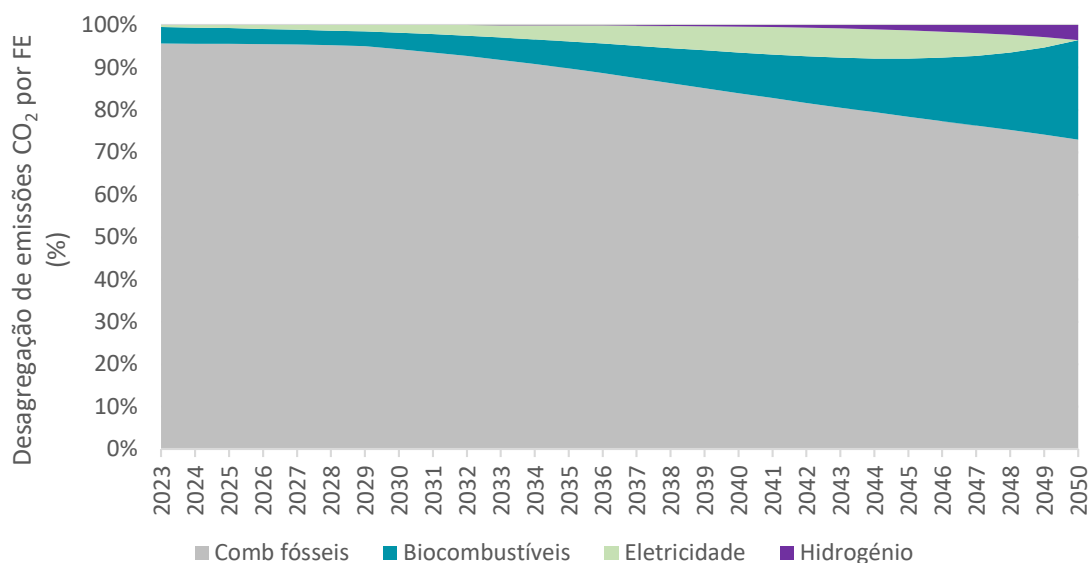


Figura 4.12 - Desagregação das emissões WTW por fonte energética, cenário 3.

A introdução tardia de combustíveis sintéticos aliada a uma adoção de veículos elétricos mais limitada, resulta no índice de incorporação de energias renováveis mais baixo entre os 3 cenários atingindo apenas os 15% em 2030. Este índice de incorporação representa apenas um aumento de 5% face à incorporação de energia renováveis nos veículos ligeiros de passageiros em 2022. Assim que os combustíveis sintéticos começam a ser incorporados nas misturas de gasolina e gasóleo (a partir de 2030), a taxa de incorporação de energia renovável começa a subir alcançando os 83% em 2050. Esta evolução da incorporação de energias renováveis está resumida na Tabela 4.19.

Tabela 4.19 - Evolução da incorporação de energias renováveis, cenário 3.

	2005	2022	2030	2040	2050
Incorporação de renováveis (%)	0%	10%	15%	50%	83%
Eletricidade renovável	28%	63%	78%	89%	100%

No que toca à energia consumida, o foco na mobilidade elétrica especialmente até 2030/2035 gera um aumento de quase 7 vezes na procura por eletricidade no setor dos transportes já em 2030 (Figura 4.13). A partir deste período os biocombustíveis e os combustíveis sintéticos passam a ter um papel mais ativo no processo de descarbonização, passando as tecnologias híbridas a representar parte integral na diminuição da energia total consumida.

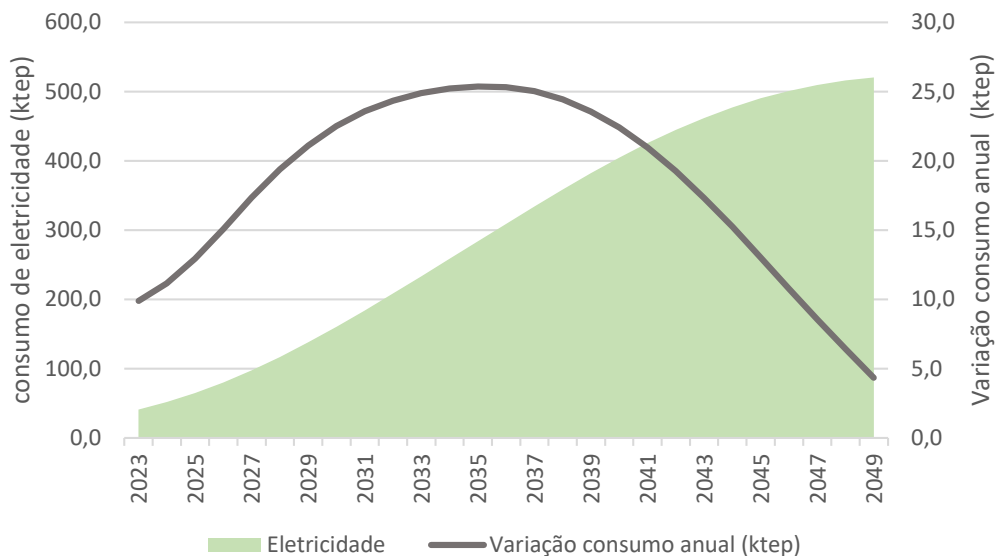


Figura 4.13 - Evolução do consumo de eletricidade, cenário 3.

A Figura 4.14 apresenta a evolução dos combustíveis sintéticos, revelando-se algo semelhante à apresentada no cenário 2. No entanto neste cenário não é possível identificar a “FASE 3” definida no cenário anterior. Isto porque os níveis de incorporação estão em constante crescimento até 2050, embora a um nível mais lento. Adicionalmente, este crescimento contínuo também se deve à abordagem mais conservativa em relação à entrada dos veículos a hidrogénio, opção que iria substituir maioritariamente veículos com motores a combustão e em particular comerciais a diesel.

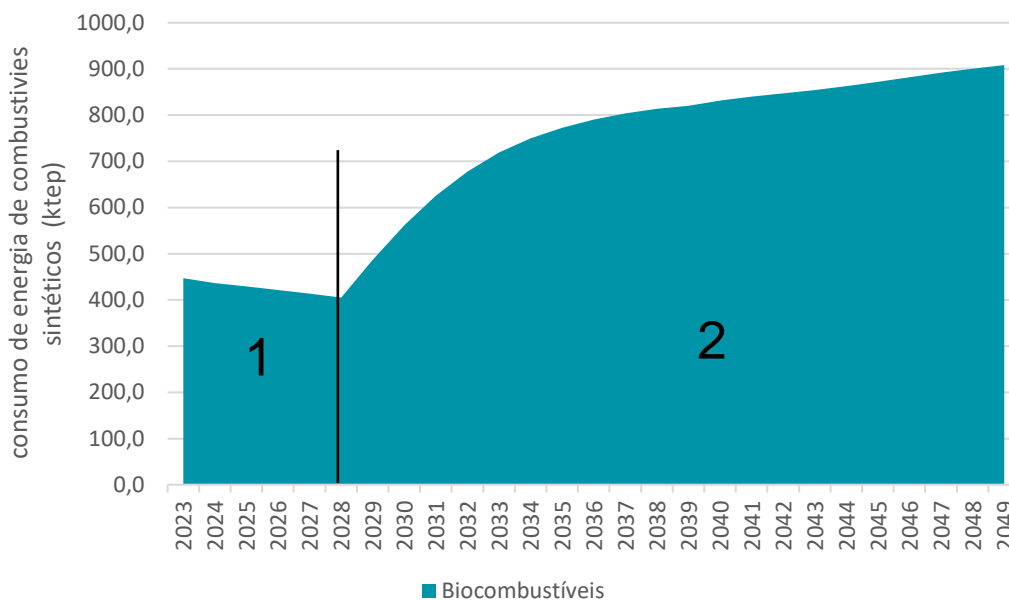


Figura 4.14 - Consumo energético associado a biocombustíveis, cenário 3.

Mesmo com o aumento de energia final associada aos biocombustíveis ilustrado na Figura 4.14, a energia total consumida acaba por diminuir ao longo dos anos. Isto acontece já que o aumento do consumo de combustíveis alternativos à gasolina e gasóleo fósseis está relacionado com a redução na utilização de combustíveis fósseis. No final a diminuição do consumo resultante da queima de combustíveis fósseis e a transição para tecnologias mais eficientes resulta numa diminuição progressiva da energia total consumida, tal como se verifica na Tabela 4.20.

Tabela 4.20 - Variação da energia total consumida, cenário 3.

	2022	2030	2040	2050
Energia total (kTep)	4216	3332	2227	1802
Variação face a 2022	-	-21%	-46%	-57%

Contudo, e ao contrário dos cenários anteriores, mesmo em 2050, os combustíveis fósseis continuam a ter uma representação algo significativa correspondendo a 254 tep, cerca de 14% da energia total consumida em 2050. A restante energia final está dividida maioritariamente entre biocombustíveis (50%) e eletricidade (29%) com o hidrogénio a representar a fração mais pequena de energia consumida (7%). Na Figura 4.15 estão ilustrados estes resultados bem como a evolução ao longo do tempo do consumo energético desagregado por fonte energética.

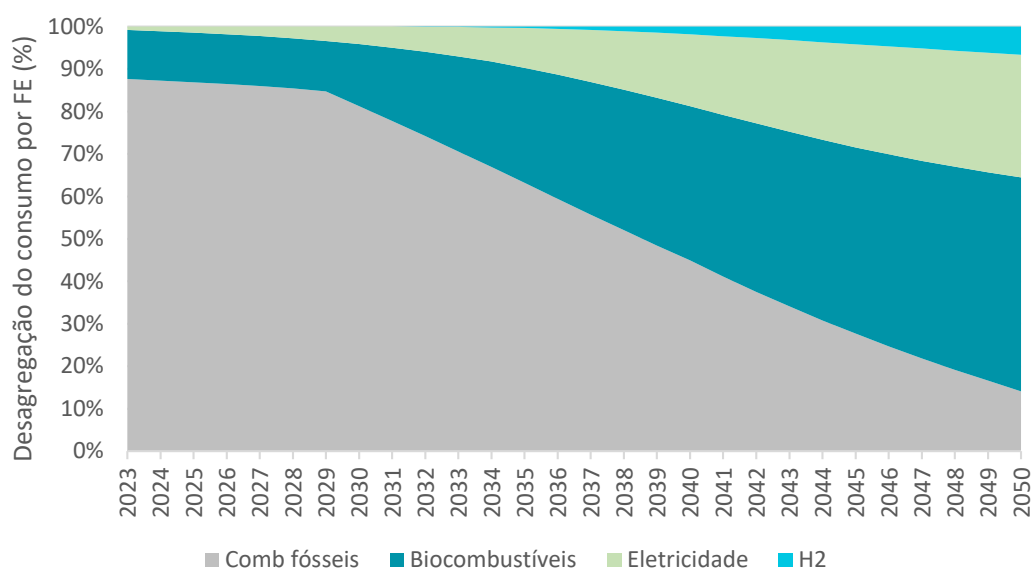


Figura 4.15 - Desagregação do consumo energético por fonte energética.

4.4 Discussão das soluções adotadas

Tendo os principais resultados dos cenários apresentados, apresenta-se a comparação entre eles. Começando pelas emissões, salienta-se que em todos os cenários é alcançada uma redução acima dos 90% das emissões WTW de CO₂, algo que está alinhado com as metas de redução de 85-90% das emissões de GEE definidas no RNC2050. A Figura 4.16 ilustra a evolução das emissões WTW de CO₂ ao longo do tempo para os cenários projetados. Nessa mesma figura estão ainda marcados alguns pontos correspondentes a metas gerais de redução de emissões apresentadas na última revisão do PNEC. Seguidamente à Figura 4.16 são apresentadas na Tabela 4.21 as reduções percentuais em anos chave para cada cenário.

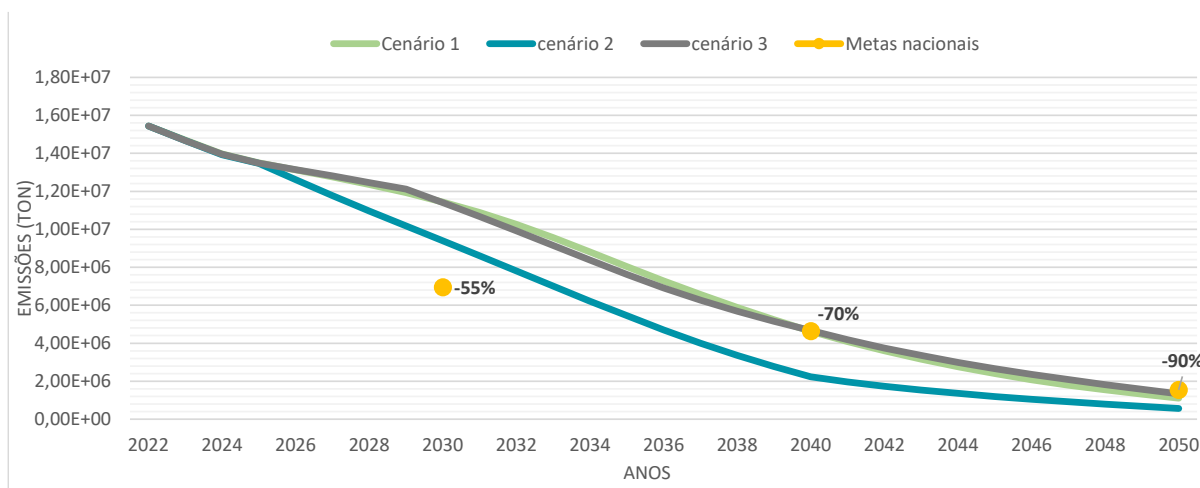


Figura 4.16 - Evolução das emissões WTW de CO₂ nos 3 cenários.

Tabela 4.21 - Comparação da variação das emissões WTW de CO₂.

	2030	2040	2050
Cenário 1	-26%	-70%	-93%
Cenário 2	-39%	-86%	-96%
Cenário 3	-26%	-70%	-91%

Como é possível verificar, a maior redução é alcançada no cenário 2 onde os combustíveis sintéticos têm um papel fundamental. Esta redução mais acentuada, especialmente quando comparada com a redução atingida no cenário 1, é algo que resulta das diferentes abordagens adotadas em cada cenário.

No caso do cenário 2, recorrendo-se à substituição direta de combustíveis fósseis por combustíveis sintéticos, torna-se possível reduzir as emissões líquidas de CO₂, sem ser primeiro necessário uma alteração radical no parque. A introdução relativamente antecipada de biocombustíveis e combustíveis sintéticos (por volta de 2025) permite que veículos ICEV em circulação, que representam cerca de 95% da frota, comecem rapidamente a conseguir beneficiar dos fatores de redução associados a estes combustíveis. Este fenómeno é visível no período entre 2022 e 2030.

Já quando se recorre única e exclusivamente à substituição tecnológica para atingir os objetivos, como é o caso do cenário 1, repara-se na maior dificuldade em atingir objetivos a médio prazo. A transição para mobilidade 100% elétrica requer uma alteração drástica do parque automóvel nacional com uma taxa de substituição de ICEV por BEV muito acentuada. Neste cenário, mesmo considerando um aumento percentual médio de 5% ao ano na quota de mercado de BEV entre 2022 e 2035, estes apenas representam cerca de 25% da frota total de ligeiros em 2035.

Considerando as curvas de sobrevivência dos veículos atuais e visto que a redução de emissões de CO₂ neste cenário está diretamente ligada à introdução de BEV, constata-se que a alteração da fonte energética permite atingir melhores resultados especialmente a curto/médio prazo.

No entanto é necessário ter em conta que as taxas de incorporação de biocombustíveis e combustíveis sintéticos são extremamente elevadas quando comparadas com os dados históricos, requerendo por isso um elevado investimento para tornar tal crescimento viável.

Por outro lado, através dos resultados obtidos, verifica-se que uma abordagem mais moderada permite alcançar resultados muito semelhantes. No cenário 3 o ritmo de crescimento do BEV é cerca de metade do ritmo do cenário 1. Em termos de combustíveis sintéticos, existe também uma aposta sendo que mais moderada comparativamente ao cenário 2. Outra diferença deste cenário para os restantes é que os combustíveis fósseis continuam em utilização para além de 2050 ainda que em taxa reduzidas. Ainda assim, são obtidos resultados muito semelhantes ao cenário 1, o que sugere que uma abordagem mais conservadora com uma utilização de combustíveis sintéticos em conjunto com a transição para mobilidade elétrica, poderá também ser uma solução para atingir as metas definidas.

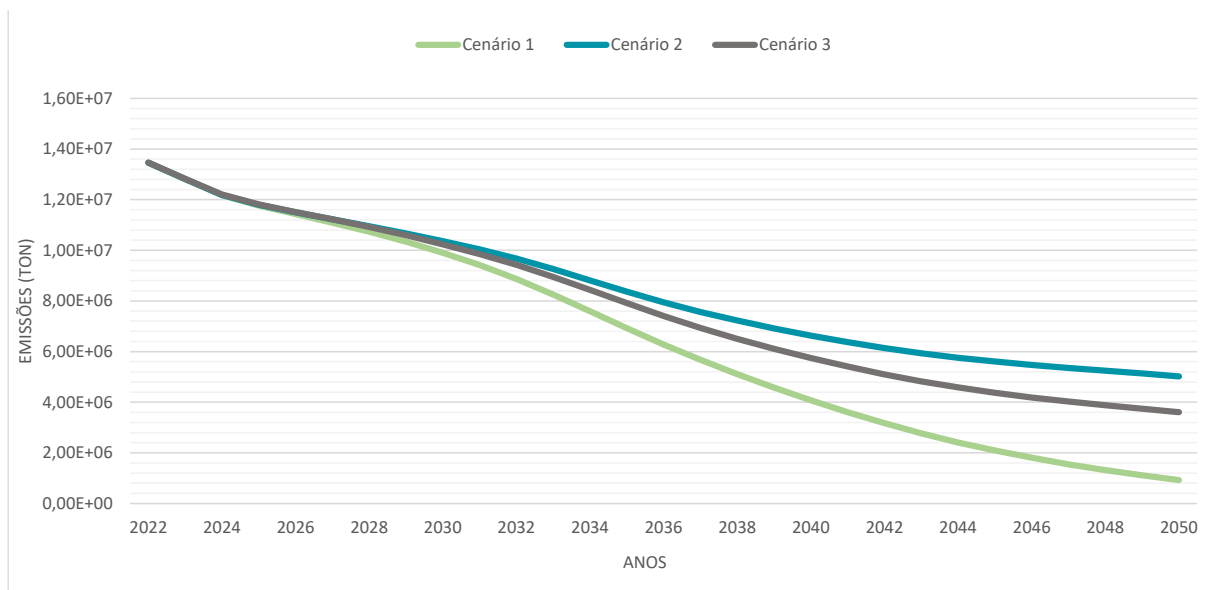


Figura 4.17 - Evolução das emissões diretas TTW de CO₂ nos 3 cenários.

Como se verifica na Figura 4.17, numa situação onde a prioridade é reduzir as emissões de CO₂ ao nível das emissões de escape, os veículos elétricos BEV e FCEV apresentam uma grande vantagem já que não têm qualquer tipo de emissões de escape. No caso dos veículos com motores a combustão e visto que os combustíveis sintéticos partilham as mesmas propriedades químicas da gasolina e do gasóleo convencionais estes ainda libertam gases tóxicos para atmosfera quando queimados. Convém referir que para além do objetivo de reduzir o aquecimento global, estas metas de redução de emissão de CO₂ e outros gases nocivos têm também como objetivo melhorar a qualidade do ar principalmente nas grandes cidades.

Ainda assim na Figura 4.18 estão apresentadas as emissões líquidas TTW sendo que neste caso os cenários 2 e 3 apresentam reduções de CO₂ são bastantes superiores.

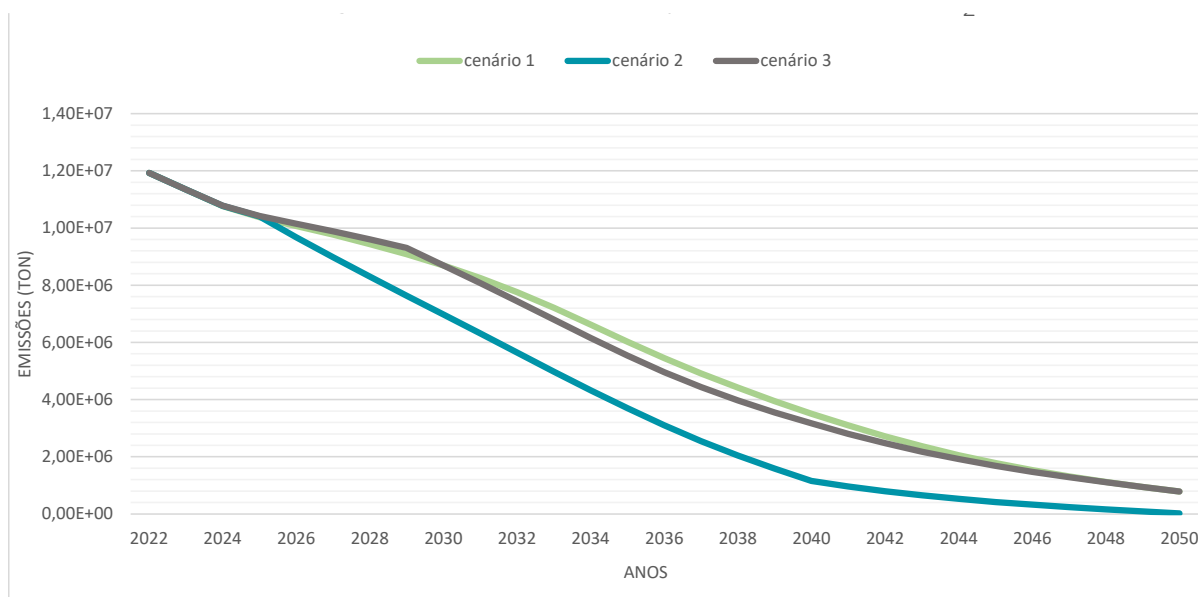


Figura 4.18 - Evolução das emissões líquidas TTW de CO₂ nos 3 cenários.

Quando se comparam os resultados da Figura 4.18 com as metas estabelecidas tanto no PNEC2030 como no RNC 2050 é importante ressaltar que os objetivos definidos se aplicam para a totalidade do setor dos transportes, o que inclui grupos como veículos pesados, transporte ferroviário e aviação. Para obter um valor mais realista de emissões apenas para os veículos ligeiros, recorreu-se a um documento da EEA (*European Environment Agency*) [74], no qual é discriminada a contribuição de cada um dos meios de transporte, percebendo-se a extrema importância que o setor rodoviário tem para atingir as metas definidas uma vez que representa mais de 70% das emissões totais do setor. Dentro destes 70% e segundo estes mesmo documento, os veículos ligeiros são responsáveis por cerca de 50% a 55% das emissões totais de CO₂ na EU [74].

Considerando então que 52% das emissões de CO₂ do setor dos transportes são provenientes de veículos ligeiros e aplicando essa percentagem aos 19,59 Mton CO_{2q} eq emitidos pelo setor em 2005 ([54]), conclui-se que os veículos ligeiros eram responsáveis por 10,2 Mton CO_{2q} eq. Comparando este resultado com o valor de 2022, é o facto de, percebe-se emissões totais serem maiores que em 2005. Ora este fenómeno pode ser explicado pelo aumento do nº de veículos nos últimos anos sendo a maior parte deles veículos a combustão [75].

Considerando que a contribuição dos veículos ligeiros para as emissões de CO₂ se mantém à volta dos 52% até 2050 é então possível comparar os objetivos definidos no RNC2050 com os resultados obtidos nestes 3 cenários. A Tabela 4.22 resume as emissões de CO₂ calculadas ao longo tempo para os cenários definidos e as emissões projetadas no RNC2050.

Tabela 4.22 – Emissões de CO₂ em Mton CO₂ eq .

	2030	2040	2050
RNC2050	5,81	1,66	0,24
Cenário 1	8,70	3,51	0,78
Cenário 2	6,97	1,15	0,22
Cenário 3	8,70	3,17	0,79

Através dos resultados da Tabela 4.22 é possível confirmar a hipótese já colocada anteriormente de que os objetivos definidos para 2030 serão difíceis de alcançar especialmente numa situação em que a mobilidade elétrica é a única solução para alcançar a neutralidade carbónica.

O cenário 1 adota premissas algo semelhantes às utilizadas no RNC, com a mobilidade elétrica a ser o principal agente responsável pela diminuição das emissões de GEE nos transportes em geral. A diferença na emissão de CO₂ que se verifica entre ambos deve-se principalmente aos marcos definidos para a integração da mobilidade elétrica no Roteiro para Neutralidade Carbónica, os quais após comparar com a evolução das vendas estimada neste trabalho, serão difíceis de alcançar. Este primeiro marco diz respeito ao número de veículos elétricos em circulação, no RNC é previsto que a mobilidade elétrica represente cerca de 36% de todos os veículos ligeiros de passageiros, atingindo os 100% já em 2050.

Quando se compara estas metas ambiciosas com os resultados do cenário 1, torna-se difícil de acreditar que tal transformação seja viável. Segundo os resultados obtidos, mesmo com uma taxa de crescimento de vendas a atingir os 52% em 2030 e 85% em 2050, o número total de BEV no parque nacional é de apenas 12% em 2030 e 77% em 2050. Tal mudança iria implicar um aumento extraordinário do número de veículos vendidos anualmente especialmente nesta próxima década sendo que quase 100% destes seriam BEV.

Para além disso um dos principais impedimentos para a transformação do parque é a curva de sobrevivência dos veículos existentes. Uma das formas de acelerar a transição de modo de mobilidade seria através de algum tipo de incentivo ao abate de veículos ICEV mais velhos e substituição por novos elétricos. No entanto a média de idade de 14 anos mostra que quer seja por impossibilidade financeira quer seja outro por motivo, existe uma dificuldade em trocar de automóvel com frequência.

Nos veículos comerciais passa-se uma situação semelhante, onde o RNC prevê que em 2030 a transição para a mobilidade elétrica assegure a totalidade da procura para veículos ligeiros de mercadorias. Considerando o domínio atual das vendas por parte dos ICEV a gás e a média de idade ainda maior que nos veículos de passageiros é extremamente improvável que

já em pouco mais de 5 anos os veículos a gasóleo deixem de ser opção, especialmente sem nenhum tipo de incentivo ao abate.

Antes de avançar para os resultados a nível de consumos energéticos, é importante ressaltar que visto que os objetivos nacionais estão definidos ao nível do setor dos transportes como um todo, o facto de estas não serem atingidas ao nível dos veículos ligeiros não significa que a meta seja impossível de atingir com reduções noutros modos de transporte. No entanto o transporte rodoviário é extremamente importante para atingir as metas definidas já que representa mais de 70% das emissões totais do setor sendo os veículos ligeiros responsáveis por metade (55% em 2020) [66].

Devido à diferente constituição do parque resultante de cada cenário, também em termos de energia final, é possível verificar algumas diferenças nos resultados obtidos, como se constata na Figura 4.19. Esta análise é importante principalmente para avaliar o investimento necessário ao nível das infraestruturas de produção e transformação de energia primária em energia final.

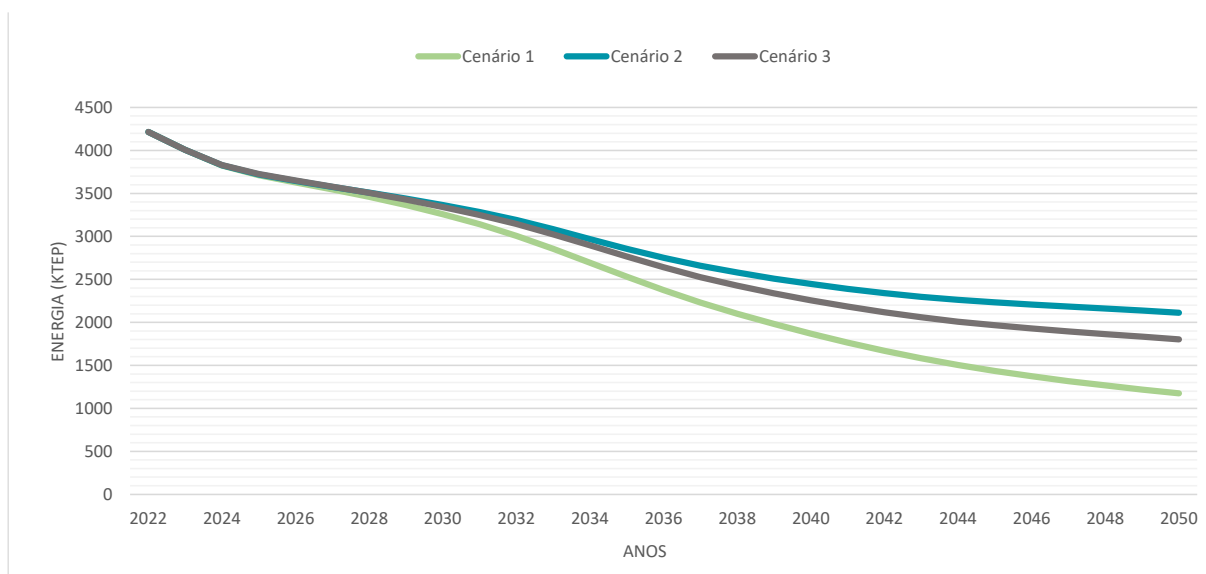


Figura 4.19 - Consumo de energia final nos 3 cenários.

A maior eficiência de tecnologias de propulsão mais recentes e a gradual extinção de veículos ICEV, resulta numa diminuição da energia total final consumida nos 3 cenários apresentados. No entanto, no que toca a eficiência, os BEV são sem dúvida o sistema mais eficiente gastando cerca de 3,8 menos energia por quilometro do que ICEV convencionais e cerca de 2 vezes menos em comparação com tecnologias híbridas (capítulo 3.2). É por este motivo que o cenário que apresenta uma maior diminuição da energia final é o cenário onde os BEV possuem uma presença mais preponderante na frota de ligeiros.

Ao tentar comparar estes resultados com os apresentados nos roteiros nacionais surge um problema semelhante ao que foi referido na comparação de emissões. Os dados apresentados no RNC2050 relativamente à energia final consumida estão definidos por fonte energética e não por setor específico. Para algumas fontes energéticas como a gasolina a comparação é mais simples, já que esta é usada quase exclusivamente em automóveis ligeiros com uma fração muito pequena utilizada em motociclos. A Tabela 4.23 demonstra a evolução do consumo de gasolina fóssil tanto nos cenários construídos como nas projeções do RNC2050.

Tabela 4.23 - Evolução do consumo de gasolina fóssil, em ktep.

	2020/2022	2030	2040	2050
RNC2050	1157 (em 2020)	1108	205	0
Cenário 1	1035 (em 2022)	947	540	144
Cenário 2	1035 (em 2022)	673	0	0
Cenário 3	1035 (em 2022)	929	479	165

É importante referir que o ano base utilizado nos cálculos foi 2022, sendo que no RNC o ano mais próximo 2020. Na verdade, uma diferença de 2 anos não deveria resultar em grandes diferenças no que toca a energia consumida. Mesmo assim, outra forma de validar o resultado obtido para 2022 é através da comparação com os valores apresentados no balanço energético anual realizado pela (Direção Geral de Energia e Geologia) para o ano de 2022 [76]. Segundo a DGEG em 2022 foram consumidos cerca de 1121 ktep de gasolina o que representa uma variação de 7,6% face ao valor calculado (1035 ktep).

Em relação aos cenários em estudo, o cenário 2 é o mais simples de analisar, já que neste a gasolina fóssil é forçada a ser retirada da mistura de combustível, com a sua substituição por gasolina sintética até 2040. O cenário 3 também apresenta resultados expectáveis já que é o único cenário em que a gasolina fóssil continua a ser utilizada para além de 2050. É no cenário 1 que estão talvez os resultados mais interessantes, já que neste cenário os veículos com motores a combustão praticamente não são vendidos a partir de 2040 e mesmo assim, sem um investimento em combustíveis sintéticos alternativos, não é possível eliminar completamente os veículos a combustão antes de 2050, eliminação essa que era um dos objetivos previstos no RNC2050.

Os resultados da Tabela 4.23 e a presença de consumo de gasolina em 2050, na prática implica a presença de ICEV, HEV e PHEV ainda em circulação nesse ano o que comprova mais uma vez a dificuldade em atingir a transição para mobilidade elétrica sem nenhum tipo de incentivo à substituição de veículos antigos ou algum tipo de proibição agressiva imposta para impedir a circulação e venda de veículos a combustão

Para outras fontes energéticas, como é o caso do gásóleo e da eletricidade esta comparação torna-se mais complicada. Ao contrário da gasolina, grande parte do gásóleo consumido é utilizado para veículos pesados. Quando é feita a comparação entre o valor calculado por veículos ligeiros e o consumo apresentado pela DGEG, percebe-se que apenas cerca de 60% do gásóleo é consumido por veículos ligeiros [76]. Já a eletricidade, atualmente, é consumida maioritariamente pelo setor do transporte rodoviário representando cerca de 92% de toda a eletricidade consumida neste sector.

Assim sendo torna-se difícil fazer qualquer tipo de comparação entre os valores previstos até 2050 já as alterações apresentadas no RNC2050 e no PNEC nestas fontes energéticas são extramente influenciadas por subsectores dos transportes que não foram incluídos neste trabalho.

Apesar da comparação com as metas nacionais ao nível dos veículos ligeiros ser algo complexa, a Figura 4.20 permite analisar a trajetória geral do consumo de electricidade nos veículos ligeiros com os cenários aqui desenhados.

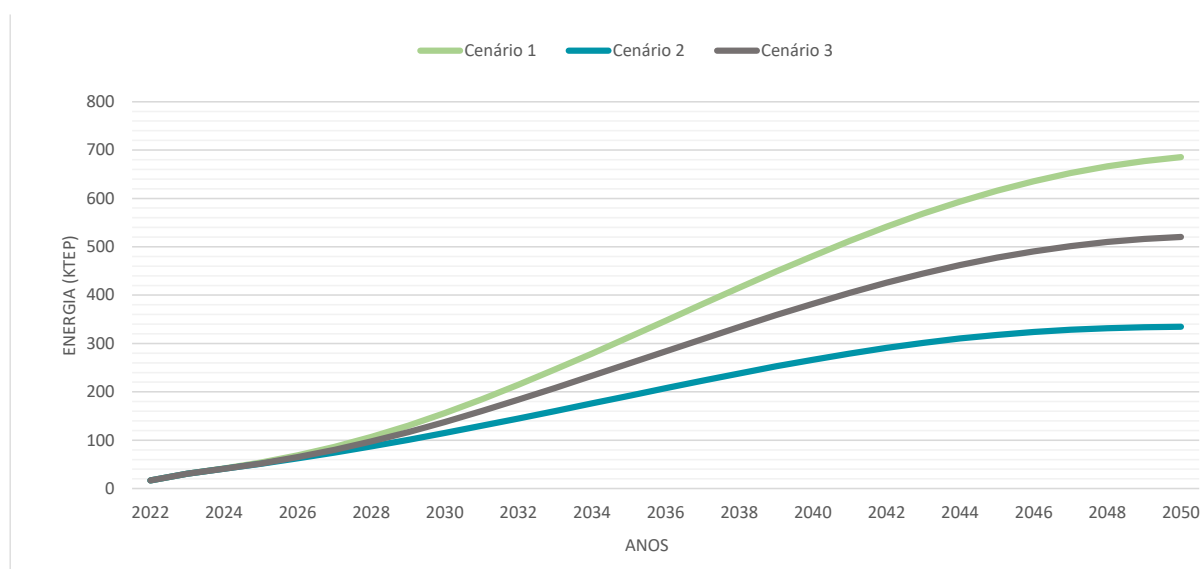


Figura 4.20 - Evolução do consumo de eletricidade nos 3 cenários.

Como seria de esperar o aumento do número de veículos elétricos, leva a um aumento na procura por eletricidade, cerca de 40 vezes superior a 2022 no caso do cenário 1, onde o número de BEV em 2050 é cerca de 73 vezes superior ao número atual. Sem dúvida que tal

aumento tem um grande impacto não só na produção de eletricidade como também na infraestrutura de carregamento.

Inversamente, uma aposta mais moderada na mobilidade elétrica em conjunto com o desenvolvimento de combustíveis sintéticos, não requer uma remodelação tão drástica ao nível das infraestruturas de distribuição já que estes podem beneficiar de grande parte da infraestrutura já montada para a gasolina e o gasóleo fóssil.

Ainda assim o aumento drástico da produção de combustíveis sintéticos com recurso a hidrogénio verde requer também um aumento significativos na capacidade de produção de eletricidade, algo que pode ser estimado. No cenário 2, onde os combustíveis sintéticos têm a maior contribuição para a energia final consumida, são consumidos cerca de 907 ktep (de gasolina sintética e 273 ktep de gasóleo sintéticos em 2050. Com estes valores de energia total e com as equações (7.1) e (7.2) apresentadas em é possível estimar consumo de eletricidade em 2050, considerando a produção de H₂.

Tabela 4.24 - Consumo de eletricidade em 2050, considerando a produção de H₂.

	Consumo de Eletricidade (ktep)	Consumo de Eletricidade considerando produção H₂ (ktep)
Cenário 1	685	909
Cenário 2	335	3148
Cenário 3	521	1906

Como é possível perceber pela Tabela 4.24, apesar de existirem menos veículos elétricos em circulação, a eletricidade produzida no cenário 3 e principalmente no cenário 2 para a produção de H₂ necessário ao fabrico de combustíveis sintéticos é bastante significativa. No cenário 2 torna-se 3 vezes superior à eletricidade produzida no cenário 1, onde o parque automóvel em 2050 é quase inteiramente constituído por BEV. No entanto a diferença entre a eletricidade produzida para o processo de eletrólise e para alimentar veículos elétricos está relacionada com o investimento na infraestrutura de carregamento e distribuição associado aos BEV.

Este aumento das necessidades energéticas é uma das principais desvantagens da produção de combustíveis sintéticos e vem realçar a importância da eletricidade renovável, uma vez que com os fatores de emissão atuais resultaria num aumento das emissões de CO₂.

Outro aspeto interessante analisar é a constituição do parque automóvel, especialmente à luz da introdução de uma potencial norma EURO 7. Considerando a introdução de um novo regulamento EURO 7 já a partir de 2026, é possível calcular o número de veículos com motor a combustão, aos quais as novas restrições de emissões seriam aplicáveis, em circulação entre 2026 e 2050. Esta análise patente na Tabela 4.25 revela que em cenários onde as vendas são dominadas pelos veículos 100% elétricos (cenário 1), os veículos EURO 7 representam no máximo 15% da frota de ligeiros de passageiros atingindo esse pico em 2035. Já no cenário 2, o maior número de veículos com motores em combustão resulta numa frota de ligeiros em que 33% dos seus veículos estão abrangidos pela norma EURO 7 já em 2035, continuando este número a aumentar até 2050 onde atingem os 60%.

Tabela 4.25 - Representação de veículos a combustão EURO 7 no parque de ligeiros nacional.

	2030	2035	2040	2050
Cenário 1	12%	15%	14%	6%
Cenário 2	16%	33%	47%	60%
Cenário 3	13%	22%	29%	32%

Os resultados da Tabela 4.25 vão ao encontro das previsões de um estudo da ACEA (*European Automobile Manufacturers' Association*) [[77]] que conclui que num cenário onde a maior parte do parque europeu é constituído por BEV, os automóveis com motor a combustão abrangidos pela norma EURO 7 representarão apenas 10% dos veículos que circulam nas estradas da União Europeia em 2035. Com este nível de representação estima-se que a introdução da Norma EURO 7 e respetivos limites de emissões, resulte numa redução das emissões do transporte rodoviário de apenas 4% para além das conseguidas com a norma EURO 6d [78].

5 Conclusões e trabalho futuro

5.1 Conclusões

A transição para mobilidade 100% elétrica requer uma alteração drástica do parque automóvel nacional com uma taxa de substituição de ICEV por BEV muito acentuada. No cenário 1 mesmo considerando um aumento percentual médio de 5% ao ano no número de BEV vendidos entre 2022 e 2035, estes apenas representarão cerca de 25% da frota total de ligeiros em 2035. Assim considerando as curvas de sobrevivência dos veículos atuais apresentadas e visto que a redução de emissões de CO₂ neste cenário está diretamente ligada à introdução de BEV, não é difícil perceber a dificuldade para atingir as metas para o setor até 2030 apenas recorrendo a BEV. Por outro lado, este trabalho demonstra também que alcançar os objetivos para 2050 ainda é possível já que em todos os cenários desenvolvidos, é alcançada uma redução acima dos 90% das emissões WTW de CO₂. Este resultado é especialmente importante quando aplicado ao cenário 3, onde uma abordagem mais conservativa e diversificada em relação à transição tecnológica e substituição de fontes energéticas é capaz de alcançar reduções muito semelhantes às alcançadas nos cenários mais disruptivos (cenários 1 e 2). Estes resultados esclarecem que existem múltiplos caminhos para a atingir as metas definidas comprovando-se que a incorporação de biocombustíveis e combustíveis sintéticos tem potencial para atingir reduções de CO₂ superiores à transição para mobilidade elétrica especialmente a curto prazo. Ainda assim algo que é transversal a todos os cenários analisados é a importância da eletricidade renovável. A transição para eletricidade renovável é fundamental para garantir a baixa pegada carbónica na fase de produção quer seja para alimentar diretamente veículos elétricos, quer seja para produzir hidrogénio que será depois usado para fabricar combustíveis sintéticos.

No entanto, ao comparar estes resultados com as metas estabelecidas tanto no PNEC2030 como no RNC2050, é importante ressaltar que os objetivos definidos no PNEC e no RNC são

para a totalidade do setor dos transportes (o que inclui grupos como veículos pesados, transporte ferroviário e aviação). Mesmo sabendo que o setor rodoviário representa mais de 70% das emissões totais do setor das quais os veículos ligeiros são responsáveis por mais de metade das emissões totais de CO₂ na EU (European Environment Agency (EEA) [2021]), este ligeiro desvio em relação às metas estabelecidas para o setor não implica a impossibilidade de alcançar tais objetivos recorrendo a reduções noutros meios de transporte ou variações relacionadas com transições modais.

5.2 Trabalho futuro

Uma das potenciais adições que podem ser feitas a este modelo, é a incorporação de veículos pesados e motociclos de modo a conseguir caracterizar o setor rodoviário como um todo. Dentro dos veículos pesados os autocarros apresentam particular relevância para o modelo já construído uma vez que possíveis desenvolvimentos na rede de transportes públicos afetam diretamente o número de passageiros.km e conseqüentemente a taxa de motorização para veículos ligeiros.

Uma outra análise que poderá ser feita está relacionada com a disponibilidade dos biocombustíveis. Neste modelo não é contabilizada a disponibilidade de matéria-prima biológica para a produção de biocombustíveis como HVO e FAME pelo que os limites de incorporação definidos para estes podem não ser viáveis num cenário onde os combustíveis alternativos ao gasóleo e gasolina fósseis são a principal fonte de redução de emissões líquidas de CO₂. Neste modelo também não é analisada a possibilidade de redução/alteração do ciclo de vida dos combustíveis algo que poderá ter impacto na redução das emissões totais WTW de CO₂.

Outro conjunto de variáveis por explorar, está relacionado com a mobilidade e transições modais. Sendo assim no futuro poder-se-á analisar o impacto que o desenvolvimento da rede de transportes públicos terá na evolução na taxa de motorização para veículos ligeiros e conseqüentemente nos VKT anuais.

Ao nível das próprias tecnologias, poderá ser ainda estudada a possibilidade de melhorias de eficiência dos sistemas de propulsão através da implementação de sistemas de controlo inteligentes que permitam uma melhor gestão do combustível em função do tipo de percurso e do perfil do condutor.

Por fim pode ser feita uma análise económica e financeira dos investimentos necessários tanto na infraestrutura elétrica como nas fábricas de produção de combustíveis sintéticos algo que está diretamente relacionado com o preço de venda da energia e dos próprios veículos.

6 Referências bibliográficas

- [1] International Energy Agency, “Tracking Clean Energy Progress 2023.” Accessed: Sep. 24, 2024. [Online]. Available: <https://www.iea.org/energy-system/transport>
- [2] EUROSTAT, “Energy statistics-an overview Statistics Explained,” Sep. 2023. Accessed: Sep. 24, 2024. [Online]. Available: <https://ec.europa.eu/eurostat/statisticsexplained/>
- [3] International Energy Agency, “Global Energy Review: CO2 Emissions in 2021 Global emissions rebound sharply to highest ever level,” 2021.
- [4] International Energy Agency, “Energy Policy Review Portugal 2021.”
- [5] ACEA, “Euro standards,” 2014. Accessed: Sep. 24, 2024. [Online]. Available: <https://www.acea.auto/fact/euro-standards/024>
- [6] GREENCHEM, “EURO 6 EMISSION STANDARD: What is this about?” Accessed: Sep. 24, 2024. [Online]. Available: <https://www.greenchem-adblue.com/euro-6-emission-standard-int/>
- [7] A. Zardini and P. Bonnel, *Real Driving Emissions Regulation: European Methodology to fine tune the EU Real Driving Emissions data evaluation method*. Luxemburg: Publications Office of the European Union, 2020.

- [8] Nissan Motor Corporation, "e-POWER's internal combustion engine achieves 50% thermal efficiency." Accessed: Sep. 24, 2024. [Online]. Available: https://www.nissan-global.com/EN/INNOVATION/TECHNOLOGY/ARCHIVE/E_POWER50/
- [9] R. Stone, *Solutions Manual for Introduction to Internal Combustion Engines*. Macmillan Education UK, 1999. doi: 10.1007/978-1-349-15079-3.
- [10] J. Lee, J. R. Theis, and E. A. Kyriakidou, "Vehicle emissions trapping materials: Successes, challenges, and the path forward," Apr. 01, 2019, *Elsevier B.V.* doi: 10.1016/j.apcatb.2018.10.069.
- [11] "Understanding CAT - Catalytic Converters." Accessed: Sep. 24, 2024. [Online]. Available: https://www.crypton.co.za/Tto%20know/Emissions/catalitic_converters.html
- [12] M. Piumetti, S. Bensaid, D. Fino, and N. Russo, "Catalysis in Diesel engine NOx aftertreatment: a review," Oct. 02, 2015, *Taylor and Francis Ltd.* doi: 10.1080/2055074X.2015.1105615.
- [13] J. Mccarthy, "Fuel Reformer, LNT and SCR Aftertreatment System Meeting Emissions Useful Life Requirements," 2009.
- [14] F. Leach, G. Kalghatgi, R. Stone, and P. Miles, "The scope for improving the efficiency and environmental impact of internal combustion engines," Jun. 01, 2020, *Elsevier Ltd.* doi: 10.1016/j.treng.2020.100005.
- [15] C. Air Resources Bpard - Mobile Source Control Division, "Appendix I: Current and Advanced Emission Control Strategies and Key Findings of CARB/SwRI Demonstration Work," 2020.
- [16] Entidade reguladora dos serviços energéticos, "Análise do mercado de biocombustíveis," 2021.
- [17] MARIA FERNANDA ROSA, "SITUAÇÃO ACTUAL DOS BIOCMBUSTÍVEIS: PERSPECTIVAS FUTURAS."
- [18] Porsche, "Innovation. Sustainability. Performance. - Synthetic Fuels." Accessed: Sep. 24, 2024. [Online]. Available: [https://media.porsche.com/mediakit/innovation-sustainability-performance/en/innovation-sustainability-performance/synthetic-fuels#:~:text=eFuels%20are%20produced%20from%20just,the%20negative%20pole%20\(cathode\).](https://media.porsche.com/mediakit/innovation-sustainability-performance/en/innovation-sustainability-performance/synthetic-fuels#:~:text=eFuels%20are%20produced%20from%20just,the%20negative%20pole%20(cathode).)
- [19] Diário da República, *Metas relativas ao consumo de energia proveniente de fontes renováveis, Decreto-Lei n.º 84/2022*. 2022.
- [20] K. Prajapati, K. C. Prajapati, R. Patel, R. Sagar, and B. Tech, "Hybrid Vehicle: A Study on Technology," 2014. Accessed: Sep. 24, 2024. [Online]. Available: www.ijert.org
- [21] J. A. Sanguesa, V. Torres-Sanz, P. Garrido, F. J. Martinez, and J. M. Marquez-Barja, "A review on electric vehicles: Technologies and challenges," Mar. 01, 2021, *MDPI*. doi: 10.3390/smartcities4010022.

- [22] V. R. J. H. Timmers and P. A. J. Achten, "Non-exhaust PM emissions from electric vehicles," Jun. 01, 2016, *Elsevier Ltd.* doi: 10.1016/j.atmosenv.2016.03.017.
- [23] International Renewable Energy Agency (IRENA), "Hydrogen." Accessed: Sep. 24, 2024. [Online]. Available: <https://www.irena.org/Energy-Transition/Technology/Hydrogen>
- [24] European Commission, "Commission proposes new Euro 7 standards to reduce pollutant emissions from vehicles and improve air quality," Brussels, Oct. 2022. Accessed: Sep. 24, 2024. [Online]. Available: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_22_6495
- [25] PARLAMENTO EUROPEU, "REGULAMENTO (UE) 2019/631," 2019.
- [26] European commission, "CO₂ emission performance standards for cars and vans," Brussels, Nov. 10, 2022. Accessed: Sep. 24, 2024. [Online]. Available: https://climate.ec.europa.eu/eu-action/transport/road-transport-reducing-co2-emissions-vehicles/co2-emission-performance-standards-cars-and-vans_en
- [27] PARLAMENTO EUROPEU, "REGULAMENTO (UE) 2023/851," Apr. 2023.
- [28] EUROPEAN VEHICLE MARKET STATISTICS, "EUROPEAN VEHICLE MARKET STATISTICS," 2024. Accessed: Sep. 24, 2024. [Online]. Available: <https://eupocketbook.org>
- [29] V. Mickūnaitis, A. Pikūnas, and I. Mackoit, "REDUCING FUEL CONSUMPTION AND CO₂ EMISSION IN MOTOR CARS," vol. XXII, no. 3, pp. 160–163, Accessed: Sep. 24, 2024. [Online]. Available: www.transport.vgtu.lt
- [30] Engineering Toolbox, "Fuels - Higher and Lower Calorific Values." Accessed: Sep. 24, 2024. [Online]. Available: https://www.engineeringtoolbox.com/fuels-higher-calorific-values-d_169.html
- [31] ACEA, "Differences between diesel and petrol explained," 2016. Accessed: Sep. 24, 2024. [Online]. Available: <https://www.acea.auto/fact/differences-between-diesel-and-petrol/#:~:text=Diesel%20and%20petrol%20engines&text=The%20calorific%20value%20of%20diesel,to%2033.7%20MJ%2Flitre>
- [32] ACEA, "New car registrations: +13.9% in 2023; battery electric 14.6% market share." Accessed: Sep. 24, 2024. [Online]. Available: <https://www.acea.auto/pc-registrations/new-car-registrations-13-9-in-2023-battery-electric-14-6-market-share/>
- [33] United States Environmental Protection Agency (EPA), "Electric Vehicle Myths." Accessed: Sep. 24, 2024. [Online]. Available: <https://www.epa.gov/greenvehicles/electric-vehicle-myths#Myth3>
- [34] F. Gonzalez Venegas, M. Petit, and Y. Perez, "Active integration of electric vehicles into distribution grids: Barriers and frameworks for flexibility services," Jul. 01, 2021, *Elsevier Ltd.* doi: 10.1016/j.rser.2021.111060.

- [35] APREN, “Balanço da Produção de Eletricidade de Portugal Continental em 2024.” Accessed: Sep. 24, 2024. [Online]. Available: <https://www.apren.pt/pt/energias-renovaveis/producao>.”
- [36] P. K. Senecal and F. Leach, “Diversity in transportation: Why a mix of propulsion technologies is the way forward for the future fleet,” *Results in Engineering*, vol. 4, Dec. 2019, doi: 10.1016/j.rineng.2019.100060.
- [37] EARTH.org, “The Environmental Impact of Battery Production for Electric Vehicles.” Accessed: Sep. 24, 2024. [Online]. Available: <https://earth.org/environmental-impact-of-battery-production/>
- [38] R. Energy and E. on behalf of the Department for Transport, “Lifecycle Analysis of UK Road Vehicles Specialist Professional and Technical Services 2 (SPaTS2) Framework Lot 1 Work Order Ref: T0082 TETI0045 - Final Report for Department for Transport.”
- [39] M. Finkbeiner, A. Inaba, R. B. H. Tan, K. Christiansen, and H. J. Klüppel, “The new international standards for life cycle assessment: ISO 14040 and ISO 14044,” 2006, *Springer Verlag*. doi: 10.1065/lca2006.02.002.
- [40] S. Ramachandran and U. Stimming, “Well to wheel analysis of low carbon alternatives for road traffic,” *Energy Environ Sci*, vol. 8, no. 11, pp. 3313–3324, Nov. 2015, doi: 10.1039/c5ee01512j.
- [41] European Commission, “Well-to-Wheels Analyses.” Accessed: Sep. 24, 2024. [Online]. Available: https://joint-research-centre.ec.europa.eu/welcome-jec-website/jec-activities/well-wheels-analyses_en
- [42] Concawe, Eucar, and European Commission, “JEC Well-To-Wheels report v5,” Luxembourg, 2020. doi: 10.2760/100379.
- [43] L. Amatuni, J. Ottelin, B. Steubing, and J. M. Mogollón, “Does car sharing reduce greenhouse gas emissions? Assessing the modal shift and lifetime shift rebound effects from a life cycle perspective,” *J Clean Prod*, vol. 266, Sep. 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.121869.
- [44] T. D. Chen and K. M. Kockelman, “Carsharing’s life-cycle impacts on energy use and greenhouse gas emissions,” *Transp Res D Transp Environ*, vol. 47, pp. 276–284, Aug. 2016, doi: 10.1016/j.trd.2016.05.012.
- [45] Wuppertal, “Wuppertal Institute 2007 - The Future of Car-Sharing in Germany. Final report,” 2007.
- [46] B. Carsharing and V. W. Loose, “MOMO (2010). The state of European car-sharing. Final Report D 2.4 Work Package 2.,” 2010.
- [47] Q. L. Jing, H. Z. Liu, W. Q. Yu, and X. He, “The Impact of Public Transportation on Carbon Emissions—From the Perspective of Energy Consumption,” *Sustainability (Switzerland)*, vol. 14, no. 10, May 2022, doi: 10.3390/su14106248.

- [48] “Public Transportation Reduces Greenhouse Gases and Conserves Energy The Benefits of Public Transportation.”
- [49] International Energy Agency, “Net Zero by 2050 - A Roadmap for the Global Energy Sector,” May 2021. Accessed: Sep. 24, 2024. [Online]. Available: www.iea.org/t&c/
- [50] International Energy Agency, “Net Zero Roadmap: A Global Pathway to Keep the 1.5 °C Goal in Reach - 2023 Update,” Sep. 2023. Accessed: Sep. 24, 2024. [Online]. Available: www.iea.org/t&c/
- [51] N. Powell *et al.*, “Impact Analysis of Mass EV Adoption and Low Carbon Intensity Fuels Scenarios – Summary Report,” 2018.
- [52] ERTRAC, “Carbon-neutral Road Transport 2050: a technical study from a well-to-wheels perspective,” 2021.
- [53] P. Mock, S. Díaz, and ICCT, “PATHWAYS TO DECARBONIZATION: THE EUROPEAN PASSENGER CAR MARKET IN THE YEARS 2021–2035,” 2021.
- [54] República Portuguesa, Fundo Ambiental, and Agência Portuguesa do Ambiente (APA), “ROTEIRO PARA A NEUTRALIDADE CARBÓNICA 2050 (RNC2050).”
- [55] República Portuguesa, Fundo Ambiental, and Agência Portuguesa do Ambiente (APA), “PLANO NACIONAL ENERGIA E CLIMA 2021-2030 (PNEC 2030),” 2023.
- [56] ADENE, “Conheça as metas ambiciosas do Plano Nacional Energia e Clima 2030 recentemente revisto,” 2023. Accessed: Sep. 24, 2024. [Online]. Available: <https://www.adene.pt/conheca-as-metas-ambiciosas-do-plano-nacional-energia-e-clima-2030-recentemente-revisto/>
- [57] ACAP - Associação Automóvel de Portugal, “Estatísticas mercado automóvel.” Accessed: Sep. 24, 2024. [Online]. Available: <https://www.acap.pt/pt/home>
- [58] P. De Carvalho Baptista *et al.*, “Evaluation of the impacts of the introduction of alternative fuelled vehicles in the road transportation sector Thesis approved in public session to obtain the PhD Degree in Sustainable Energy Systems Jury final classification: Pass with merit,” 2011.
- [59] Agência Portuguesa do Ambiente (APA), “Transportes - Parque Rodoviário,” Evolução do parque de veículos ligeiros de passageiros por escalões de idade. Accessed: Sep. 24, 2024. [Online]. Available: <https://rea.apambiente.pt/content/parque-rodovi%C3%A1rio>
- [60] Instituto Nacional de Estatística, “Projeções de População Residente 2018-2080,” 2020.
- [61] “VEHICLES ON EUROPEAN ROADS,” 2024. Accessed: Sep. 24, 2024. [Online]. Available: www.acea.auto
- [62] Agência Portuguesa do Ambiente (APA), “NATIONAL INVENTORY REPORT 2023.” Accessed: Sep. 24, 2024. [Online]. Available: <http://www.apambiente.pt>

- [63] ACEA, "New commercial vehicle registrations," 2024. Accessed: Sep. 24, 2024. [Online]. Available: <https://www.acea.auto/cv-registrations/new-commercial-vehicle-registrations-vans-14-6-trucks-16-3-buses-19-4-in-2023/>
- [64] Nissan Motor Corporation, "Nissan reveals European EV drivers are travelling further than petrol and diesel motorists." Accessed: Sep. 24, 2024. [Online]. Available: <https://europe.nissannews.com/en-GB/releases/nissan-reveals-european-ev-drivers-are-travelling-further-than-petrol-and-diesel-motorists>
- [65] 7 Author and S. Lu, "VEHICLE SURVIVABILITY AND TRAVEL MILEAGE SCHEDULES Vehicle Survivability and Travel Mileage Schedules 6. Performing Organization Code NPO-130 Unclassified," 2006.
- [66] UNECE, "Accurate fuel efficiency and CO2 test for new cars (WLTP)," 2014.
- [67] The Engineering ToolBox, "Combustion of Fuels - Carbon Dioxide Emission." Accessed: Sep. 24, 2024. [Online]. Available: https://www.engineeringtoolbox.com/co2-emission-fuels-d_1085.html
- [68] JATO, "tesla model Y on course to be best selling passenger car in europe by year end." Accessed: Sep. 24, 2024. [Online]. Available: www.jato.com/tesla-model-y-on-course-to-be-best-selling-passenger-car-in-europe-by-year-end/
- [69] "Spritmonitor." Accessed: Sep. 24, 2024. [Online]. Available: <https://www.spritmonitor.de/en/>
- [70] ACAP, "1,5 milhões de automóveis a circular em Portugal têm mais de 20 anos," 2022. Accessed: Sep. 24, 2024. [Online]. Available: <https://www.acap.pt/index.php?route=base/pt/noticia/831/15-milhoes-de-automoveis-a-circular-em-portugal-tem-mais-de-20-anos>
- [71] European Commission, "JEC WTW study." Accessed: Sep. 24, 2024. [Online]. Available: <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC11903>
- [72] European Environmental Agency, "Greenhouse gas emission intensity of electricity generation in Europe." Accessed: Sep. 24, 2024. [Online]. Available: <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/indicators/greenhouse-gas-emission-intensity-of-1>
- [73] European Commission, "Gasolinas simples 95 FICHA DE DADOS DE SEGURANÇA," 2022.
- [74] European Environment Agency (EEA), "Greenhouse gas emissions from transport in Europe." Accessed: Sep. 24, 2024. [Online]. Available: <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/indicators/greenhouse-gas-emissions-from-transport?activeAccordion=>
- [75] PORDATA, "Veículos rodoviários motorizados por tipo de veículo e combustível." Accessed: Sep. 24, 2024. [Online]. Available:

<https://www.pordata.pt/pt/estatisticas/transportes/por-terra/veiculos-rodoviaros-motorizados-por-tipo-de-veiculo-e>

- [76] Direção Geral de Energia e Geologia (DGEG), “BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL,” 2022.
- [77] European Automobile Manufacturers’ Association (ACEA), “A mere 10% of combustion engine cars on EU roads set to fall under Euro 7 rules in 2035.” Accessed: Sep. 24, 2024. [Online]. Available: <https://www.acea.auto/figure/a-mere-10-of-combustion-engine-cars-on-eu-roads-set-to-fall-under-euro-7-rules-in-2035/>
- [78] M. Yugo and A. Soler, “A look into the role of e-fuels in the transport system in Europe (2030-2050) (literature review) Liquid e-methane (CH₄) e-hydrogen (H₂),” *CONCAWE REVIEW*, vol. 28, no. 1, 2019.

7 Anexos

Anexo 1

Atualmente para produzir 1L de combustível sintético são necessários 0,41 a 0,5 kg que hidrogénio para os quais são necessários cerca de 82 a 99 MJ de eletricidade dependendo da eficiência dos eletrolisadores [78] (Figura 7.1). Sendo assim, após cálculo dos litros totais consumidos anualmente pela frota (equação (7.1)) então é possível calcular a energia elétrica total necessária para produzir o volume de combustível consumido em 2050 (Equação ((7.2)).

$$L_{combustivel} = \frac{E}{PCI \times \rho} \quad (7.1)$$

Em que:

E = Energia total em MJ

P = Massa especifica (kg/L)

PCI = Poder calorifico inferior (MJ/kg)

$L_{combustivel}$ = Volume de combustível (l)

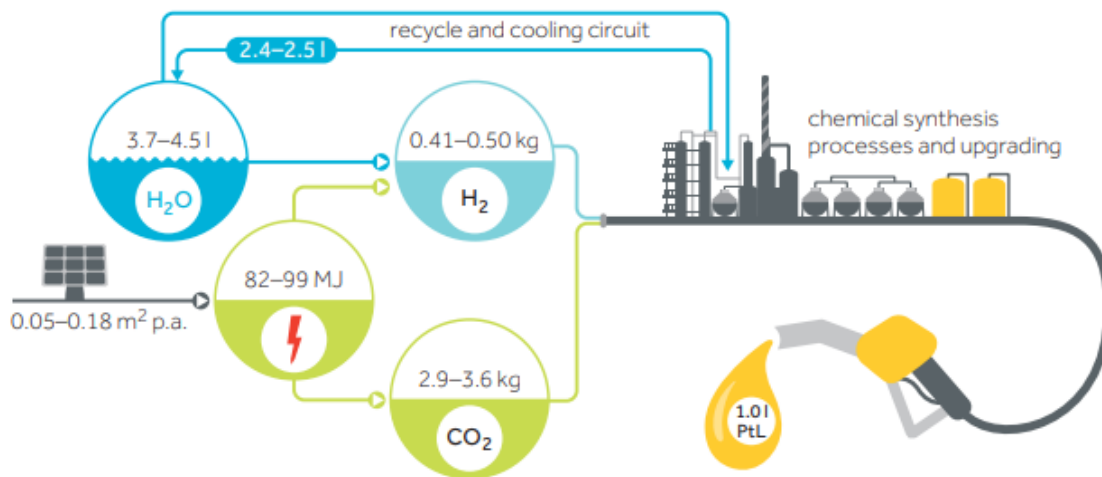


Figura 7.1 – Recursos necessários para a produção de 1L de combustível sintético [78].

Considerando uma proporção de 0,5kg de H₂ para 1L de e-fuel:

$$m_{H_2} = 0,5 \times L_{combustivel}$$

$$E_{elétrica} = \frac{m_{H_2} \times PCI_{Hidrogénio}}{\eta} \quad (7.2)$$

Em que:

m_{H_2} = massa de hidrogénio em kg

$PCI_{Hidrogénio}$ = Poder calorífico inferior do hidrogénio (143 MJ/kg)

η = eficiência do eletrólise (tipicamente entre 70% e 90%) [78]

Anexo 2

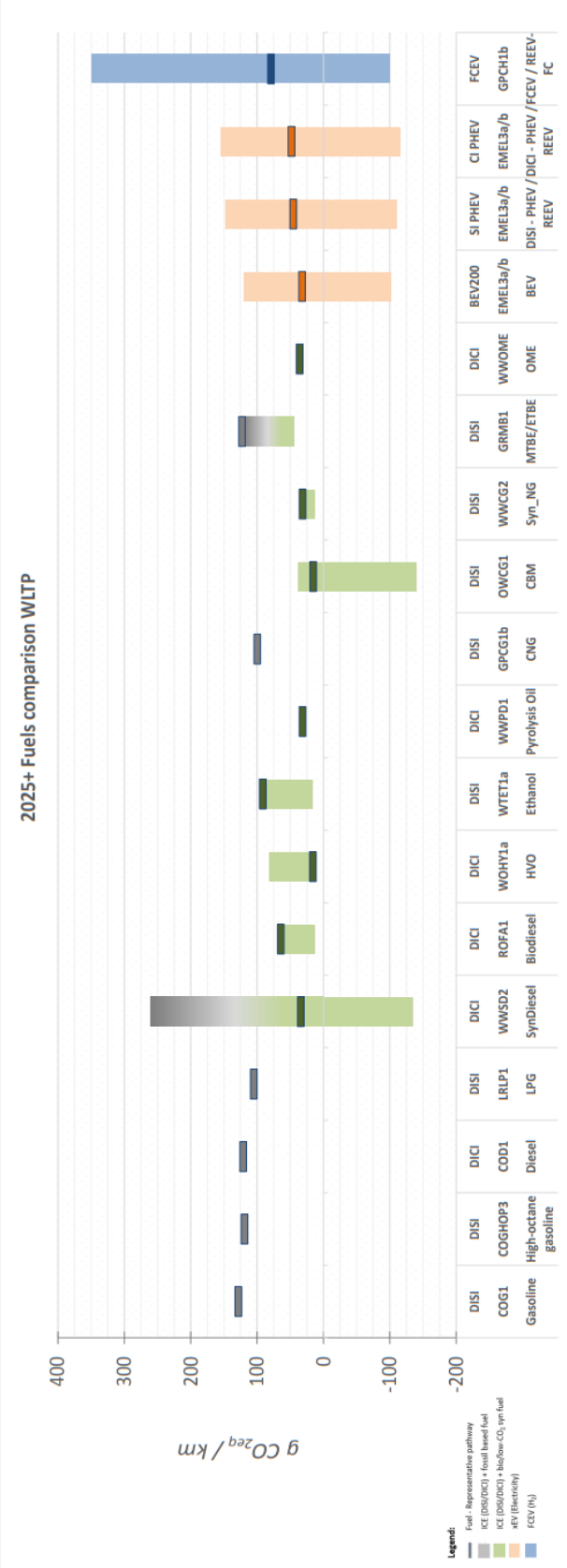


Figura 7.2-Comparação WTW de emissões de CO₂ de vários combustíveis para 2025+ [42].

Anexo 4

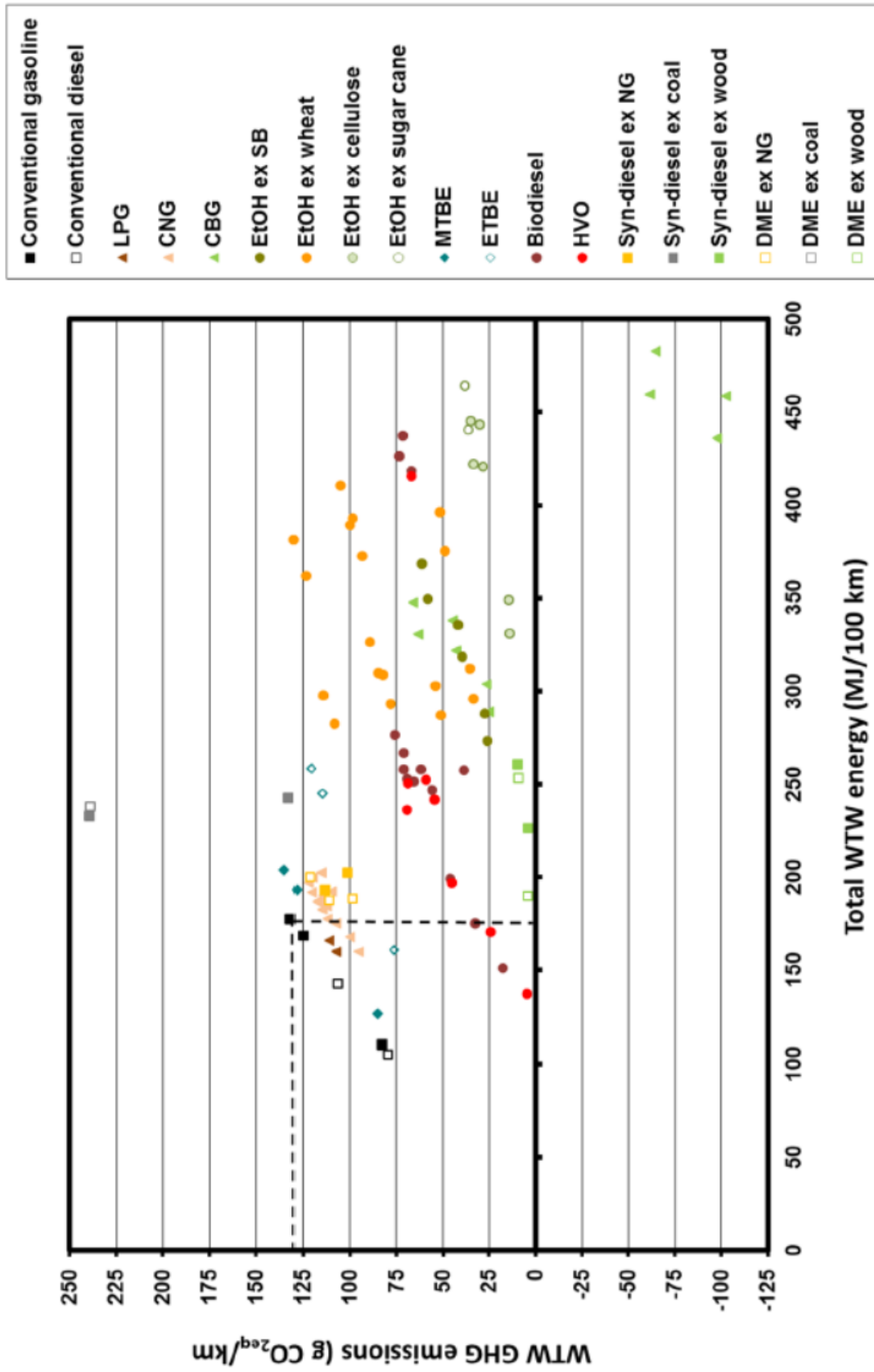


Figura 7.4- Energia gasta e emissões de CO₂ por km para cada tipo de combustível [41].