



Projeto

Mestrado em Engenharia Automóvel

***Análise sobre o potencial de utilização de biometano  
para a descarbonização do setor transportes***

**Nuno Filipe Costa António**

Leiria, novembro de 2025



Projeto

Mestrado em Engenharia Automóvel

***Análise sobre o potencial de utilização de biometano  
para a descarbonização do setor transportes***

**Nuno Filipe Costa António**

Leiria, novembro de 2025







Projeto

Mestrado em Engenharia Automóvel

***Análise sobre o potencial de utilização de biometano  
para a descarbonização do setor transportes***

**Nuno Filipe Costa António**

Dissertação de Mestrado realizada sob a orientação do Doutor Hélder Manuel Ferreira dos Santos, Professor da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria e coorientação do Doutor Luís Manuel Ventura Serrano, Professor da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria.

Leiria, novembro de 2025

*Esta página foi intencionalmente deixada em branco*

# Dedicatória

---

Dedico esta tese, em primeiro lugar, aos meus pais, Nuno António e Patrícia António, pelo amor incondicional, apoio constante e por serem o meu maior alicerce.

Aos meus avós, especialmente ao Ilídio, Zezinha, Salvador e Carolina pela sabedoria, carinho e inspiração.

Ao meu tio Jorge, pelos conselhos e presença amiga, e aos meus tios Gonçalo e Marisa, pelo incentivo e apoio.

Aos meus primos Martim e Santiago, pela alegria que trazem aos meus dias.

Ao meu amigo Diogo Silva, pela amizade verdadeira e constante ao longo desta jornada.

E ao João Tabai, um grande amigo, pela presença marcante e pelo apoio ao longo deste caminho e de outros.

*Esta página foi intencionalmente deixada em branco*

# Agradecimentos

---

Em primeiro lugar, quero expressar a minha sincera gratidão ao meu amigo Diogo Silva, pela amizade leal, pelo apoio constante e pela companhia nas diferentes fases deste percurso académico.

Agradeço aos meus orientadores, o Professor Doutor Hélder Santos e o Professor Doutor Luís Serrano, não apenas pela orientação e dedicação prestadas neste projeto de mestrado, mas também pelo acompanhamento, incentivo e apoio ao longo de todo o meu percurso na licenciatura e no mestrado.

Às Professoras Doutoradas Leopoldina Alves e Fátima Barreiros, deixo um agradecimento especial pela atenção, orientação e apoio demonstrado em momentos importantes do meu percurso académico.

Aos professores da Escola Superior de Tecnologia e Gestão (ESTG), deixo um agradecimento especial pelo conhecimento transmitido, pela exigência que nos faz crescer, pela disponibilidade demonstrada ao longo dos anos, bem como pelo investimento pessoal que fizeram em nós e pelo tempo dedicado a partilhar o seu saber nas diversas áreas da nossa futura profissão.

Não posso deixar de reconhecer também o papel dos funcionários da ESTG, em particular dos bares e da cantina, cuja simpatia e profissionalismo contribuíram para tornar o dia a dia mais leve e acolhedor.

Agradeço igualmente aos responsáveis do laboratório dos blocos A e E, pelo apoio técnico, disponibilidade e contributo essencial para o desenvolvimento do trabalho prático ao longo do curso.

Por fim, agradeço a todos os meus colegas de curso, com quem partilhei momentos de esforço, aprendizagem e amizade, e que tornaram esta caminhada mais rica e memorável.

*Esta página foi intencionalmente deixada em branco*

# Resumo

---

Este estudo tem como principal objetivo avaliar a viabilidade da implementação do biometano no transporte rodoviário pesado em Portugal, analisando a disponibilidade de recursos e o potencial de desenvolvimento do mercado nacional nesta área.

No presente estudo é utilizado o modelo da CONCAWE, como também a revisão sistemática da literatura, o que permitiu realizar uma análise comparativa entre diferentes tecnologias de propulsão em veículos pesados *Long Haul* (5-LH), considerando diferentes fontes de energia incluindo o biometano, avaliando de forma mais criteriosa as correspondentes emissões de Gases de Efeito de Estufa (GEE). É também feita uma análise do Custo Total de Propriedade (TCO).

Com base na análise desenvolvida, concluiu-se que o biometano representa uma solução eficaz para a redução de emissões de GEE nos transportes pesados, uma vez que, em comparação com os combustíveis fósseis, apresenta valores significativamente inferiores de emissões de GEE — podendo mesmo alcançar emissões líquidas negativas, dependendo dos resíduos utilizados na sua produção.

No entanto, a análise de viabilidade do biometano em Portugal revela diversas limitações, nomeadamente a necessidade de investimento em infraestruturas, apoio institucional e desenvolvimento tecnológico. Para mitigar estes obstáculos, propõem-se várias medidas estratégicas, tais como: a criação de uma rede nacional de abastecimento de biometano, o estabelecimento de incentivos financeiros e fiscais, o fomento de projetos de produção descentralizada, a definição de metas nacionais específicas para o setor dos transportes, a promoção da confiança tecnológica e uma aposta clara na investigação, no desenvolvimento e na certificação.

Apesar de existirem tecnologias com desempenho económico mais favorável em termos de TCO, como os *Battery Electric Vehicle* (BEV), foi possível demonstrar que a implementação do biometano poderá desempenhar um papel complementar relevante. Assim, a transição energética no setor dos transportes não deverá assentar numa única solução, mas sim num conjunto de tecnologias integradas que contribuam de forma harmonizada para o cumprimento das metas de descarbonização estabelecidas pela União Europeia e pelo Plano de Ação para o Biometano (PAB).

**Palavras-chave:** *Sistemas de propulsão de veículos, transportes pesados, Fontes de Energia, Biometano, Emissões de GEE, Custo total de propriedade (TCO)*



*Esta página foi intencionalmente deixada em branco*

# Abstract

---

The main objective of this study is to assess the feasibility of implementing biomethane in heavy road transport in Portugal, analysing the existence of resources and the potential for development of the national market in this area.

This study uses the CONCAWE model, as well as a systematic review of the literature, which allowed for a comparative analysis between different propulsion technologies in Long Haul (5-LH) heavy vehicles, considering different energy sources including biomethane, and more carefully evaluating the corresponding greenhouse gas (GHG) emissions. A Total Cost of Ownership (TCO) analysis is also performed.

Based on the analysis, it was concluded that biomethane represents an effective solution for reducing GHG emissions in heavy transport, since, compared to fossil fuels, it has significantly lower GHG emissions — and can even achieve negative net emissions, depending on the waste used in its production.

However, the feasibility analysis of biomethane in Portugal reveals several limitations, namely the need for investment in infrastructure, institutional support and technological development. To mitigate these obstacles, several strategic measures are proposed, such as: the creation of a national biomethane supply network, the establishment of financial and tax incentives, the promotion of decentralised production projects, the definition of specific national targets for the transport sector, the promotion of technological confidence and a clear commitment to research, development and certification.

Although there are technologies with more favourable economic performance in terms of TCO, such as Battery Electric Vehicles (BEVs), it has been demonstrated that the implementation of biomethane can play an important complementary role. Thus, the energy transition in the transport sector should not be based on a single solution, but rather on a set of integrated technologies that contribute in a harmonised manner to the achievement of the decarbonisation targets set by the European Union and the Biomethane Action Plan (BAP).

**Keywords:** Vehicle propulsion systems, heavy transport, energy sources, biomethane, GHG emissions, total cost of ownership (TCO)

*Esta página foi intencionalmente deixada em branco*

# Lista de figuras

---

Figura 1: Sistema de Propulsão de um veículo pesado Diesel, retirada de Basma e Rodriguez, (2023 b) .....	10
Figura 2: Sistema de Propulsão de um veículo pesado BEV, retirada de Basma e Rodriguez, (2023 b) .....	10
Figura 3: Sistema de Propulsão de um veículo pesado Gás Natural, retirada Basma e Rodriguez, (2023 b).....	11
Figura 4: Sistema de Propulsão de um veículo pesado FCEV, retirada de Basma e Rodriguez, (2023 b) .....	11
Figura 5: Sistema de Propulsão de um veículo pesado com combustão a Hidrogénio, retirada de Basma e Rodriguez, (2023 b) .....	12
Figura 6: Sistema de Propulsão de um veículo pesado com combustão a Dual Fuel, retirado de (AMERICAN POWER GROUP, s.d.) .....	13
Figura 7: Quotas de mercado de acordo com os dados da VECTO em 2020, retirado de Basma e Rodriguez, (2023 a) .....	14
Figura 8: Comparação de TCO's das diferentes tecnologias usando como baseline o Diesel, retirada de Basma e Rodriguez, (2023 a) .....	17
Figura 9: Evolução das tecnologias ao longo do tempo, retirado de Basma e Rodriguez, nov. 2023 .....	20
Figura 10: Esquemático de uma LCA, retirada de Concawe (2023) .....	27
Figura 11: Interface inicial do software CONCAWE com as 5 categorias de veículos, retirada de Concawe (2023).....	28
Figura 12: Interface para a análise de emissões de GEE para os veículos pesados 5-LH, retirada de Concawe (2023) .....	28
Figura 13: Fontes de energia escolhidas para o estudo, retirada de Concawe (2023).....	31
Figura 14: Resultado das emissões das diferentes tecnologias, original.....	33
Figura 15: Resultados das emissões das diferentes tecnologias com parciais, original.....	33
Figura 16: Resultados do biometano a partir de diferentes fontes de resíduos, original.....	39
Figura 17: Resultados do biometano a partir de diferentes fontes de resíduos com parciais, original .....	39
Figura 18: Resultados obtidos para a análise do pack de baterias, original .....	40
Figura 19: Resultados obtidos para a análise do pack de baterias com parciais, original...	41
Figura 20: Valores de emissões para a produção de baterias, retirado de Concawe (2023) ..	42

Figura 21: Resultados obtidos a partir da variação de emissões da produção das baterias, original.....	42
Figura 22: Resultados obtidos a partir da variação de emissões da produção das baterias com parciais, original .....	42
Figura 23: Resultados obtidos na situação de baixa eficiência do motor parciais, original	43
Figura 24: Resultados obtidos na situação de alta eficiência do motor parciais, original ...	44
Figura 25: Resultados obtidos a partir da capacidade de armazenamento, original.....	45
Figura 26: Resultados obtidos a partir da capacidade de armazenamento parcial, original	45
Figura 27: Resultados obtidos para a produção da Fuel Cells, original .....	46
Figura 28: Resultados obtidos na Produção do Tanque, original .....	46
Figura 29: Resultados obtidos na Produção do Tanque parciais, original.....	47
Figura 30: Ciclos de condução, retirada de (Pascal Smague, 2024).....	47
Figura 31: Resultados do Percurso Long Haul, original .....	48
Figura 32: Resultados do Percurso Regional, original .....	48
Figura 33: Resultados do Percurso Urbano, original.....	49
Figura 34: Resultados das cargas baixas, original .....	50
Figura 35: Resultados das cargas altas, original.....	50
Figura 36: Custos de TCO de diferentes tecnologias, retirado de Wang et al. (2023) .....	54
Figura 37: Custos de TCO de diferentes tecnologias, retirado de Basma e Rodriguez, (2023 b).....	55
Figura 38: Infraestruturas para produção de biometano, retirado de Sulewski (2023) .....	57
Figura 39: Os principais produtores de biometano na EU, retirada de Sulewski (2023) ....	58
Figura 40: Tipo de resíduos utilizados na produção de biometano, retirado de Sulewski (2023) .....	58
Figura 41: Estimativa dos potenciais produtores para 2050, retirado de Sulewski (2023) .	59
Figura 42: Estimativa dos 2 cenários, retirado de Noussan et.al (2024) .....	64
Figura 43: Potencial de poupança das emissões consoante os cenários, retirado de Noussan et al. (2023).....	65
Figura 44: Uso do biometano em percentagem, retirado de Nagy e Jakovis (2025).....	71

*Esta página foi intencionalmente deixada em branco*

# Lista de tabelas

---

Tabela 1: Número de veículos pesados que circulam na EU, dados retirados acea (2025) ..	6
Tabela 2: Caracterização dos veículos pesados, informações retiradas (EU Commission, 2018).....	9
Tabela 3: Prós e contras do biometano, informação retirada de Pål Börjesson et al. (2016) .....	23
Tabela 4: Detalhes dos vários grupos propulsores, informação retirada de ConcaWE (2023) .....	30
Tabela 5: Comparação entre valores da CONCAWE e presente estudo, e valores obtidos por Pressi et al. (2022) .....	37
Tabela 6: Matérias-primas para a produção de biometano, informação obtida em DGEG (2024) .....	69
Tabela 7: Benefícios do biometano, informação obtida em DGEG (2024) .....	70
Tabela 8: Estimativas do número de veículos pesados com base nos cenários, original ....	73
Tabela 9: Resultados das emissões GEE a partir da CONCAWE, presente estudo .....	77
Tabela 10: Análise qualitativa entre as diferentes tecnologias, com base no artigo Basma e Rodriguez, (2023 b).....	79
Tabela 11: Resultados acerca dos GEE e TCO, presente estudo e com base na informação Basma e Rodriguez, (2023 b) .....	82
Tabela 12: Marcas e suas características nas tecnologias Baterias e Pilhas de combustível, retirado de E-Truck (2021).....	85
Tabela 13: Marcas e suas características na tecnologia de motores de combustão a H <sub>2</sub> , retirado de “Fontes”.....	86
Tabela 14: Marcas e suas características na tecnologia de motores de combustão usando a tecnologia de gás natural, retirado de “Fontes” .....	87
Tabela 15: Especificações dos veículos, adaptado de Rajalehto e Helo (2025).....	89
Tabela 16: Análise comparativa entre as diferentes tecnologias, adaptada de Rajalehto e Helo (2025) .....	89
Tabela 17: Preço dos combustíveis em Portugal, retirado de “fontes” .....	91
Tabela 18: Análise TCO, modificado a partir de (Basma e Rodriguez, nov. 2023).....	92
Tabela 19: Resultados BEV, original .....	108
Tabela 20: Resultados FCEV, original.....	108
Tabela 21: Resultados ICE, original.....	110

Tabela 22: Resultado das diferentes fontes de Biometano, original .....	111
Tabela 23: Resultados de BEV com substituição dos packs das baterias 2, original.....	112
Tabela 24: Resultados de BEV com substituição dos packs das baterias 1, original.....	112
Tabela 25: Resultados de BEV com substituição dos packs das baterias 4, original.....	113
Tabela 26: Resultados de BEV na produção de baterias 86 kgCO <sub>2</sub> eq/kWh, original .....	113
Tabela 27: Resultados de BEV na produção de baterias 52 kgCO <sub>2</sub> eq/kWh, original .....	114
Tabela 28: Resultados de BEV na produção de baterias 30 kgCO <sub>2</sub> eq/kWh, original .....	114
Tabela 29: Resultados de FCEV com eficiência baixa, original.....	115
Tabela 30: Resultados de ICE com eficiência baixa, original.....	116
Tabela 31: Resultados de FCEV com eficiência alta, original.....	117
Tabela 32: Resultados de ICE com eficiência alta, original .....	117
Tabela 33: Resultados da capacidade de armazenamento de H <sub>2</sub> para FCEV 10 kg, original .....	118
Tabela 34: Resultados da capacidade de armazenamento de H <sub>2</sub> para ICE 10 kg, original .....	119
Tabela 35: Resultados da capacidade de armazenamento de H <sub>2</sub> para FCEV 120 kg, original .....	119
Tabela 36: Resultados da capacidade de armazenamento de H <sub>2</sub> para ICE 120 kg, original .....	120
Tabela 37: Resultados da capacidade de armazenamento de H <sub>2</sub> para FCEV 30 kg, original .....	120
Tabela 38: Resultados da capacidade de armazenamento de H <sub>2</sub> para ICE 30 kg, original .....	121
Tabela 39: Resultados da capacidade de armazenamento de H <sub>2</sub> para FCEV 80 kg, original .....	122
Tabela 40: Resultados da capacidade de armazenamento de H <sub>2</sub> para ICE 80 kg, original .....	122
Tabela 41: Resultados de FCEV na produção 20 kgCO <sub>2</sub> eq/kWh, original .....	123
Tabela 42: Resultados de FCEV na produção 50 kgCO <sub>2</sub> eq/kWh, original .....	123
Tabela 43: Resultados de FCEV na produção 10 kgCO <sub>2</sub> eq/kWh, original .....	124
Tabela 44: Resultados de ICE na produção 10 kgCO <sub>2</sub> eq/kWh, original.....	125
Tabela 45: Resultados de FCEV na produção 50 kgCO <sub>2</sub> eq/kWh, original .....	125
Tabela 46: Resultados de ICE na produção 50 kgCO <sub>2</sub> eq/kWh, original.....	126
Tabela 47: Resultados BEV em ciclos Long Haul VECTO, original .....	127

Tabela 48: Resultados FCEV em ciclos Long Haul VECTO, original .....	127
Tabela 49: Resultados ICE em ciclos Long Haul VECTO, original .....	128
Tabela 50: Resultados BEV em ciclos Regional VECTO, original .....	130
Tabela 51: Resultados FCEV em ciclos Regional VECTO, original .....	131
Tabela 52: Resultados ICE em ciclos Regional VECTO, original.....	131
Tabela 53: Resultados BEV em ciclos Urban delivery VECTO, original.....	133
Tabela 54: Resultados FCEV em ciclos Urban delivery VECTO, original .....	133
Tabela 55: Resultados ICE em ciclos Urban delivery VECTO, original .....	134
Tabela 56: Resultados BEV carga de referência, original.....	137
Tabela 57: Resultados FCEV carga de referência, original.....	137
Tabela 58: Resultados ICE carga de referência, original .....	138
Tabela 59: Resultados BEV carga baixa, original .....	139
Tabela 60: Resultados FCEV carga baixa, original.....	139
Tabela 61: Resultados ICE carga baixa, original .....	140
Tabela 62: Resultados BEV carga alta, original.....	143
Tabela 63: Resultados FCEV carga alta, original.....	143
Tabela 64: Resultados ICE carga alta, original .....	144

*Esta página foi intencionalmente deixada em branco*

## Lista de siglas

---

ACEA	<i>Association des Constructeurs Européens d'Automobiles</i>
BEV	<i>Battery Electric Vehicle</i>
BCM	<i>Billion cubic meters</i>
CAPEX	<i>Capital Expenditure</i>
CO <sub>2</sub>	<i>Dióxido de Carbono</i>
CONCAWE	<i>CONservation of Clean Air and Water in Europe</i>
CNG	<i>Compressed Natural Gas</i>
DGEG	<i>Direção-Geral de Energia e Geologia</i>
EBA	<i>European Biogas Association</i>
EOF	<i>End of Life</i>
EU	<i>European Union</i>
FCEV	<i>Fuel Cell Electric Vehicles</i>
GNL	<i>Gás Natural Liquefeito</i>
GEE	<i>Gases de efeito de estufa</i>
HD	<i>Heavy Duty</i>
HVO	<i>Hydrotreated Vegetable Oil</i>
ICEV	<i>Internal Combustion Engine Vehicle</i>
LCA	<i>Life Cycle Assessment</i>
LH	<i>Long-Haul</i>
LNG	<i>Liquefied Natural Gas</i>
OPEX	<i>Operational Expenditure</i>
PAB	<i>Plano de Ação para o Biometano</i>
PNEC	<i>Plano Nacional Energia e Clima</i>
PRR	<i>Plano de Recuperação e Resiliência</i>
TCO	<i>Custo total de propriedade</i>
TTW	<i>Tank-to-Wheel</i>
VECTO	<i>Vehicle Energy Consumption calculation TOOL</i>
WTW	<i>Well-to-Wheel</i>

*Esta página foi intencionalmente deixada em branco*

# Índice

---

<b>DEDICATÓRIA</b>	<b>III</b>
<b>AGRADECIMENTOS</b>	<b>V</b>
<b>RESUMO</b>	<b>VII</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>X</b>
<b>LISTA DE FIGURAS</b>	<b>XII</b>
<b>LISTA DE TABELAS</b>	<b>XV</b>
<b>LISTA DE SIGLAS</b>	<b>XIX</b>
<b>ÍNDICE</b>	<b>XXI</b>
<b>1. INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
1.1. Contexto e Motivação	1
1.2. Metodologias de Investigação	2
1.3. Organização do documento	3
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>5</b>
2.1. Diretivas Europeias e Enquadramento Legislativo	5
2.2. Plano de Ação para o Biometano 2024-2040 para Portugal	7
2.3. Categorias de Veículos Pesados e Sistemas de Propulsão	8
2.3.1. Categorias de Veículos Pesados	8
2.3.2. Sistemas de Propulsão	9
2.4. Revisão dos trabalhos sobre a análise TCO	13
2.5. Revisão dos trabalhos sobre o Biometano	21
<b>3. ANÁLISE DAS EMISSÕES DE GEE</b>	<b>25</b>
3.1. Introdução	25
3.2. Metodologia	25
	xxi

<b>3.3.</b>	<b>Análise das emissões de CO<sub>2</sub> para diferentes tecnologias</b>	<b>26</b>
3.3.1.	Apresentação da metodologia - CONCAWE	26
3.3.2.	Análise de resultados das diferentes tecnologias	32
<b>4.</b>	<b>ANÁLISE DO POTENCIAL DE IMPLEMENTAÇÃO DO BIOMETANO NO SETOR DOS TRANSPORTES</b>	<b>53</b>
4.1.	Introdução	53
4.2.	Metodologia	53
4.3.	Biometano na Europa	57
4.4.	Biometano em Portugal	61
4.5.	Projetos Piloto	63
4.6.	Perspetiva do mercado de Biometano em Portugal e Estratégias de Implementação	68
<b>5.</b>	<b>ANÁLISE GLOBAL – EMISSÕES DE GEE E TCO</b>	<b>77</b>
5.1.	Análise Comparativa das emissões de GEE	77
5.2.	Análise comparativa do TCO	79
5.3.	Análise comparativa das emissões de GEE e do custo total de propriedade (TCO)	82
5.4.	Panorama Tecnológico dos Fabricantes	84
5.5.	Estimativa da TCO de combustível para Portugal	90
<b>6.</b>	<b>CONCLUSÕES</b>	<b>95</b>
	<b>BIBLIOGRAFIA</b>	<b>97</b>
	<b>ANEXOS</b>	<b>105</b>





# 1. Introdução

---

A descarbonização do setor dos transportes, em particular dos veículos pesados, representa um dos maiores desafios atuais no combate às alterações climáticas. Face ao aumento contínuo das emissões de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), a União Europeia estabeleceu metas ambiciosas com vista à neutralidade carbónica, procurando atingir emissões líquidas nulas de Gases de efeito de estufa (GEE) nas próximas décadas.

Neste contexto, o setor dos transportes pesados assume um papel de destaque, dado o seu elevado contributo para as emissões globais de GEE. Em resposta a esta preocupação, a Comissão Europeia procedeu à revisão das metas de redução de CO<sub>2</sub> para este setor, fixando objetivos obrigatórios: uma redução de 15% nas emissões até 2025 e de 30% até 2030, tendo como referência os níveis de 2019/2020 Basma e Rodriguez, (2023 a).

Neste seguimento, o presente estudo centra-se na análise da utilização do biometano como combustível alternativo para o setor dos transportes rodoviários pesados, com especial enfoque na sua viabilidade de implementação em Portugal.

## 1.1. Contexto e Motivação

---

A União Europeia estabeleceu metas ambiciosas para a descarbonização, com especial enfoque no setor dos transportes, particularmente no segmento dos veículos pesados. Com base nas metas estabelecidas pela EU, Portugal, como membro da EU, terá de implementar estratégias, de forma a contribuir para estes objetivos.

Tendo em consideração este contexto, é importante referir o elevado potencial de biometano para a descarbonização do setor dos transportes. Portugal a 15 de março de 2024 aprovou o Plano de Ação para o Biometano 2024-2040 (PAB), estabelecendo uma estratégia de desenvolvimento do mercado de biometano em Portugal. Com o PAB pretende-se contribuir para a descarbonização, da economia nacional, reduzir as importações de gás natural nos setores industriais, doméstico utilizando o biometano na substituição nos setores, aproveitando integralmente os recursos endógenos existentes em vários setores, DGEG (2024).

O presente estudo apresenta uma análise técnica e ambiental sobre a utilização do biometano, no setor dos transportes rodoviários e identificando estratégias para a sua adoção como alternativa aos combustíveis fósseis no contexto da descarbonização.

Desta forma, o presente estudo tem os seguintes objetivos:

- Avaliar a adequação da utilização de biometano como combustível alternativo no setor dos veículos pesados, comparando-o com o diesel convencional e com outras tecnologias de propulsão disponíveis, em termos de redução das emissões de CO<sub>2</sub>;
- Identificar as principais tecnologias de produção de biometano, quantificar o seu potencial de produção em Portugal e estimar o número de veículos pesados que poderiam ser abastecidos, considerando tanto o cenário atual como projeções futuras, bem como o impacto associado na mitigação das emissões de CO<sub>2</sub>;
- Avaliar de modo comparativo o custo de propriedade (TCO) de um veículo abastecido com biometano, face a outras fontes de energia e tecnologias de propulsão.
- Analisar as estratégias que Portugal pode adotar para promover a expansão do biometano no mercado nacional, delineando a sua evolução e integração no setor dos transportes pesados.

## **1.2. Metodologias de Investigação**

---

Na descrição das metodologias adotadas para a realização do presente trabalho, numa primeira fase, foi efetuada uma revisão bibliográfica, considerando diversos estudos de Custo total de propriedade, *Total Cost of Ownership* (TCO), que comparavam várias tecnologias de veículos pesados com o custo total de veículos a Gás Natural. Seguidamente, e tendo em vista a substituição da utilização de Gás Natural por biometano é apresentada a forma de produção e analisada a logística de abastecimento.

Para a análise comparativa das emissões de GEE entre vários sistemas de propulsão e combustíveis foi utilizado o modelo CONCAWE - CONservation of Clean Air and Water in Europe. Este modelo permite avaliar várias tecnologias utilizadas no setor dos transportes pesados, nomeadamente o 5 - Long Haul (LH) que foi considerado no presente trabalho, e compará-las com a tecnologia do Gás Natural/Biometano.

Na fase final estimou-se a partir do PAB, quantos veículos pesados poderiam circular tendo como base a previsão da capacidade nacional para produção de biometano, apresentada neste plano para 2030 e 2040. Neste contexto, com base na literatura científica relevante acerca do biometano, foram criados cenários para a utilização de biometano nos transportes pesados.

No final realizou-se uma análise comparativa das várias tecnologias em termos de emissões de GEE e do TCO, o que permite avaliar os efeitos de cada tecnologia considerando o seu contributo para a descarbonização e os potenciais efeitos em termos de custo de operação

## 1.3. Organização do documento

---

O presente documento está organizado em 6 capítulos:

- **1. Introdução:** Apresenta a motivação e objetivos do enquadramento geral do tema, as metodologias de investigação utilizadas e apresenta ainda a forma como o documento se encontra estruturado e organizado.
- **2. Revisão Bibliográfica:** Apresenta o enquadramento legislativo e estratégico da União Europeia no que diz respeito à redução das emissões de GEE no setor dos transportes pesados, incluindo as principais diretivas e o PAB. São também analisados os principais documentos científicos e técnicos que abordam o TCO das diferentes tecnologias, o seu potencial de descarbonização e os benefícios e limitações da utilização de biometano, tanto ao nível tecnológico como das infraestruturas de produção e abastecimento.
- **3. Análise das emissões de GEE:** Apresenta uma avaliação comparativa das emissões de GEE associadas às várias tecnologias de propulsão dos veículos pesados (elétricos a bateria, a pilha de combustível e a combustão interna a Diesel), considerando diferentes fontes de energia. Analisa-se também o impacto da origem da eletricidade e do hidrogénio nas emissões totais. É ainda incluída uma análise de sensibilidade, através da utilização do modelo CONCAWE, que permite avaliar a influência de diferentes parâmetros nas emissões, destacando a importância da matriz energética e da combinação tecnológica na descarbonização do setor.
- **4. Análise do Potencial de Implementação do biometano no setor dos transportes e cenários futuros para a implementação:** Neste capítulo analisa-se a viabilidade da implementação do biometano no setor dos transportes pesados em Portugal, com base nos dados disponíveis em fontes científicas e institucionais. Inclui-se uma estimativa do número de veículos que poderão ser abastecidos com biometano tendo em conta os planos de produção nacionais. Por fim, são sugeridas estratégias e medidas para impulsionar o desenvolvimento do mercado de biometano em Portugal.
- **5. Análise global – Emissões GEE e TCO:** Apresenta uma análise comparativa global considerando as tecnologias que apresentam melhor desempenho na redução das emissões de GEE ao longo do ciclo de vida (*Life Cycle Assessment - LCA*) e no custo total de propriedade (TCO).
- **6. Conclusões:** Apresenta as conclusões finais do estudo, destacando os principais resultados obtidos e refletindo sobre o papel do biometano como uma alternativa sustentável ao Diesel nos transportes pesados, bem como os desafios e oportunidades para a sua implementação em Portugal.



## 2. Revisão Bibliográfica

---

O presente capítulo é dedicado à revisão bibliográfica, onde se identificam e analisam diversos artigos científicos, relatórios técnicos e outros documentos relevantes que fundamentam o estudo da viabilidade do biometano no setor dos transportes pesados em Portugal. Esta revisão visa enquadrar teoricamente o tema, destacando as principais estratégias de implementação do biometano, os seus benefícios e limitações, bem como a sua eficácia na redução das emissões de GEE, em comparação com outras tecnologias de sistemas de propulsão atualmente disponíveis.

No **Anexo A**, encontra-se uma compilação alargada de estudos que deram suporte à elaboração deste trabalho, sendo que apenas os mais relevantes e significativos são referidos e aprofundados ao longo das secções seguintes.

O presente capítulo está organizado nas seguintes secções:

- 2.1 Diretivas Europeias e Enquadramento Legislativos;
- 2.2 Plano de Ação para o Biometano 2024-2040 para Portugal;
- 2.3 Categorias de Veículos Pesados e Sistemas de Propulsão;
  - 2.3.1 Categorias de Veículos Pesados;
  - 2.3.2 Sistemas de Propulsão;
- 2.4 Revisão dos trabalhos sobre a análise TCO;
- 2.5 Revisão dos trabalhos acerca do Biometano.

### 2.1. Diretivas Europeias e Enquadramento Legislativo

---

O setor dos transportes de veículos pesados desempenha um papel importante na sociedade, sendo fundamental na mobilidade de produtos e pessoas. No entanto, este setor apresenta uma parcela significativa das emissões de CO<sub>2</sub> para a atmosfera, como também um uso intensivo de recursos, como por exemplo, combustíveis fósseis e extração de minerais, que também contribuem para esse efeito. Existe por isso uma grande dificuldade para encontrar soluções que permitam assegurar a descarbonização deste setor e dessa forma poder atingir as metas estabelecidas pela União Europeia em termos de emissões de GEE.

Com base em algumas análises da literatura, observa-se que existe uma grande necessidade de otimizar as frotas com a introdução de tecnologias de zero emissões, de forma a reduzir o impacto ambiental deste setor.

Com base no relatório realizado em janeiro de 2025, pela *Association des Constructeurs Européens d'Automobiles* (ACEA), a Tabela 1 apresenta o número de veículos pesados a circular na EU em 2023

Tabela 1: Número de veículos pesados que circulam na EU, dados retirados acea (2025)

	Gasolina	Diesel	Baterias	Plug-in Híbrido	Híbrido Elétrico	Gás Natural	LPG	Outros	Desconhecidos
Portugal	0,0%	99,6%	0,0%	0,0%	0,0%	0,3%	0,0%	0,1%	0,0%
Espanha	0,0%	98,7%	0,1%	0,0%	0,0%	1,1%	0,0%	0,0%	0,0%
Suécia	1,0%	95,3%	0,6%	0,0%	0,0%	3,0%	3,0%	0,1%	0,0%
Dinamarca	0,6%	97,5%	1,0%	0,0%	0,8%	0,0%	0,0%	0,0%	0,2%
Finlândia	2,6%	96,5%	0,1%	0,0%	0,0%	0,6%	0,0%	0,2%	0,0%
Noruega	2,5%	94,6%	1,3%	0,0%	0,0%	1,5%	0,0%	0,0%	0,0%
Alemanha	1,4%	97,1%	0,3%	0,0%	0,2%	0,6%	0,1%	0,2%	0,0%
Suíça	2,5%	94,6%	1,3%	0,0%	0,0%	1,5%	0,0%	0,0%	0,0%
União Europeia	0,6%	96,4%	0,1%	0,0%	0,1%	0,8%	0,1%	0,1%	1,8%

Analisando os dados apresentados na Tabela 1 verifica-se que os veículos que circulam em maior número nas estradas Europeias são os veículos a Diesel, equipados com motor de combustão interna, representando uma percentagem de 96,4%.

Os países como a Suécia, Dinamarca, Noruega e Suíça são os que apresentam maiores percentagens de veículos pesados elétricos, embora comparando as percentagens dos pesados a combustão usando combustíveis Diesel e Gasolina não revelam uma mudança muito significativa.

Desta forma, existe uma necessidade urgente da EU implementar diretivas que modifiquem estes valores, de forma a diminuir as emissões de CO<sub>2</sub>.

Com base na Diretiva do Parlamento Europeu para a promoção das energias de fontes renováveis, os estados membros determinaram obrigações que exigem o seu aumento e uma redução da emissão de GEE de estufa no setor dos transportes. No “Artigo 25”, do documento “DIRETIVA (EU) 2023/2413” são apresentas as seguintes estratégias para atingir estes objetivos:

- Atingir uma quota de energias renováveis (combustíveis renováveis e eletricidade) a partir de fontes renováveis que estabeleçam uma quota no consumo final de energia no setor de transportes de, pelo menos, 29% até 2030 ou uma redução dos gases de GEE de pelo menos de 14,5% até 2030, em comparação com o valor estabelecido de referência no artigo;
- Já a quota de biocombustíveis avançados e biogás produzido a partir das matérias-primas, e de combustíveis renováveis de origem não biológica na energia fornecida ao setor dos transportes é de, pelo menos, 1% em 2025 e 5,5 % em 2030, dos quais

uma quota de 1% é de combustíveis renováveis de origem não biológica em 2030, Diretivas EU (2023).

Assim, com base nestas diretrizes, várias investigações têm procurado apontar alternativas. No entanto, apesar da descarbonização no setor dos transportes pesados ser indispensável — não apenas para reduzir as emissões de CO<sub>2</sub>, como também para apoiar empresas que detêm frotas de transporte — torna-se crucial dispor de informação relevante para a definição da melhor estratégia na aquisição de tecnologias de transporte, adequadas ao perfil de missão e às necessidades operacionais do dia a dia das empresas deste setor.

No sentido de contribuir para a descarbonização no setor dos transportes de veículos pesados, é particularmente importante analisar a utilização de biocombustíveis avançados e biometano. Neste mesmo sentido será analisado, de seguida, o Plano de Ação para o Biometano 2024-2040 para Portugal.

## **2.2. Plano de Ação para o Biometano 2024-2040 para Portugal**

---

O setor dos transportes pesados tem um enorme impacto no meio ambiente, assim a EU estabeleceu metas ambiciosas, para a descarbonização de emissões que influencia, os vários países, construtores, empresas e a sociedade.

Com base neste acordo, Portugal apresentou um conjunto de investimentos e reformas no âmbito da REPowerEU, que tem como objetivo apoiar as suas ambições em termos de independência energética e transição ecológica, no contexto das novas condições geopolíticas e do mercado da energia. Para promover o aumento da utilização de gases renováveis no processo de descarbonização do país, com especial foco na indústria e no setor dos transportes, enquanto promove a economia circular e a valorização dos resíduos, Portugal incluiu uma reforma dedicada à promoção da produção e do consumo de biometano sustentável, criando as condições necessárias para o desenvolvimento da sua economia em Portugal.

Portanto, existe um apoio à criação de um mercado interno do biometano, tanto para apoiar a produção como para incentivar o consumo. O Plano Nacional Energia e Clima 2030 (PNEC 2030) estabelece a adoção do plano de ação para o biometano em Portugal, de forma a dar continuidade aos compromissos assumidos de garantir a transição energética enquanto promove a competitividade e reduz as emissões de gases de GEE.

O PAB estabelece uma estratégia integrada e sustentada para o desenvolvimento do mercado do biometano em Portugal. Este plano surge como um instrumento essencial para promover a transição energética, reforçando a sustentabilidade social e ambiental do país. A estratégia delineada pelo PAB está estruturada em duas fases. A primeira fase foca-se na criação do mercado do biometano em Portugal, garantindo as condições necessárias para a sua

implementação e expansão inicial. Já a segunda fase tem como objetivo o reforço e consolidação desse mercado, assegurando a sua estabilidade e viabilidade a longo prazo.

Dada a urgência da descarbonização e da independência energética, a aprovação do PAB é considerada inadiável e indispensável. Este plano não só viabiliza a concretização das políticas públicas de transição energética, fundamentais para a transformação da economia nacional, como também é essencial para o cumprimento dos compromissos assumidos por Portugal no âmbito do Plano de Recuperação e Resiliência (PRR), PAB (2024).

## **2.3. Categorias de Veículos Pesados e Sistemas de Propulsão**

---

As categorias de veículos pesados variam de acordo com a sua aplicação, capacidade de carga e regulamentação específica. Além disso, os sistemas de propulsão desses veículos têm evoluído para atender às exigências de eficiência energética e sustentabilidade ambiental. Atualmente, os principais tipos de sistemas de propulsão incluem os motores equipados com motores a combustão interna, veículos elétricos, veículos híbridos, o gás natural e o biometano, são combustíveis alternativos para veículos equipados com motores de combustão.

Cada tecnologia apresenta vantagens e desafios específicos, influenciando a escolha conforme a operação e infraestrutura disponíveis. De seguida, são apresentadas as categorias dos veículos pesados e as suas diversas soluções de sistema de propulsão.

### **2.3.1. Categorias de Veículos Pesados**

---

Os veículos pesados são classificados com base em fatores como configuração de eixos, tipo de chassis e capacidade de carga. Essa categorização permite diferenciar veículos pesados utilizados para transporte urbano, regional e de longa distância. Além disso, as características estruturais e técnicas influenciam a eficiência, consumo de combustível e aplicação em diferentes setores da economia.

Com base na apresentação realizada pela *Vehicle Energy Consumption calculation Tool* (VECTO), a Tabela 2 mostra a caracterização dos veículos pesados e os diferentes perfis de missões e características para cada utilidade.

Tabela 2: Caracterização dos veículos pesados, informações retiradas (EU Commission, 2018)

Configuração dos eixos	Grupo	Configuração do chassi	Carga útil máxima permitida	Perfis de missão
<b>4x2</b>	1	Rígido ou Trator	7.5 - 10	DU e DR
	2	Rígido ou Trator	>10 - 12	DU, DR e LH
	3	Rígido ou Trator	>12 - 16	DU e DR
	4	Rígido	>16	DU, DR e LH
	5	Trator	>16	DU, DR e LH
<b>6x2</b>	9	Rígido	Todos os pesos	DU, DR, LH e UM
	10	Trator	Todos os pesos	DU, DR e LC
<b>6x4</b>	11	Rígido	Todos os pesos	DU, DR, LH, UM e C
	12	Trator	Todos os pesos	DU, DR, LH e C
<b>8x4</b>	16	Rígido	Todos os pesos	C

Notas de tabela: DU - Distribuição Urbana DR - Distribuição Regional LH - Longo Curso UM - Utilidades Municipais C – Construção

### 2.3.2. Sistemas de Propulsão

A evolução dos sistemas de propulsão de veículos pesados tem sido fortemente impulsionada pelas necessidades de maior eficiência energética, de redução de emissões e de adaptação às exigências das regulamentações ambientais. Dos tradicionais motores de combustão interna às alternativas eletrificadas e mais sustentáveis, cada tecnologia apresenta características específicas que influenciam a sua aplicação no transporte. Assim, nesta secção são apresentados, as principais alternativas de propulsão para veículos pesados, nomeadamente os motores diesel, os elétricos a bateria e a pilhas de combustível, a gás natural, os de combustão de hidrogénio e as configurações *dual-fuel*.

## Diesel

A Figura 1 mostra um sistema de propulsão a Diesel, onde também é possível utilizar os combustíveis e-Diesel e *Hydrotreated Vegetable Oil* (HVO).

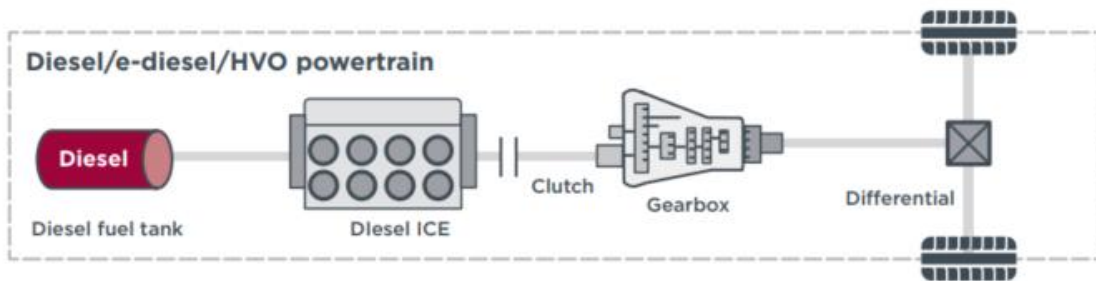


Figura 1: Sistema de Propulsão de um veículo pesado Diesel, retirada de Basma e Rodriguez, (2023 b)

No setor dos veículos pesados, o sistema Diesel é o mais utilizado devido à sua fiabilidade e eficiência, adequando-se assim para qualquer perfil de utilização. Este utiliza um motor de combustão onde obtém energia mecânica a partir do consumo de energia química de combustível.

As principais vantagens desta tecnologia são: eficiência, gera elevado binário, e têm uma elevada vida útil, (cummins, 2023).

As suas principais desvantagens são: as emissões gases e poluentes e o ruído (cummins, 2023).

## Veículos pesados a baterias (BEV – Battery Electric Vehicle)

Na Figura 2 é apresentado um sistema de propulsão Elétrico.

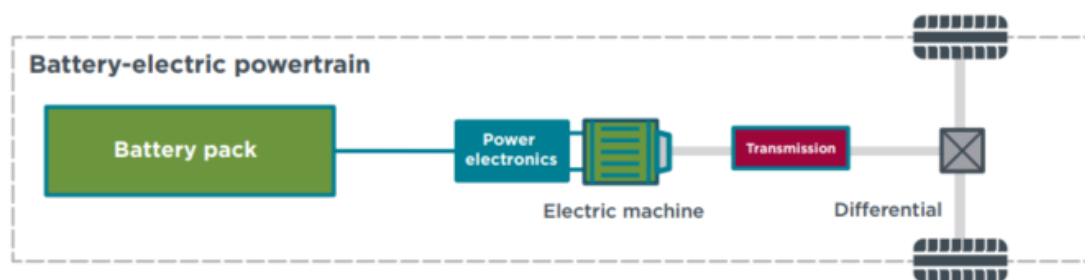


Figura 2: Sistema de Propulsão de um veículo pesado BEV, retirada de Basma e Rodriguez, (2023 b)

Os veículos pesados elétricos (BEV) utilizam exclusivamente energia elétrica armazenada em baterias recarregáveis para alimentar motores elétricos, eliminando a necessidade de combustíveis fósseis.

As vantagens de usar esta tecnologia são: a redução das emissões no uso do transporte, a energia elétrica pode provir de fontes renováveis, o custo desta tecnologia tem vindo a

diminuir ao longo do tempo, a eficiência e desempenho desta tecnologia é superior comparando com o sistema diesel.

As desvantagens são: o tempo de vida das baterias, o número de postos de carregamento, o tempo de carregamento e custos iniciais (TE connectivity, s.d.).

## Gás Natural

Na Figura 3 é apresentado um sistema de propulsão a Gás Natural

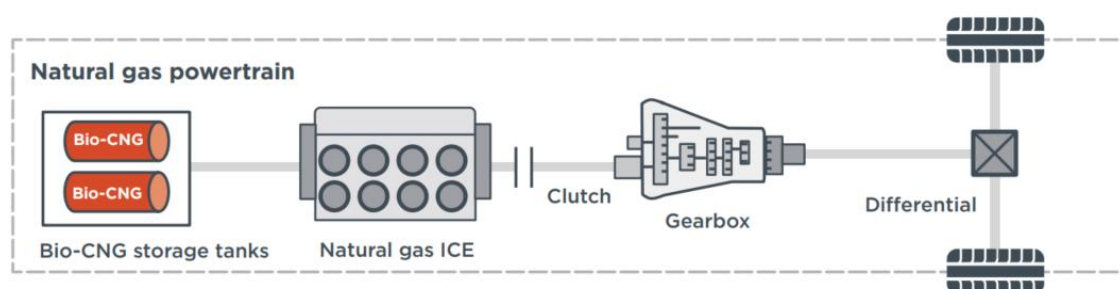


Figura 3: Sistema de Propulsão de um veículo pesado Gás Natural, retirada Basma e Rodriguez, (2023 b)

As suas vantagens são: menores consumos, redução de emissões e autonomia.

As desvantagens são: custos de aquisição e manutenção mais elevados e limitações nas infraestruturas de abastecimento, Rands (2022).

## Pilhas de combustível (FCEV - Fuel Cell Electric Vehicles)

Na Figura 4 é apresentado um sistema de propulsão a pilha de combustível.

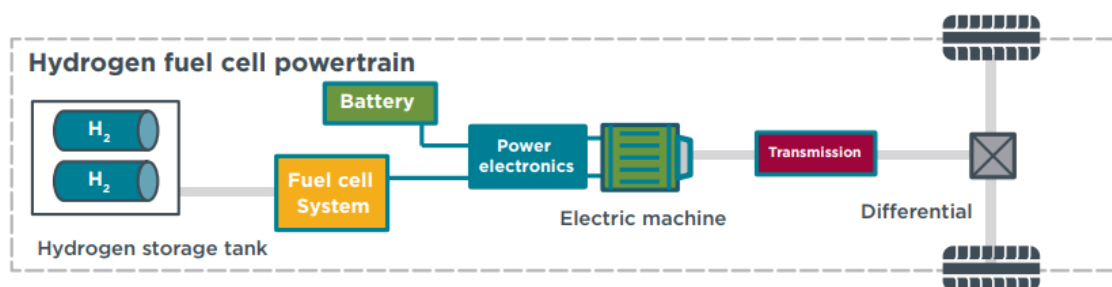


Figura 4: Sistema de Propulsão de um veículo pesado FCEV, retirada de Basma e Rodriguez, (2023 b)

Os veículos pesados a Fuel Cell funcionam convertendo hidrogénio gasoso em eletricidade através de pilhas de combustível integradas, que alimentam um motor elétrico (SCANIA Portugal, s.d.).

As vantagens deste sistema são: a não emissão de poluentes pelo veículo, rápido abastecimento, menos dependência de baterias (REPSOL, s.d.).

As desvantagens são: custo elevado, armazenamento e transporte do hidrogénio exigem sistemas complexos e limitação nas estruturas de abastecimento KNAUFINDUSTRIES (2022).

## Motores de combustão a Hidrogénio

A Figura 5 é apresentado um sistema de propulsão a Hidrogénio.

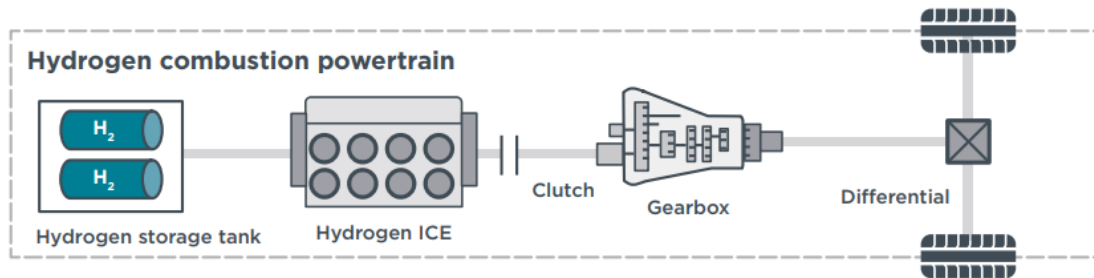


Figura 5: Sistema de Propulsão de um veículo pesado com combustão a Hidrogénio, retirada de Basma e Rodriguez, (2023 b)

Os veículos pesados com motores de combustão interna a hidrogénio funcionam de modo semelhante aos motores tradicionais, mas utilizam hidrogénio como combustível. O hidrogénio é armazenado em tanques de alta pressão e injetado diretamente na câmara de combustão, onde se mistura com o oxigénio do ar. Uma vela de ignição incendeia esta mistura, produzindo uma reação química que liberta energia na forma de calor. Esta é então convertida pelo motor em energia mecânica para impulsionar o veículo.

Este sistema tem como vantagens: abastecimentos rápidos, redução das emissões e adaptação de motores de combustão. (Quasis energia, 2024)

As desvantagens são: Armazenamento de Hidrogénio e emissões de  $NO_x$  (Quasis energia, 2024).

## Motores *Dual Fuel*

Na Figura 6 apresenta um sistema a *Dual Fuel*.

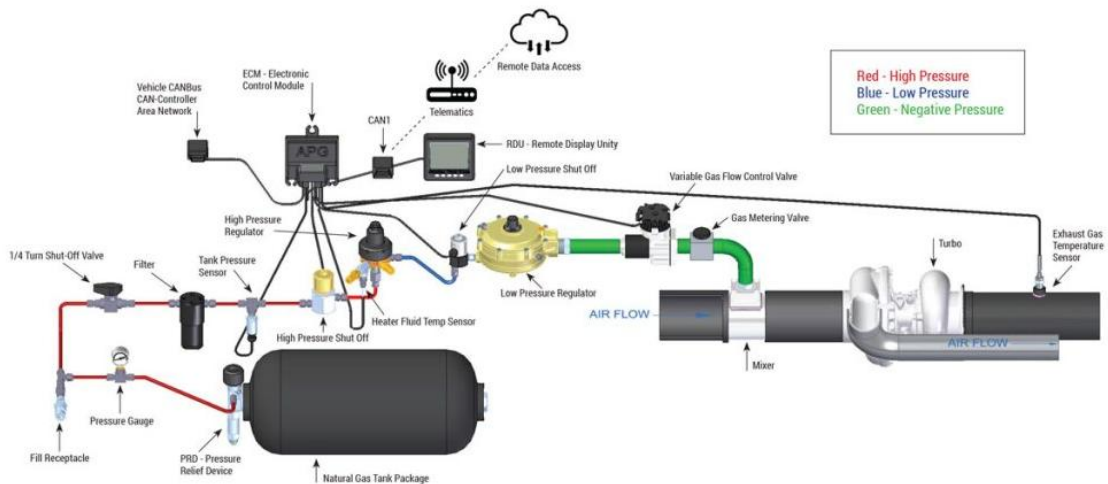


Figura 6: Sistema de Propulsão de um veículo pesado com combustão a *Dual Fuel*, retirado de (AMERICAN POWER GROUP, s.d.)

Os veículos pesados a *dual fuel* operam utilizando simultaneamente dois combustíveis, geralmente diesel e gás natural. Neste sistema, o gás natural é misturado com o ar de admissão e introduzido na câmara de combustão, uma quantidade reduzida de diesel é então injetada para inflamar a mistura, devido à sua propriedade de ignição por compressão (Landirengo 1, s.d.).

As vantagens deste sistema são: redução das emissões de CO<sub>2</sub>, baixo investimento inicial e bom desempenho do motor (Landirengo 2, s.d.).

As desvantagens são: em comparação com os motores a diesel tem uma ligeira perda de potência e manutenção adicional devido ao menor tempo de vida útil (LNG AUTOMOTIVE PARTS, s.d.).

## 2.4. Revisão dos trabalhos sobre a análise TCO

Um dos objetivos do presente trabalho é apresentar uma análise de TCO, das pesquisas realizadas. Neste contexto, a revisão bibliográfica efetuada permitiu identificar os trabalhos mais relevantes nesta área, nomeadamente os estudos realizados por Basma e Rodriguez.

Nesta secção serão destacados os principais pontos relevantes dos estudos analisados, com vista a fundamentar o desenvolvimento da presente investigação. No **anexo A** são apresentados todos os artigos consultados como base para esta investigação. No entanto,

apenas os mais relevantes serão abordados no relatório, de forma a assegurar a objetividade e a concisão do documento.

O trabalho desenvolvido pelos autores Basma e Rodriguez, (2023 a) apresenta uma análise detalhada das trajetórias de descarbonização para o mercado europeu de veículos pesados até 2040, destacando a importância de tecnologias de emissão zero. Este estudo avalia a relação custo eficiência de diferentes estratégias de redução das emissões de CO<sub>2</sub> para os veículos pesados (*Heavy Duty* -HD, na literatura inglesa).

O estudo foca-se nas seguintes quatro tecnologias: Motor de Combustão Interna (MCI) Diesel, MCI - Gás Natural Liquefeito (GNL), BEV e FCEV.

Para analisar o impacto nas emissões de CO<sub>2</sub>, o estudo considera 2 cenários:

- 1º cenário: políticas adotadas que consiste nas políticas e regulamentações estipuladas pela União Europeia para a redução de emissões de CO<sub>2</sub>. As metas de redução de emissões são definidas visam uma redução de 30% nas emissões de CO<sub>2</sub> até 2030 e também até 2040 a mesma redução.
- 2º cenário: metas propostas consiste na apresentam de metas mais ambiciosas que vão para além das políticas adotadas. As propostas incluem a ação de redução de 60% nas emissões de CO<sub>2</sub> até 2030 e uma redução total de 100% até 2040. Este cenário é projetado para avaliar o impacto de uma abordagem mais agressiva em relação à descarbonização.

Inicialmente, os autores apresentam as tendências de mercado, de forma a salientar a categoria de veículos pesados, mais relevantes para o estudo. A Figura 7 apresenta as ações (*share*) de mercado de acordo com os dados da VECTO em 2020.

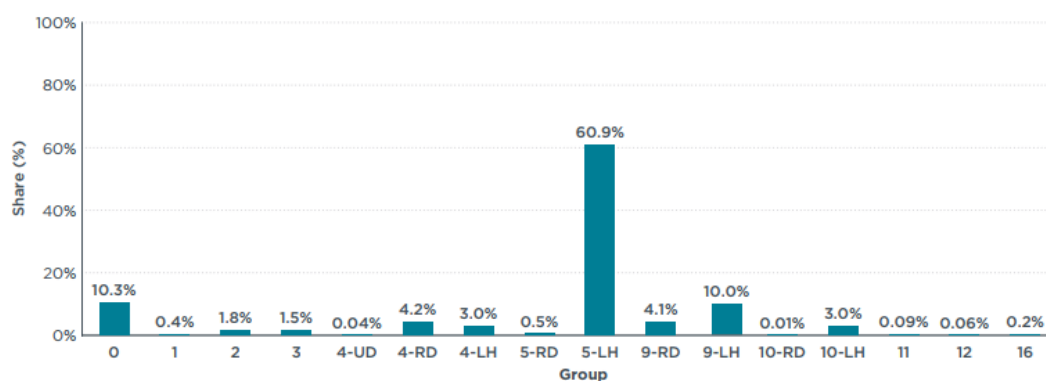


Figura 7: Ações do mercado de acordo com os dados da VECTO em 2020, retirado de Basma e Rodriguez, (2023 a)

A Figura 7 mostra que as categorias: 5-LH (60.5%), 9-LH (10%), 0 (10.3%) e 4-RD (4.25%) são as mais relevantes. É importante salientar que o grupo 5-LH entre outros são divididos em distâncias de 500 km, 800 km e 1000 km para refletir diferentes perfis de operação e uso, que são cruciais para a análise TCO e da viabilidade das tecnologias de descarbonização. As razões para a divisão deste segmento são:

- Perfis de uso diferentes: cada uma dessas distâncias representa um cenário operacional distinto. Os veículos pesados que operam em distâncias de 500 km geralmente retornam à sua origem no final do dia, enquanto aqueles que percorrem 1000 km podem estar envolvidos em operações de longa distância que não permitem o retorno diário à origem;
- Dimensionamento da infraestrutura de carregamento: a distância percorrida influencia o dimensionamento das baterias e dos sistemas de armazenamento de energia. Os veículos pesados que operam em distâncias mais longas exigem soluções de carregamento mais robustas e eficientes;
- Análise de custos: a divisão por distâncias permite uma análise mais detalhada dos custos operacionais, incluindo consumo de combustível, manutenção e custos de infraestrutura, que podem variar significativamente com base na distância percorrida.
- Impacto nas emissões GEE: diferentes distâncias também afetam as emissões de gases de efeito estufa e a eficiência energética, permitindo uma avaliação mais precisa do impacto ambiental de cada tecnologia;
- Adoção de tecnologias: a segmentação ajuda a identificar quais as tecnologias mais adequadas para cada tipo de operação, facilitando a transição para soluções de transporte mais sustentáveis.

Posto isto, os autores observaram os seguintes resultados com base nos 2 cenários apresentados:

- No cenário 2 - metas propostas, é necessária uma redução de 60% das emissões de CO<sub>2</sub> até 2030, o que resultará numa quota de mercado de 57% da BEV até 2030;
- Considerando uma redução de 100% de redução das emissões de CO<sub>2</sub> até 2040, a quota de mercado dos BEV será de 73% Basma e Rodriguez, (2023 a).

Na análise TCO, os parâmetros a ter em consideração para a realização do *Capital Expenditure* (CAPEX), *Operational Expenditure* (OPEX) e *Total Savings* foram definidos da seguinte forma: CAPEX corresponde aos investimentos iniciais em ativos fixos, OPEX refere-se aos custos operacionais contínuos, e *Total Savings* representa a economia total alcançada através da redução destes custos. Para a obtenção destes parâmetros os autores analisaram:

- Preço de venda dos veículos pesados (Preço de retalho): traduz-se no custo de aquisição inicial;
- Custos de combustíveis e energia: estimativas baseadas na eficiência de combustível do veículo, quilómetros anuais e preços de combustíveis;
- Custo de manutenção: despesas relacionadas à manutenção regular e reparações do veículo ao longo de sua vida útil;
- Valor residual (Fim de Vida): o valor que o veículo terá ao final de seu ciclo de vida, que pode ser considerado na análise de custo;
- Despesas Operacionais (OPEX): custos contínuos associados à operação do veículo, incluindo seguros, impostos e taxas;

- Custo de emissões de CO<sub>2</sub>: considerações sobre custos externos relacionados às emissões de GEE, que podem impactar a análise de custo-benefício;
- Taxas de desconto: utilizadas para calcular o valor presente dos fluxos de caixa futuros, refletindo o custo do capital.

É importante de salientar que estes parâmetros são convertidos para fluxos de caixa ao longo do estudo, ajudando a obter uma visão abrangente dos custos associados à propriedade e operação do veículo pesado. Esta análise é importante porque ajuda o consumidor a tomar decisões informadas sobre a aquisição de um veículo/tecnologia, considerando todos os custos associados ao mesmo.

As principais conclusões que resultam da realização deste estudo são:

- No cenário 1 das políticas adotadas: embora a redução de emissões de CO<sub>2</sub> sejam possíveis, os custos adicionais para os fabricantes e consumidores podem ser mais elevados, resultando numa adoção mais lenta de tecnologias de emissão zero. As economias de custo para os utilizadores de veículos foram moderadas, refletindo a transição gradual para tecnologias com menor emissão de CO<sub>2</sub>;
- No cenário 2 das metas propostas: o estudo revelou que haveria um impulso maior para a adoção de tecnologias de emissão zero, resultando em economias de custo mais significativas para os utilizadores. A análise sugere que, com políticas mais ambiciosas, os benefícios sociais e económicos aumentariam, com uma maior redução das emissões de CO<sub>2</sub> e economias substanciais ao longo do tempo;
- Prevê-se que os veículos pesados elétricos dominem os novos veículos pesados no mercado europeu até 2040, enquanto os FCEV desempenharão provavelmente um papel secundário. A eletrificação apresenta custos mais baratos e melhor cumprimento de objetivos de redução de emissões comparativamente ao diesel. A eletrificação é fiável expecto em veículos pesados de longa distância. Nesse caso, um aperfeiçoamento da tecnologia diesel entre 10% e 15% seria suficiente para atingir a meta. No entanto, veículos pesados de longa distância com quilómetros diários acima de 500 km ainda serão caros para eletrificar e continuarão a depender de tecnologias diesel;
- São necessários investimentos mais significativos para cumprir a ambição de redução de CO<sub>2</sub> necessária entre 2030 e 2040;
- A via de descarbonização com melhor relação custo-eficácia implica uma mudança gradual para a eletrificação dos veículos pesados a partir de 2030, sem explorar plenamente a redução de CO<sub>2</sub>;
- Objetivos de redução de CO<sub>2</sub> mais elevados proporcionarão poupanças de custos significativas para o consumidor;
- Objetivos de redução do CO<sub>2</sub> mais ambiciosos podem reduzir significativamente as emissões de GEE e proporcionar maiores poupanças de custos para a sociedade Basma e Rodriguez, (2023 a).

Outro estudo desenvolvido por Basma e Rodriguez, (2023 b) uma análise comparativa do TCO associado a diferentes tecnologias de veículos pesados e tipos de combustíveis no contexto europeu. O foco principal da investigação incide sobre a transição de frotas movidas a diesel para soluções de transporte com menores emissões de carbono, visando apoiar a descarbonização do setor rodoviário.

O estudo apresenta uma análise comparativa entre diferentes tecnologias de propulsão e combustíveis alternativos face à tecnologia convencional a diesel, com base no TCO.

As tecnologias avaliadas incluem motores de combustão interna: Diesel (referencia), e-diesel, bem como biocombustíveis de baixo teor de emissões GEE, como o *Hydrotreated Vegetable Oil* (HVO) e o BIO-CNG (gás natural comprimido de origem biológica), hidrogénio (MCI-H<sub>2</sub>); e sistemas de propulsão alternativos: BEV, FCEV.

A Figura 8 apresenta estas tecnologias em comparação com o diesel, com base nos resultados da análise TCO.



Figura 8: Comparação de TCO's das diferentes tecnologias usando como baseline o Diesel, retirada de Basma e Rodriguez, (2023 a)

Na Figura 8, observa-se que em 2030 e 2040 os veículos pesados que destacam-se pelas suas TCO's são os BEV's e FCV's devido ao aperfeiçoamento da tecnologia quer a nível dos próprios veículos quer a nível das infraestruturas.

Este artigo utiliza novamente o *software* VECTO para o cálculo das emissões das várias tecnologias e foca-se nos seguintes segmentos: 5-LH (4x2), 4-RD (4x2), 3 (4x2) e 54 (4x2). Como no estudo anterior o segmento 5-LH (4x2) e novamente repartido para refletir diferentes perfis de operação e uso. O estudo analisou veículos pesados que percorriam distâncias longas (500 km, 800 km e 1000 km).

Este estudo avaliou diferentes cenários de custo, levando em conta:

- Variações nos preços de combustível e energia ao longo do tempo;
- Custos de manutenção e operação associados a cada tecnologia;

- Impactos de políticas regulatórias e incentivos governamentais.

Com base nestes objetivos os autores estruturam o estudo da seguinte maneira:

- Metodologia TCO: a metodologia de TCO que considera todos os custos associados à propriedade e operação de veículos pesados ao longo da sua vida útil. Isso inclui custos fixos (como aquisição e financiamento) e custos operacionais (como combustível, manutenção e seguros). Análise de Dados: Foram adquiridos dados sobre preços de veículos pesados, custos de combustível, custos de manutenção e outros fatores econômicos relevantes. Esses dados foram utilizados para calcular os custos totais de diferentes tecnologias de veículos pesados;
- Simulações e Modelos: o estudo utilizou modelos de simulação para estimar o consumo de energia e a eficiência de diferentes tecnologias de propulsão. Isso incluiu simular desempenhos de veículos pesados BEV, veículos pesados FCEV e veículos pesados Diesel;
- Cenários de Análise: o estudo considerou vários cenários, incluindo diferentes classes de veículos pesados e tecnologias de propulsão, além de variações nos preços de combustível e políticas regulatórias. Isso permitiu uma análise abrangente das opções de descarbonização.

Com base neste estudo realizado pelos autores, estes utilizam os seguintes parâmetros, para calcular a TCO. Os parâmetros utilizados foram:

- Custos Fixos e Operacionais: a metodologia avalia tanto os custos fixos (como o preço de compra do veículo) caso os custos operacionais (como manutenção, combustível e seguros);
- Preço de Aquisição: o custo inicial de aquisição do veículo é um fator crucial na análise;
- Valor Residual: o valor estimado que o veículo terá ao final de sua vida útil, que é considerado na análise de custo;
- Custos de Financiamento: inclui os custos associados ao financiamento da compra do veículo;
- Custos de Infraestrutura: considera os investimentos necessários em infraestrutura, como estações de carregamento ou abastecimento;
- Despesas Operacionais: inclui custos com combustível ou energia, manutenção, mão de obra, impostos e taxas;
- Período de Propriedade: o modelo assume um período de propriedade de cinco anos para calcular os fluxos de caixa descontados;
- Eficiência Energética: a eficiência de consumo de combustível ou energia dos diferentes tipos de veículos pesados é levada em conta.

Com base na análise TCO para encontrar a melhor estratégia de descarbonização dos veículos pesados na Europa obtiveram-se as seguintes conclusões:

- Os veículos pesados elétricos são a escolha mais viável na maioria das classes de veículos pesados antes de 2030. Para veículos pesados urbanos de médio e leve porte, os BEVs já alcançaram paridade de TCO com os veículos pesados a diesel;
- Para veículos pesados de longo alcance, espera-se que os BEVs atinjam a igualdade de TCO com os veículos pesados a diesel entre 2025 e 2026, dependendo dos quilómetros diários e do tamanho das baterias;
- Os FCEV devem alcançar a paridade de TCO com os veículos pesados a diesel cerca de dez anos depois, entre 2035 e 2036. Isso indica que, embora os veículos pesados a hidrogénio sejam uma opção promissora, sua viabilidade económica pode demorar mais para se concretizar;
- O estudo revelou que, mesmo em aplicações desafiadoras, como o transporte de longa distância, a tecnologia elétrica pode oferecer a solução mais económicas antes de 2030, desde que haja infraestrutura de carregamento público de alta potência disponível;
- A análise também salientou a importância de políticas públicas e investimentos em infraestrutura para apoiar a transição para tecnologias de veículos pesados mais limpas. A disponibilidade de estações de carregamento e incentivos governamentais são cruciais para a adoção de BEV's e a FCEV;
- O estudo comparou o desempenho económico de veículos pesados que utilizam combustíveis alternativos, como e-diesel e biocombustíveis, e concluiu que, embora esses combustíveis possam ter um papel na transição, os veículos pesados BEV e a FCEV apresentam vantagens económicas mais significativas a longo prazo (Basma e Rodriguez, (2023 b)).

A Figura 9 apresenta a evolução ao longo do tempo das diferentes tecnologias comparativamente ao diesel.

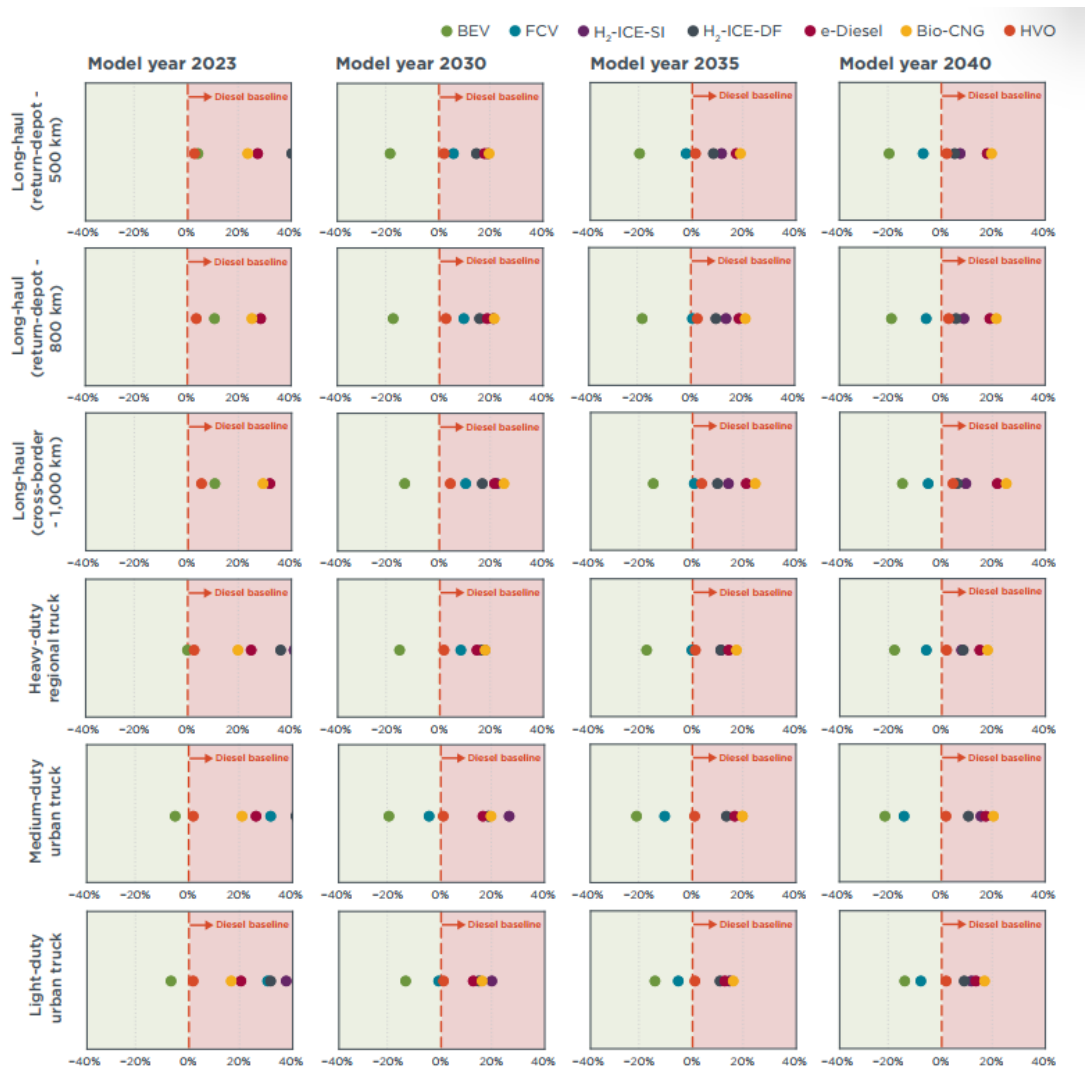


Figura 9: Evolução das tecnologias ao longo do tempo, retirado de Basma e Rodriguez, nov. 2023

Analisando a Figura 9, conclui-se que ao longo do tempo as tecnologias predominantes, para os custos de TCO são as BEV's e FCV's, devido a evolução da tecnologia nos transportes pesados e ao aperfeiçoamento das infraestruturas para estes.

## 2.5. Revisão dos trabalhos sobre o Biometano

---

Na secção seguinte serão apresentados artigos que apresentem as vantagens e desvantagens a utilização de biometano como também os tipos de processo de extração do combustível.

No estudo realizado por Pål Börjesson et al. (2016) é analisada a viabilidade da utilização de metano como combustível para veículos, destacando os benefícios em termos de redução de emissões de GEE em comparação com combustíveis fósseis. Com base neste artigo é possível perceber os diferentes sistemas de produção, distribuição e uso do metano, incluindo digestão anaeróbica e gasificação térmica, concluindo que os sistemas de metano renovável podem reduzir as emissões em mais de 80%. Além disso, o estudo avalia os custos de produção e distribuição, indicando que, embora os custos do metano renovável sejam comparáveis aos dos combustíveis fósseis, a eficiência energética e os impactos ambientais são significativamente melhores.

Este artigo começa por apresentar os principais objetivos da análise que são:

- Avaliar o desempenho energético do metano comparando com outras tecnologias de combustíveis;
- Analisar as emissões dos efeitos de GEE da produção do metano e também do uso deste;
- Realizar uma comparação dos custos de produção e distribuição de metano em relação a outros combustíveis, identificando a viabilidade econômica do metano como uma alternativa sustentável;
- Investigar os diferentes métodos de produção de metano, como digestão anaeróbica e gaseificação térmica, e as suas implicações para a sustentabilidade e eficiência;
- Identificar os benefícios do uso de metano como combustível renovável, bem como os desafios e barreiras que precisam ser superados para sua implementação em larga escala.

Com base neste estudo, observou-se que o metano é extraído e produzido através de diferentes processos como:

- Digestão anaeróbica: este é um processo biológico onde microrganismos decompõem matéria orgânica, como resíduos alimentares, estrume e outros materiais orgânicos, na ausência de oxigênio;
- Gaseificação Térmica: aqui materiais orgânicos, como resíduos florestais ou biomassa, são convertidos em gás através de um processo a alta temperatura na presença de um agente gaseificante (como vapor ou ar). O gás resultante contém metano, que pode ser separado e purificado para uso como combustível;
- Extração de Gás Natural: O metano também é encontrado em depósitos de gás natural, onde é extraído através de perfuração. O gás natural é uma fonte fóssil de metano e é utilizado diretamente como combustível em veículos na sua forma comprimida (CNG) ou liquefeita (LNG);

- Produção a partir de resíduos: o metano pode ser produzido a partir de resíduos sólidos urbanos e industriais, utilizando tecnologias de conversão que transformam esses resíduos em biogás.

Neste estudo são introduzidos três termos muito importantes no ciclo de vida dos veículos, sendo representativos de duas fases deste: *Well-to-Tank* (WTT) e *Tank-to-Wheel* (TTW). A primeira (WTT) traduz-se nos impactos referentes à produção e transporte do combustível até ao veículo, a segunda (TTW), representa a utilização do combustível no veículo. A conjugação de ambas é denominada de *Well-to-Wheel* (WTW).

Observando a análise *Well-to-Wheel* (WTW) constatou-se que com o uso do metano e especialmente o produzido a partir de fontes renováveis, pode levar a uma redução de GEE de, aproximadamente, 80% ou mais em comparação com veículos a gasolina e Diesel. Já a nível de eficiência energética o metano é comparável ou ligeiramente superior aos combustíveis fósseis. No entanto, a entrada de energia primária para sistemas de veículos a metano pode ser de 3% a 33% maior, dependendo do tipo de sistema de propulsão baseado em metano.

Na análise *Tank-to-Wheel* (TTW) as emissões de GEE para veículos pesados a metano (CNG e LNG) são geralmente mais baixas do que as de veículos a Diesel. Por exemplo, os veículos a gás natural comprimido têm emissões de GEE que são cerca de 22% mais baixas em comparação com veículos a gasolina, enquanto os veículos a biometano podem ter reduções de GEE superiores a 98%. O consumo de combustível nos veículos pesados a metano pode ser 10% a 25% maior comparado com os veículos pesados a diesel, dependendo do ciclo de operação.

Outros resultados observados foram que os veículos pesados a diesel têm uma eficiência energética melhor que o metano embora emitem mais emissões de CO<sub>2</sub> em comparação com o metano. Os biocombustíveis também oferecem reduções de GEE, mas a eficiência e os custos podem variar dependendo da fonte e do processo de produção.

Os sistemas de metano para veículos pesados apresentam vantagens significativas em termos de emissões, mas para o consumo de combustível pode ser um fator a ser considerado na análise de custo-benefício.

Assim, é necessário salientar que o uso de metano é benéfico para a redução das emissões de GEE comparativamente aos outros combustíveis, apresenta uma eficiência energética quase comparável ou ligeiramente superior ao dos combustíveis fósseis, os custos de produção a partir de fontes renováveis são comparáveis com os combustíveis fósseis e a minimização das perdas de metano durante a produção e distribuição é crucial para maximizar os benefícios ambientais. As perdas significativas podem reduzir a eficácia das reduções de GEE Pål Börjesson et al. (2016).

Em suma, a Tabela 3 apresenta os prós e contras do biometano nas infraestruturas e também nos veículos pesados.

Tabela 3: Prós e contras do biometano, informação retirada de Pål Börjesson et al. (2016)

	<b>Vantagens</b>	<b>Desvantagens</b>
<b>A nível de infraestruturas</b>	Menor impacto ambiental. Flexibilidade no abastecimento, uma vez que pode ser obtido através de várias fontes. Infraestruturas existentes (Em muitas regiões, a infraestrutura de gás natural já está estabelecida, permitindo a adaptação para o uso de metano sem a necessidade de grandes investimentos adicionais).	Investimento inicial. Limitações de rede. Complexidade de distribuição.
<b>A nível de veículos pesados</b>	Redução de emissões. Custo operacional. Desempenho a longas distâncias.	Menor densidade energética. Desempenho em climas frios. Tecnologia do motor (menos desenvolvido).

Para perceber as limitações mais importantes do biometano analisou-se o artigo dos autores Isabel Cañete Vela, H. T. (julho de 2018), que analisa a eficácia do *Life Cycle Assessment* (LCA) em relação aos combustíveis utilizados em veículos pesados, destacando a importância de considerar não apenas as emissões de GEE, mas também o ciclo de vida completo dos veículos. Com base neste estudo observa-se que existem algumas limitações no LCA, dificultando comparações e decisões informadas, devido a definições imprecisas de veículos, variações nas abordagens e limites dos sistemas analisados. Além disso, aponta a necessidade de incluir custos e a análise de recursos, sugerindo que futuras pesquisas devem focar em cenários de longo prazo que considerem a sustentabilidade e a reciclagem de materiais.

O estudo indica que veículos pesados a médias distâncias são melhores as alternativas de BEV, FCEV e combustíveis renováveis, mas a longa distância ainda continua a optar-se pelo diesel.

Este estudo apresenta uma enorme contribuição para estimar o ciclo de vida (LCA), uma vez que, apresenta pontos de limitações pertinentes em vários estudos que os autores observaram em várias análises.

No geral, este estudo analisa estudos que apresentam diversas limitações que podem comprometer a avaliação precisa do impacto dos veículos pesados. Assim seguidamente, estão estruturadas as principais limitações identificadas:

- 1. Disponibilidade Limitada de Estudos:**
  - a. Existe um número reduzido de relatórios que abordam a análise de veículos pesados.
- 2. Falta de Clareza na Definição do Veículo:**
  - a. Muitos estudos referem-se aos veículos pesados de forma genérica, sem especificar o tamanho ou o tipo do veículo.
- 3. Diferenças nas Abordagens e Limites do Sistema:**
  - a. Os estudos utilizam diferentes metodologias para avaliar o impacto ambiental dos veículos pesados;
  - b. A análise WTW considera a extração de recursos, produção e distribuição de combustíveis, bem como seu uso no veículo, embora essa abordagem seja eficaz para combustíveis fósseis, pode não ser suficiente para avaliar novas soluções de transporte.
- 4. Falta de Consideração para o Futuro e Limitações na Análise do Fim de Vida (EOL - *End of Life*):**
  - a. A maioria dos estudos foca na situação atual e não inclui projeções futuras sobre avanços tecnológicos e a evolução do mercado;
  - b. A ausência de dados sobre o fim de vida dos veículos pesados dificulta a avaliação dos impactos ambientais e económicos da reciclagem e reutilização de materiais;
  - c. Muitos estudos não consideram informações necessárias para fechar o ciclo de muitos materiais e componentes do grupo motopropulsor.
- 5. Utilização e Disponibilidade de Recursos:**
  - a. A disponibilidade de recursos é um fator essencial na avaliação da sustentabilidade, por exemplo materiais fundamentais para a eletrificação, como metais raros, não são devidamente abordados nos estudos;
  - b. O uso de materiais raros pode representar riscos ambientais e económicos.
- 6. Falta de Análise dos Custos:**
  - a. Muitos estudos não incluem a análise de custos na avaliação do ciclo de vida dos veículos pesados;
  - b. Exemplos de custos frequentemente ignorados:
    - i. Infraestrutura de recarga e baterias para veículos pesados totalmente elétricos;
    - ii. Custos de distribuição de hidrogénio;
    - iii. Custos de reciclagem.

Assim tendo em conta estas considerações pode-se obter uma avaliação do ciclo de vida, mais aproximada do real Isabel Cañete Vela, H. T. (julho de 2018).

## 3. Análise das emissões de GEE

---

### 3.1. Introdução

---

Este capítulo tem como objetivo aprofundar a análise das emissões de CO<sub>2</sub> associadas às diferentes tecnologias de transporte, bem como avaliar o papel do biometano enquanto alternativa sustentável no contexto da transição energética. Este capítulo apresenta uma quantificação e comparação das emissões de GEE provenientes de diversas soluções tecnológicas, abordando não só os veículos pesados que utilizam combustíveis fósseis, mas também as alternativas de baixo carbono. Serão ainda analisadas as diferentes fontes de produção de biometano e realizada uma análise de sensibilidade que permite compreender o impacto de diferentes variáveis nos resultados obtidos.

### 3.2. Metodologia

---

Na avaliação de emissões de GEE no setor dos transportes pesados, a seleção da ferramenta de modelação revela-se particularmente relevante para garantir uma avaliação às condições reais de operação. No presente estudo optou-se pelo modelo desenvolvido pela CONCAWE, em detrimento de outras alternativas, como o VECTO e o FASTSim. Os motivos que estiveram na base da escolha do modelo CONCAWE são os seguintes:

- i) o modelo da CONCAWE apresenta uma abordagem holística, considerando tanto o ciclo de vida total do combustível *Well-to-Wheel* (WTW) como o próprio uso pelo veículo *Tank-to-Wheel* (TTW). Dessa forma, proporciona uma avaliação mais completa às emissões globais de GEE, sendo particularmente relevante para a avaliação de alternativas de sistemas de propulsão e fontes de energia, como o gás natural, o hidrogénio, a eletrificação ou os biocombustíveis, que envolvem diferentes caminhos energéticos ao longo da cadeia de abastecimento.
- ii) o modelo da CONCAWE abrange uma vasta gama de tipos de veículos pesados e configurações de sistema de propulsão, sendo particularmente flexível e adaptado às necessidades do transporte pesado de mercadorias, ao contrário de outras ferramentas, como o modelo FASTSim, que estão mais focadas no transporte de passageiros e em veículos ligeiros. Por seu lado, o modelo VECTO é uma ferramenta normalizada principalmente para certificar o consumo de combustível e as emissões de CO<sub>2</sub> de determinados tipos de veículos pesados, sendo menos adequada para uma avaliação comparativa de diferentes alternativas de sistemas de propulsão ao longo de todo o ciclo de vida.

Em suma, a opção pelo modelo da CONCAWE proporciona uma avaliação mais robusta, detalhada e adequada ao objetivo do presente estudo, que consiste em comparar diferentes alternativas de sistemas de propulsão de veículos pesados quanto às suas emissões de GEE. A sua abordagem de ciclo de vida, aliada à capacidade de permitir considerar diferentes fontes de energia e configurações de veículos, torna-o particularmente apropriado para apoiar uma avaliação comparativa informada e relevante.

### **3.3. Análise das emissões de CO<sub>2</sub> para diferentes tecnologias**

---

#### **3.3.1. Apresentação da metodologia - CONCAWE**

---

Para a avaliação de emissões de GEE, para diferentes tecnologias de veículos pesados, usou-se o modelo desenvolvido pela CONCAWE e IFP Energies Nouvelles. Esta ferramenta permite analisar as emissões de GEE ao longo do ciclo de vida dos veículos, comparando diversas combinações de sistemas de propulsão e fontes de energia. Baseando-se em dados científicos e publicações reconhecidas, o modelo CONCAWE permite efetuar uma análise consistente das emissões associadas a cada tecnologia.

Dado que o setor dos transportes é responsável por cerca de um quarto das emissões totais de GEE na União Europeia, a CONCAWE inclui no seu modelo diferentes tecnologias com o objetivo de contribuir para a descarbonização do setor dos transportes, como: veículos elétricos a bateria (BEV), motores de combustão interna (ICEV) com combustíveis de baixo carbono, veículos elétricos híbridos (HEV/PHEV), e veículos a pilha de combustível (FCEV).

Estes sistemas com as suas características de funcionamento, são usados para descrever uma avaliação ciclo de vida, de uma determinada tecnologia. A Figura 10 mostra uma representação esquemática de uma avaliação de ciclo de vida que inclui uma componente energética e uma componente ao nível dos materiais. Tal como é possível observar na Figura 10, em termos energéticos existe uma componente relacionada com a produção e fornecimento de energia do poço ao tanque (WTT - *Well to Tank*), e uma componente relacionada com a utilização da energia no veículo, isto é, do tanque à roda (TTW - *Tank to Wheel*), e que se traduz na análise global do poço à roda (WTW - *Well to Wheel*). A componente relativa aos materiais inclui três fases: fase de produção, fase de utilização e fim de vida. Neste contexto, é importante notar que o presente estudo se foca na avaliação da componente energética.

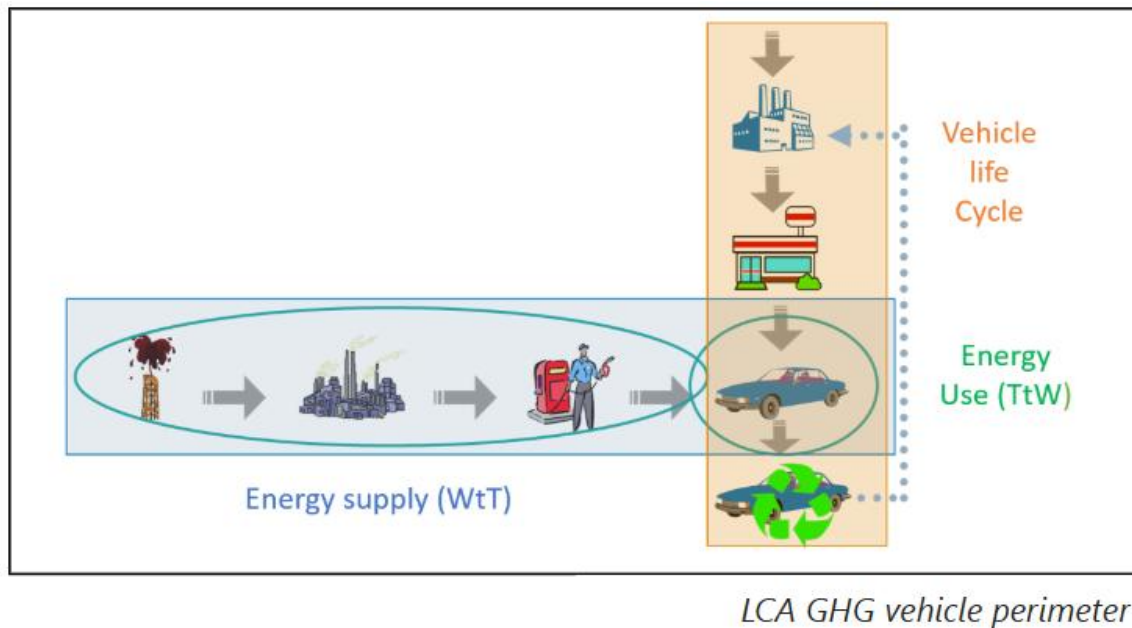


Figura 10: Esquemático de uma LCA, retirada de Concaawe (2023)

Em termos de sistema de propulsão e de fonte de energia, o modelo CONCAWE combina os seguintes parâmetros para especificar casos de estudo:

- 6 sistemas de propulsão e as respectivas características: motor de combustão interna - ICEV - utilizando diferentes combustíveis: diesel (referência) e combustíveis alternativos, que inclui: biocombustíveis (HVO, entre outros), gás natural (comprimido CNG e liquefeito LNG) e hidrogénio; e sistemas de propulsão alternativos: híbridos (HEV e PHEV), elétricos (BEV e CEV) e elétricos a pilha de combustível (FCEV);
- 5 categorias de veículos: veículos pesados de longo curso - LH (classe 5), veículos pesados de entregas (classe 2), autocarros urbanos/citadinos, autocarros de longa viagem (inter-regional) e veículos pesados do lixo;
- 5 categorias de fontes de energia: diesel; combustíveis alternativos: CNG, LNG e hidrogénio; e eletricidade;

O modelo CONCAWE utiliza o *software* Simcenter Amesim para simular o desempenho, o consumo de combustível e as emissões dos veículos. O *software* está calibrado com base na ferramenta VECTO (da Comissão Europeia), apresentando um erro inferior a 2% no consumo de combustível. A partir dos consumos energéticos apresentados em: L/100km, kg/100km ou kWh/100km, o modelo CONCAWE converte os dados em emissões de CO<sub>2</sub>eq, utilizando os fatores de WTT, TTW e CO<sub>2</sub> reciclado. Adicionalmente, tem em consideração as emissões relativas ao processo de produção do veículo, emissões de fabrico, N<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub> e outras emissões indiretas para estimar as emissões totais do ciclo de vida (gCO<sub>2</sub>eq/t.km) Smague (2024).

Para os veículos pesados de transporte de mercadorias, as emissões de CO<sub>2</sub>eq são expressas nas unidades: gCO<sub>2</sub>eq/t.km, que corresponde às emissões de GEE por tonelada transportada

por quilómetro — ou seja, é uma métrica de eficiência por carga transportada, não por veículo.

O modelo CONCAWE é utilizado através de uma interface online que apresenta 5 classes de veículos pesados, tal como apresentado na Figura 11.

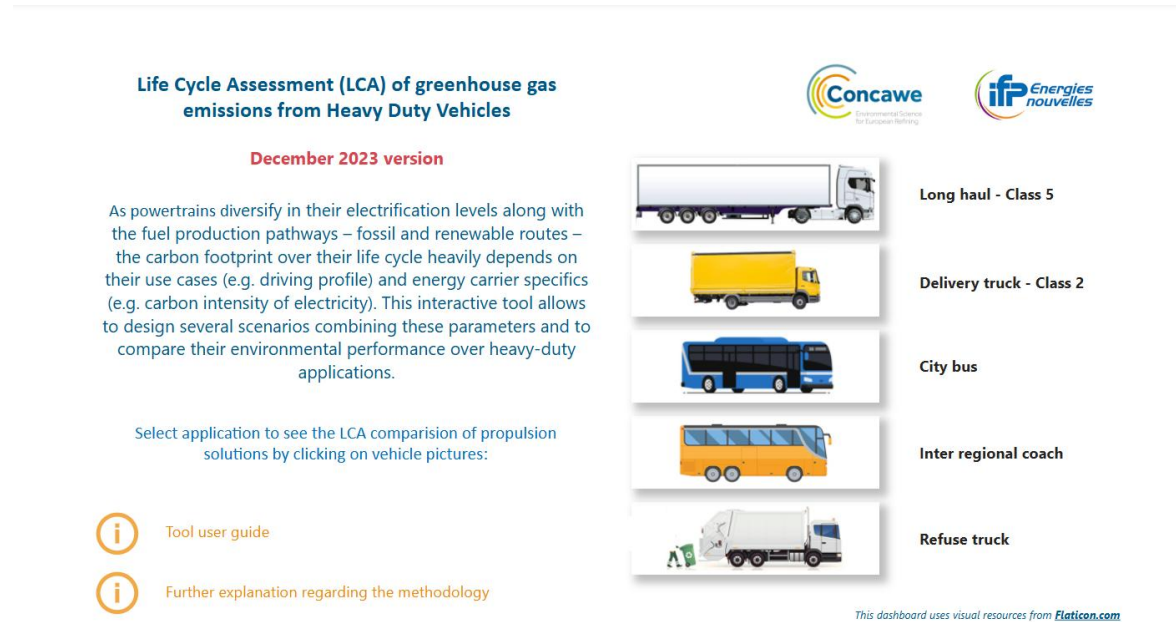


Figura 11: Interface inicial do software CONCAWE com as 5 categorias de veículos, retirada de ConcaWE (2023)

No presente estudo, e tendo em consideração o referido na secção 2.4, o foco da análise serão os veículos pesados de mercadorias de longo curso, isto é, da categoria: *Long haul – Class 5*.

Com base no “guia de utilizador” fornecido pela CONCAWE, para a utilização do *software* online, pode-se perceber como este funciona, tal como demonstrado na Figura 12.

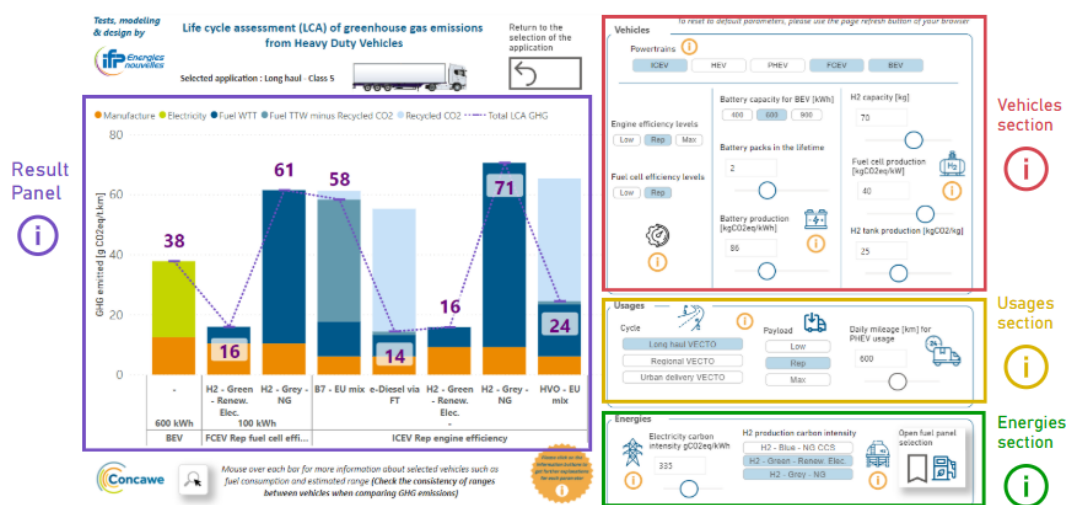


Figura 12: Interface para a análise de emissões de GEE para os veículos pesados 5-LH, retirada de ConcaWE (2023)

Na Figura 12 é possível observar, assinalado a roxo, o painel de resultados destinado à visualização das emissões de GEE associadas às diferentes tecnologias e características. A vermelho encontram-se as definições que permitem configurar as características dos veículos pesados. A amarelo está representada a seleção dos perfis de condução, bem como das cargas utilizadas nos veículos, e a verde a escolha do tipo de energia ou combustível a utilizar.

Como referido anteriormente no painel a roxo são apresentados os resultados a nível das emissões totais de GEE, mas também apresenta a contabilização de cada fase. Encontra-se então dividida nos seguintes seis pontos importantes:

- Fabricação (*Manufacture*): Refere-se às emissões de GEE associadas à produção do veículo, incluindo chassis, baterias, tanques de hidrogénio, etc.;
- Eletricidade (*Electricity*): Representa as emissões associadas à produção de eletricidade durante a operação do veículo (aplicável a BEV), este parâmetro está dependente do valor da intensidade de carbono na produção da eletricidade;
- Combustível WTT: Emissões associadas à produção, transporte e distribuição do combustível antes de ser utilizado no veículo. Crítico para combustíveis fósseis e biocombustíveis, pois reflete a pegada de carbono do processo de obtenção do combustível;
- Combustível TTW menos a Reciclagem de CO<sub>2</sub>: Emissões diretas da combustão do combustível no motor, descontando o CO<sub>2</sub> que foi previamente absorvido (por exemplo, biocombustíveis);
- Reciclagem CO<sub>2</sub>: Considera a quantidade de CO<sub>2</sub> previamente capturada e reutilizada no ciclo de vida do combustível (por exemplo, biometano ou combustíveis sintéticos neutros em carbono);
- Total LCA GEE: Soma todos os fatores anteriores para determinar a pegada de carbono total do veículo ao longo do seu ciclo de vida (produção + utilização + fim de vida).

Neste estudo, foram considerados os seguintes sistemas de propulsão:

- ICEV (*Internal Combustion Engine Vehicle*) – Veículo com motor de combustão interna;
- BEV (*Battery Electric Vehicle*) – Veículo elétrico a bateria;
- FCEV (*Fuel Cell Electric Vehicle*) – Veículo elétrico a pilha de combustível;

Com base no estudo desenvolvido por Basma e Rodriguez considerou-se o número total de quilómetros realizados de 1400000 km, para veículos pesados 5-LH, equivalente a uma utilização durante, cerca de, 15 anos Basma e Rodriguez, (2023 a).

O principal objetivo do presente estudo consiste em avaliar a viabilidade da utilização do biometano como uma alternativa energética sustentável, através da comparação das suas emissões com as de outros combustíveis e fontes de energia. Adicionalmente, procura-se analisar a sensibilidade do sistema de propulsão ICEV utilizando biometano como combustível face à variação de determinados parâmetros, nomeadamente a carga

transportada, o tipo de trajeto e a eficiência dos veículos, com o intuito de compreender de que forma esses fatores influenciam as emissões totais de GEE.

A Tabela 4 apresenta os detalhes técnicos dos sistemas de propulsão considerados, conforme inseridos na plataforma online utilizada para as simulações.

*Tabela 4: Detalhes dos vários grupos propulsores, informação retirada de Concawe (2023)*

<b>Sistemas de Propulsão</b>	<b>Informação</b>	<b>Camião de longa distância (classe 5)</b>
<b>ICE - Diesel</b>	Cilindrada / Potência máxima / pico de eficiência nominal / Binário máximo / número de mudanças	12.8 L / 400 kW / 46% / 2700 Nm / 12 mudanças
<b>ICE - GNC</b>	Potência máxima / pico de eficiência nominal / Binário máximo / número de mudanças	12.9L / 340 kW / 36.5% / 2000 Nm / 12 mudanças
<b>ICE- H<sub>2</sub></b>	Potência máxima / pico de eficiência nominal / Binário máximo / número de mudanças	15.2L / 410 kW / 44.1% / 1950 Nm / 12 mudanças
<b>BEV</b>	Capacidade da bateria / Potência máxima / número de mudanças	Batt 533 kWh / e-motor 350 kW-2000 Nm / 12 mudanças
<b>FCEV</b>	Máxima Potência / pico máximo de eficiência / capacidade da bateria / Potência do motor máxima binário do motor máximo e velocidade máxima / número de mudanças	225 kW / 55% / batt 100 kWh / 350 kW – 2000 Nm – 5krpm / 2 mudanças

Com base nos estudos acerca dos veículos pesados que utilizam biometano como combustível comparando com outras tecnologias, os combustíveis e fontes de energia selecionados para o presente estudo são:

- Diesel B7 – EU mix.2017;
- HVO EU mix. 2017;
- e-Diesel *Fisher Trops* (FT) (produzido por eletricidade);
- CNG e LNG – fossil EU mix. 2017;
- Eletricidade (produzido pelo EU mix., com base numa média ponderada Europeia);
- H<sub>2</sub> (Cinza – Eletricidade produzida a partir do Gás Natural e Verde – Eletricidade renovável);
- Biometano (vários tipos).

Na CONCAWE o EU mix. 2017 refere o mix. energético de produção de eletricidade para 2017, utilizando fontes carvão, gás natural, nuclear, hidro, eólica, solar, biomassa, etc, com as devidas percentagens de utilização.

Para o biometano também se procedeu à análise das principais fontes de obtenção do combustível nomeadamente: resíduos agrícolas, resíduos urbanos e resíduos florestais.

A seguinte Figura 13 apresenta, a azul, as fontes de energias que foram selecionadas para o presente estudo.

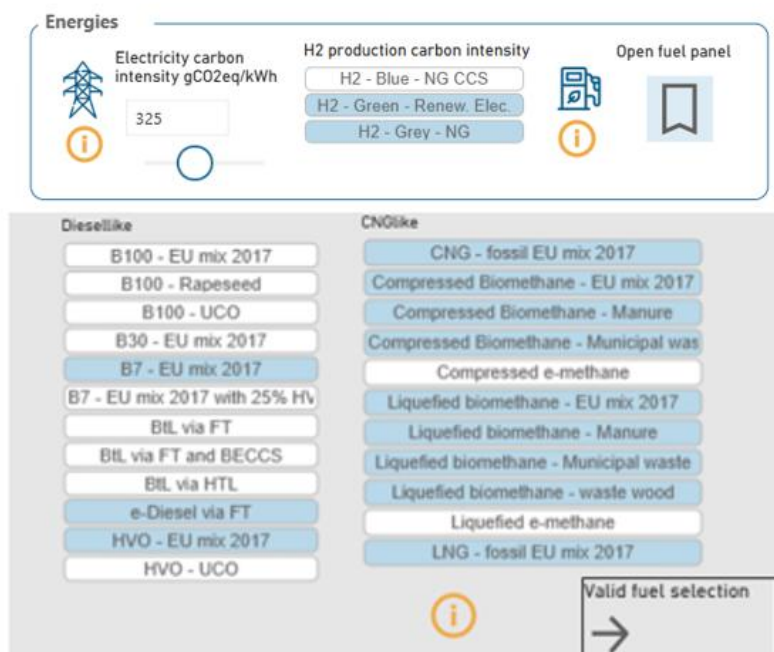


Figura 13: Fontes de energia escolhidas para o estudo, retirada de ConcaWE (2023)

Conforme mencionado anteriormente, o número total de quilómetros considerados na análise foi de 1400000 km, utilizando como referência o ciclo “*Long Haul VECTO*”. Numa primeira fase, o estudo baseou-se nos parâmetros padrão disponibilizados pela CONCAWE, os quais serviram como ponto de partida para a avaliação do desempenho ambiental das diferentes tecnologias. Na secção 3.3.2 será apresentada uma análise de sensibilidade, na qual se identificam e variam individualmente os principais parâmetros, com o objetivo de avaliar o seu impacto nas emissões de GEE. Relativamente à eletricidade, foi adotado um fator de emissão de 325 gCO<sub>2</sub>eq/kWh, de acordo com o valor reportado para Portugal em 2019, conforme indicado pelo próprio programa utilizado na simulação (Nicolae Scarlet, 2021).

### 3.3.2. Análise de resultados das diferentes tecnologias

---

Nesta secção serão apresentados e analisados os resultados obtidos pelo modelo CONCAWE para as diferentes tecnologias de sistemas de propulsão. Em primeiro lugar, será comparado o desempenho de várias alternativas, considerando diferentes fontes para produção de biometano. Posteriormente, será realizada uma análise de sensibilidade para avaliar como a alteração de determinados parâmetros no modelo da CONCAWE influencia as emissões de GEE. Assim, pretende-se compreender tanto o comportamento das várias alternativas como a robustez dos resultados obtidos.

#### Comparação das diferentes tecnologias

Numa primeira análise dos diferentes sistemas de propulsão e das várias fontes de energia utilizadas, de modo a efetuar uma análise comparativa, o veículo (LH-classe 5) e a carga foram considerados constantes. A carga pode ser definida como: Low (baixa); Rep (referência) ou Max (máxima), no presente estudo considerou-se uma carga Rep (referência). O ciclo de condução optou-se pelo “Long Haul VECTO” e a carga “Rep” que equivale a 19000 kg, para todas as tecnologias ConcaWE (2023).

Para os BEV considerou-se a capacidade da bateria: 533 kWh, 800 kWh, 1200 kWh. Já para os ICE consideraram-se as seguintes fontes de energia: diesel (B7), CNG e LNG, H<sub>2</sub>, HVO, e-diesel e o Biometano nas suas diferentes fontes (EU mix. – Média ponderada, resíduos agrícolas, resíduos municipais).

Nos veículos BEV, a substituição do *pack* de bateria ao longo do tempo de vida foi considerado de duas vezes, a produção da bateria emite 86 kgCO<sub>2</sub>eq/kWh, a capacidade do tanque de H<sub>2</sub> é de 70kg, a produção da pilha de combustível emite 40 kgCO<sub>2</sub>eq/kW, a produção do tanque de H<sub>2</sub> emite 25 kgCO<sub>2</sub>eq/kg.

Assim obtiveram-se os valores de GEE para as diferentes tecnologias, como apresentado nas Figura 14 e

Figura 15.

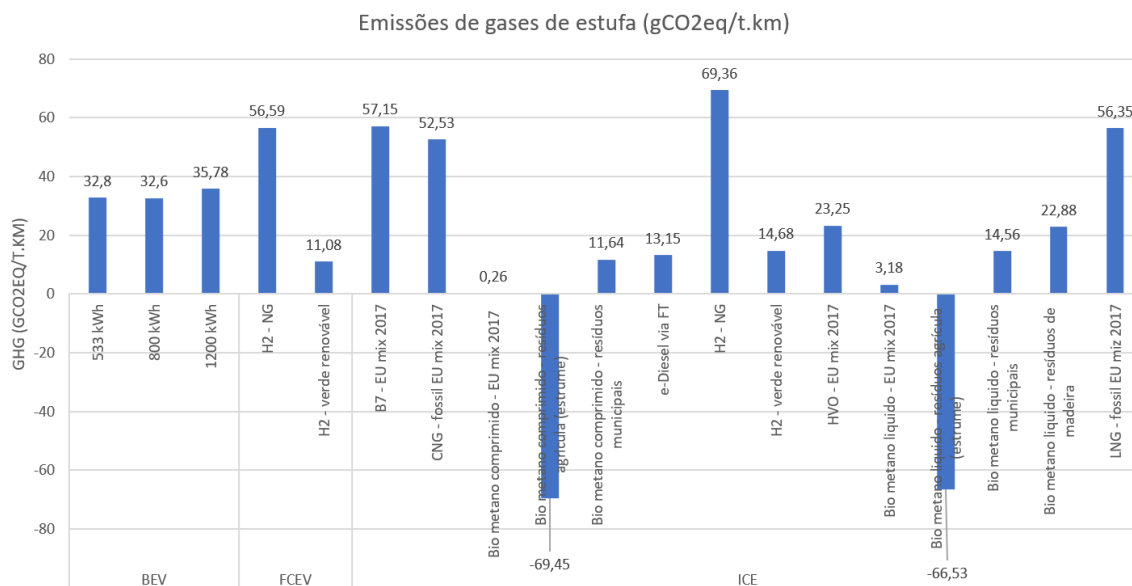


Figura 14: Resultado das emissões das diferentes tecnologias, original

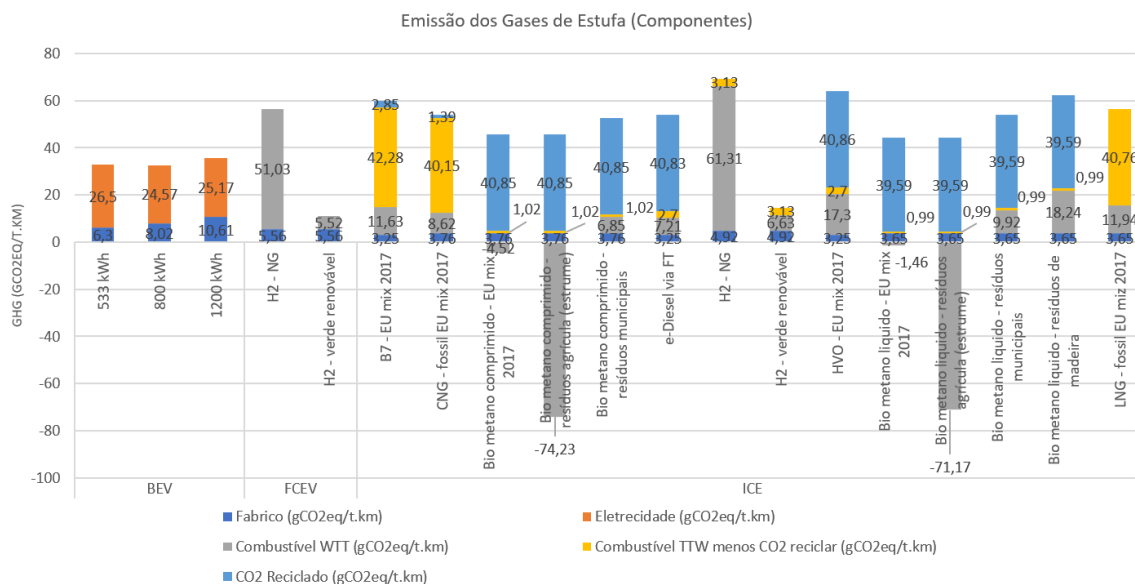


Figura 15: Resultados das emissões das diferentes tecnologias com parciais, original

O valor total líquido das emissões de GEE corresponde ao somatório das várias componentes subtraindo a componente de CO<sub>2</sub> reciclado.

A componente de CO<sub>2</sub> reciclado corresponde às emissões de CO<sub>2</sub> que foram capturadas e reutilizada, como referido anteriormente, e é subtraída à componente do combustível TTW, para indicar as partes das emissões que foram neutralizadas. Por exemplo para o diesel – B7, a componente de CO<sub>2</sub> reciclado é de: 2,85 gCO<sub>2</sub>eq/t.km, mas para o e-diesel via FT é de 40,83 gCO<sub>2</sub>eq/t.km, assim nas emissões totais o CO<sub>2</sub> reciclado do e-diesel proveniente de fontes mais renováveis diminui o valor das emissões globais de GEE comparando com B7.

Tal como é possível observar na Figura 14, os BEV apresentam emissões de GEE de 32,8 a 35,78 gCO<sub>2</sub>eq/t.km, respetivamente para a capacidade da bateria de 533 kWh e de 1200

kWh. A Figura 15 apresenta os resultados das emissões de GEE tendo em conta: fabrico, fonte de energia (combustível/eletricidade), e CO<sub>2</sub> reciclado (no caso dos biocombustíveis).

Para os veículos BEV a fonte de energia (eletricidade) apresenta o maior contributo para as emissões de GEE, por exemplo: para o BEV – 1200 kWh, o valor total das emissões de GEE é: 35,78 gCO<sub>2</sub>eq/t.km; das quais temos: fabrico (10,61 gCO<sub>2</sub>eq/t.km); fonte de energia – eletricidade (25,17 gCO<sub>2</sub>eq/t.km). Isto é, a energia contribui com cerca de 70% das emissões de GEE.

Para os veículos FCEV a fonte de energia (combustível WTT) apresenta o maior contributo para as emissões de GEE, o valor total das emissões de GEE é: 56,59 gCO<sub>2</sub>eq/t.km; das quais temos: fabrico (5,56 gCO<sub>2</sub>eq/t.km); fonte de energia – combustível WTT (51,03 gCO<sub>2</sub>eq/t.km). Isto é, a energia contribui com cerca de 90% das emissões de GEE. Utilizando a fonte de energia renovável (hidrogénio verde) o valor das emissões totais de GEE é de 11,08 gCO<sub>2</sub>eq/t.km, também como anteriormente as emissões GEE devido à produção e abastecimento do combustível WTT apresenta o maior contributo para as emissões de GEE.

Para os veículos ICE – B7 a fonte de energia apresenta maior contribuição para as emissões de GEE é combustível TTW menos CO<sub>2</sub> reciclar (42,28 gCO<sub>2</sub>eq/t.km) com 74% das emissões totais de GEE de 57,15 gCO<sub>2</sub>eq/t.km.

Combustíveis convencionais como: B7, CNG e LNG apresentam valores de emissões totais de GEE elevados (57,15 / 52,53 / 56,35) gCO<sub>2</sub>eq/t.km, superando os veículos BEV - fonte de energia (eletricidade). Estas três fontes têm em comum as emissões mais elevadas no parâmetro combustíveis TTW menos CO<sub>2</sub> reciclar, apresentado 76% das emissões globais para o CNG e 72% para o LNG. Ou seja, as emissões de GEE durante a fase de utilização são superiores.

O hidrogénio cinzento, produzido a partir do gás natural (H<sub>2</sub> – NG), apresenta o valor mais elevado de emissões totais de GEE (69,36 gCO<sub>2</sub>eq/t.km). Sendo que, a maior parcela de emissões de GEE pertence à componente dos combustíveis de WTT (61,31 gCO<sub>2</sub>eq/t.km), que perfaz 88% das emissões globais. Já para o hidrogénio verde (H<sub>2</sub> – verde renovável) que utiliza de fontes de energia elétrica renováveis apresenta um valor 14,68 gCO<sub>2</sub>eq/t.km, nas emissões totais de GEE, neste caso também a fonte com maior peso é a componente dos combustíveis de WTT com 6,63 gCO<sub>2</sub>eq/t.km.

Para o e-diesel via FT, é necessário referir em primeiro lugar que o valor obtido é utilizando vem a partir de eletricidade renovável. Com valores obtidos a partir da eletricidade EU mix, o valor de emissões é viável, uma vez que, apresenta emissões totais muito elevado. Esta observação poderá ser percebida melhor com base no artigo Pressi et al. (2022). Posto isto, emissões totais de GEE são de 13,15 gCO<sub>2</sub>eq/t.km. Isto é, bastante mais baixas que as dos combustíveis fósseis tradicionais (B7, CNG e LNG). É importante notar que a componente de CO<sub>2</sub> reciclado para o e-diesel via FT é de 40,83 gCO<sub>2</sub>eq/t.km. A maior parcela que contribui para as emissões de GEE são as emissões de combustível de WTT apresentado 55% das emissões globais, sendo uma potencial alternativa na transição energética. Todavia, o custo de e-diesel via FT ainda não é competitivo com o custo de apresentado pelos

combustíveis tradicionais. Neste caso em particular, o e-diesel via FT, apresenta emissões totais de GEE devido a produção ser obtida a partir de eletricidade renovável, utilizada na eletrolise da água (Concawe, 2023).

As emissões totais de GEE para a utilização de biometano como combustível dependente principalmente da origem do biometano. A CONCAWE mostra que em termos das emissões totais de GEE, o método mais eficiente é quando utilizado os resíduos agrícolas. Para este método a componente de CO<sub>2</sub> reciclado é de 40,85 gCO<sub>2</sub>eq/t.km, sendo a maior de entre os vários combustíveis alternativos considerados no presente estudo. Este também se destaca por apresentar emissões extremamente baixas ou negativas (até -69,45 gCO<sub>2</sub>eq/t.km nos combustíveis WTT). Isto acontece porque o processo de produção evita a emissão de metano que ocorreria naturalmente, resultando num balanço negativo de CO<sub>2</sub>eq MAPFRE, (2023).

Assim, verifica-se que tendo em conta as emissões de GEE, o biometano é uma opção mais sustentável para descarbonizar o transporte pesado.

Em suma, o biometano revela-se uma alternativa particularmente vantajosa face aos combustíveis fósseis, como o Diesel B7 e o LNG. No entanto, é importante destacar que outros combustíveis alternativos, como o e-diesel e o HVO (*Hydrotreated Vegetable Oil*), também apresentam potencial relevante para a descarbonização do setor dos transportes. Adicionalmente, os veículos pesados elétricos poderão desempenhar um papel complementar significativo. Assim, a combinação destas soluções poderá, no futuro, constituir um *mix*. tecnológico eficaz no cumprimento das metas de redução de emissões definidas pela União Europeia.

Com base no documento Pressi et al. (2022) este analisa as opções de descarbonização para o setor de transporte pesado, focando na comparação entre eletrificação e o uso de e-fuels. Este documento destaca a importância de uma abordagem de ciclo de vida, considerando as emissões GEE desde a produção até o uso final dos combustíveis. Assim é possível realizar uma comparação entre os resultados entre as emissões do trabalho de Pressi et al. (2022) e os valores obtidos a partir da CONCAWE.

Os autores Pressi *et al.* (2022) apresentam a equação que permite obter o valor de emissões de GEE ao longo do ciclo de vida:

$$WTW \left[ \frac{gCO_{2eq}}{t km} \right] = WTT \left[ \frac{gCO_{2eq}}{MJ} \right] * TTW \left[ \frac{MJ}{t km} \right] \quad (1)$$

Na equação (1) os termos WTW, WTT e TTW tem o seguinte significado:

- WTW: É a intensidade carbónica total do combustível ao longo de todo o ciclo de vida, ou seja, são abrangidas as emissões associadas desde a extração de recursos até a utilização final no veículo;
- WTT: Estas emissões estão associadas à produção e ao fornecimento do combustível até que esteja pronto para ser utilizado;
- TTW: Esta parte considera as emissões ocorridas durante a utilização do combustível no veículo.



A Tabela 5 apresenta uma comparação dos resultados obtidos no presente estudo e no estudo dos autores Pressi *et al.* (2022).

Tabela 5: Comparação entre valores da CONCAWE e presente estudo, e valores obtidos por Pressi *et al.* (2022)

Tecnologias	Combustíveis	CONCAWE			Artigo: Pressi <i>et al.</i> (2022)		
		WTT (gCO <sub>2eq</sub> /MJ)	TTW (MJ/t.km)	WTW (gCO <sub>2eq</sub> /t.km)	WTT (gCO <sub>2eq</sub> /MJ)	TTW (MJ/t.km)	WTW (gCO <sub>2eq</sub> /t.km)
<b>BEV</b>	Eletricidade	[90,28 (533 kWh) – 90,33 (1200 kWh)]	[0,2935 (533 kWh) – 0,2788(1200 kWh)]	[32,8 (533 kWh) – 35,78 (1200 kWh)]	EU mix. da rede: 86,1 PV: 11,4 Vento: 3,1	0,424	e-Fuel da rede: 36,5 e-Fuel de PV: 4,9 e-Fuel do vento: 1,3
<b>FCEV</b>	H <sub>2</sub>	10,89 (H <sub>2</sub> renovável)	0,5069	11,08	EU mix. da rede: 159,1 PV: 21,9 Vento: 6,7	0,583	e-Fuel da rede: 92,8 e-Fuel de PV: 12,8 e-Fuel do vento: 3,9
<b>ICE</b>	Diesel – B7	20,11	0,5782	57,15	92,1	0,729	Petróleo: 67,1
	e-Diesel	19,23	0,605	13,15	EU mix. da rede: 199,8 PV: 27 Vento: 7,2	0,91	e-Fuel da rede: 145,7 e-Fuel de PV: 19,7 e-Fuel do vento: 5,2
	LNG (Concaw) e eLNG (Pressi <i>et al.</i> )	16,27	0,7342	56,35	EU mix. da rede: 110,2 PV: 14 Vento: 4	0,91	e-Fuel da rede: 100,3 e-Fuel de PV: 12,7 e-Fuel do vento: 5,2
	H <sub>2</sub> renovável	10,9	0,6082	14,68	EU mix. da rede: 159,1 PV: 21,9 Vento: 6,7	0,91	-

Notas: PV – Painéis fotovoltaicos

Com base na Tabela 5 podem-se retirar as seguintes conclusões:

- BEV: Na análise da CONCAWE, os valores de WTT para os veículos elétricos são os mais elevados, devido à consideração de um mix elétrico europeu, composto por várias fontes de energia. Apesar de incluir uma parcela significativa de renováveis, a rede elétrica ainda apresenta uma forte dependência de combustíveis fósseis, o que contribui para uma maior intensidade carbónica. Este resultado é coerente com os dados de Pressi et al. (2022), que apresentam valores semelhantes aos da CONCAWE para a média da rede elétrica, exceto nos cenários onde a produção de eletricidade provém exclusivamente de energia solar (PV) ou eólica. Relativamente à fase TTW, a CONCAWE apresenta valores nulos, mas estes podem variar consoante as características específicas dos veículos simulados. No balanço global, observa-se que os valores de WTW da CONCAWE são mais baixos, devido à maior eficiência atribuída aos veículos modelados, refletindo uma redução significativa das emissões na fase de utilização.
- FCEV: Os resultados da CONCAWE para a fase WTT são inferiores aos apresentados por Pressi et al. (2022), tanto para o cenário de rede como para produção com PV. Esta diferença deve-se ao facto de a CONCAWE considerar o hidrogénio renovável produzido através de eletrólise da água alimentada por eletricidade de origem renovável. No balanço total WTW, os menores níveis de emissões são obtidos quando o hidrogénio é produzido a partir de energia eólica. Segue-se o cenário modelado pela CONCAWE, beneficiando de uma combinação otimizada de tecnologia de produção e elevada eficiência na utilização do hidrogénio.
- ICE: Para os veículos com motores de combustão interna, os valores de WTT são mais reduzidos quando os combustíveis são produzidos a partir de fontes renováveis, como evidenciado tanto na CONCAWE como no estudo de Pressi et al. (2022). No balanço final (WTW), os combustíveis alternativos sintéticos, como o e-Diesel e o e-LNG, apresentam menores emissões de gases com GEE quando a sua produção é alimentada por energia solar ou eólica.

## Comparação das diferentes fontes de Biometano

Numa outra análise observou-se os valores obtidos só nas diferentes fontes de biometano, como demonstrado na Figura 16 e Figura 17.

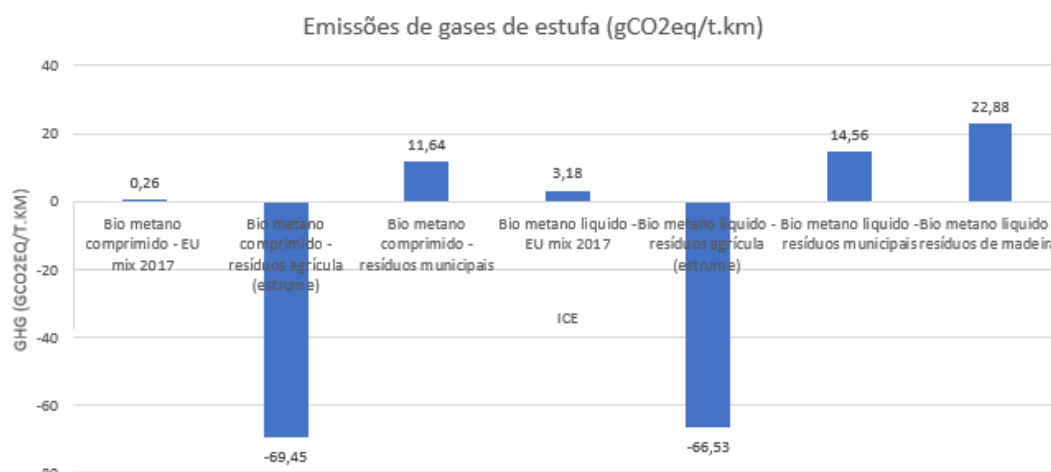


Figura 16: Resultados do biometano a partir de diferentes fontes de resíduos, original

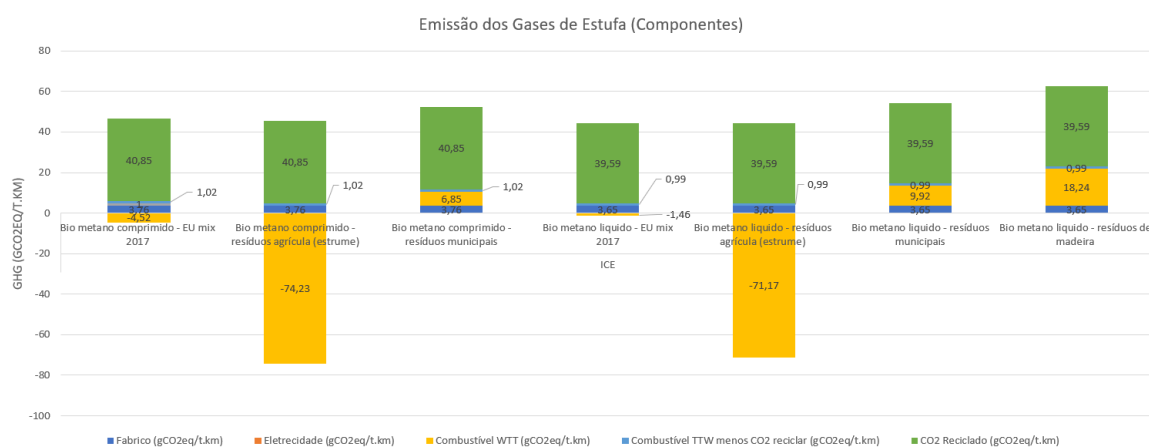


Figura 17: Resultados do biometano a partir de diferentes fontes de resíduos com parciais, original

Ao analisar as Figura 16 e Figura 17, conclui-se que o biometano proveniente de resíduos agrícolas apresenta os valores mais baixos de emissões de GEE, quando comparado com outras fontes de produção de biometano. A Figura 17, mostra que as variações nos resultados se devem exclusivamente ao parâmetro: Combustível WTT, uma vez que é neste estágio que se contabilizam as emissões associadas à produção do combustível, incluindo o impacto ambiental das diferentes rotas de obtenção do biometano.

A segunda melhor opção, em termos de emissões, é o Biometano EU Mix (2017). Este mix representa uma média ponderada das principais vias de produção de biometano utilizadas nos Estados-Membros da União Europeia, nomeadamente: resíduos agrícolas, lamas de

ETAR e resíduos alimentares. Esta abordagem permite obter uma visão integrada e representativa do cenário europeu de produção de biometano.

## **Análise de sensibilidade dos diferentes parâmetros**

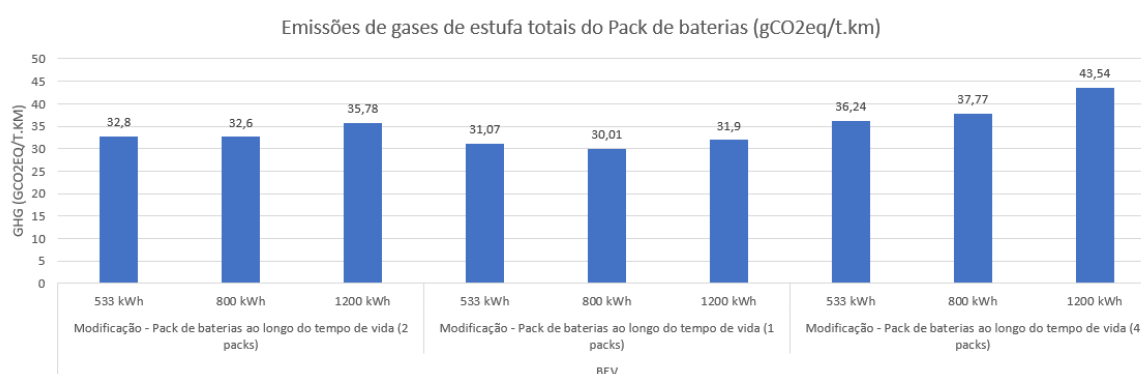
Esta secção é dedicada à análise de sensibilidade para avaliar o impacto de diferentes parâmetros nas emissões, quantificada em termos de GEE, das várias tecnologias de sistemas de propulsão. Os fatores analisados incluem: capacidade e produção das baterias, eficiência dos motores (ICE e FCEV), capacidade e fabrico dos tanques de H<sub>2</sub> e das pilhas de combustível, bem como os perfis de utilização (ciclos de condução e níveis de carga). Esta metodologia tem como objetivo identificar quais as variáveis que mais influenciam o desempenho ambiental de cada tecnologia.

### **Pack de baterias**

A fim de avaliar o impacto do pack de baterias nas emissões de GEE, dos pesados, na substituição do *pack* de baterias ao longo da LCA, de forma a analisar as emissões dos GEE provenientes deste parâmetro. Para o estudo escolheu-se 1 *pack*, 2 *packs* (referência) e 4 *packs*.

Este parâmetro é muito importante porque devido à diminuição da capacidade autonomia em certas aplicações, é essencial considerar que estes veículos necessitam de substituição do *Pack* de baterias devido a diminuição da capacidade de armazenamento de energia, ou a problemas de equipamento que possam surgir.

Posto isto nas seguintes Figura 18 e Figura 19 são apresentados os resultados obtidos.



*Figura 18: Resultados obtidos para a análise do pack de baterias, original*

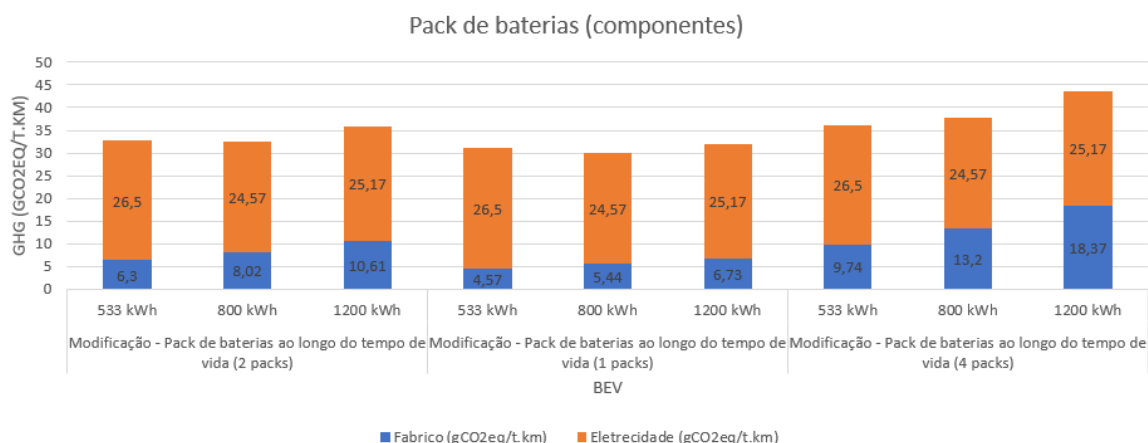


Figura 19: Resultados obtidos para a análise do pack de baterias com parciais, original

Comparando os resultados observa-se que o aumentando a substituição dos *packs* de baterias ao longo do seu tempo de vida aumenta as emissões de GEE.

O parâmetro das emissões originadas no fabrico variam consoante com a substituição dos *packs* das baterias, já as emissões referentes à eletricidade não variam consoante este dado.

Uma possível explicação para o aumento das emissões no fabrico será a necessidade do uso de matéria-prima para criar os *packs* de bateria, montagem e testes destas.

## Produção da bateria

No contexto da análise do ciclo de vida para a produção das baterias existem fatores a ter em consideração, uma vez que, o valor varia com o tipo de tecnologia utilizada (Ferro-lítio, Lítio Níquel-cobalto-alumínio e Lítio-Níquel-manganésio-cobalto), e a região geográfica. A elevada complexidade da cadeia de fornecimento de matérias-primas críticas, aliada aos processos energéticos intensivos de fabrico, contribui para tornar a produção de baterias uma etapa crucial na pegada ambiental dos veículos elétricos.

Com base nos estudos realizados e na análise que a CONCAWE realizou para estimar os valores de produção de baterias, usou-se os seguintes valores 86, 52 e 27 kgCO<sub>2</sub>eq/kWh, estes valores são só respetivos as baterias de Ferro-lítio.

Estes valores foram escolhidos com base na informação que o *software* da CONCAWE fornece, como demonstrado na Figura 20.

Chemistry	Timeline	China EF [kgCO2eq/kWh]	EU EF [kgCO2eq/kWh]	USA EF [kgCO2eq/kWh]
NMC/NCA Graphite	2020	86,0	52,0	65,0
NMC/NCA Graphite	2030	70,0	45,0	52,0
NMC/NCA Graphite	2040	58,0	37,0	42,0
NMC/NCA Graphite	2050	44,0	27,0	32,0
LFP Graphite	2020	69,0	39,5	49,5
LFP Graphite	2030	56,0	34,0	40,0
LFP Graphite	2040	45,0	28,0	32,0
LFP Graphite	2050	34,0	19,5	24,0

LFP : lithium iron phosphate battery (Lithium FerroPhosphate)  
NCA : lithium Nickel-Cobalt-Aluminium battery  
NMC : lithium Nickel-Manganese-Cobalt battery

Figura 20: Valores de emissões para a produção de baterias, retirado de Concawe (2023)

Seguidamente são apresentados os resultados da simulação, nas seguintes Figura 21 e Figura 22.

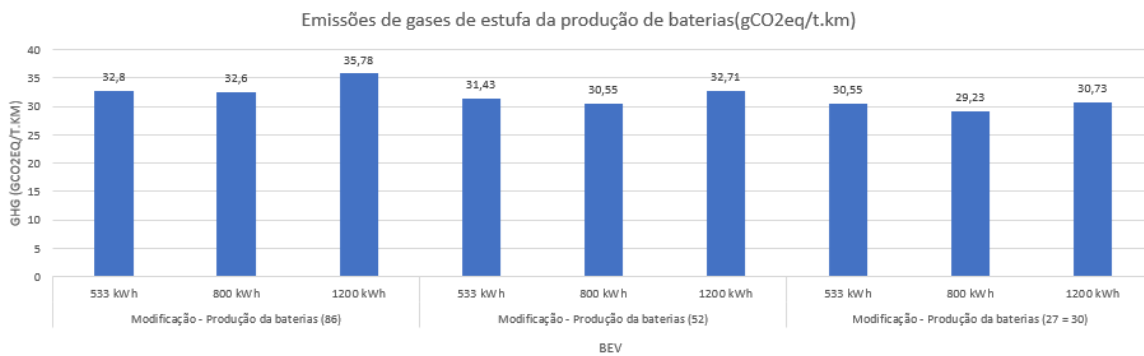


Figura 21: Resultados obtidos a partir da variação de emissões da produção das baterias, original

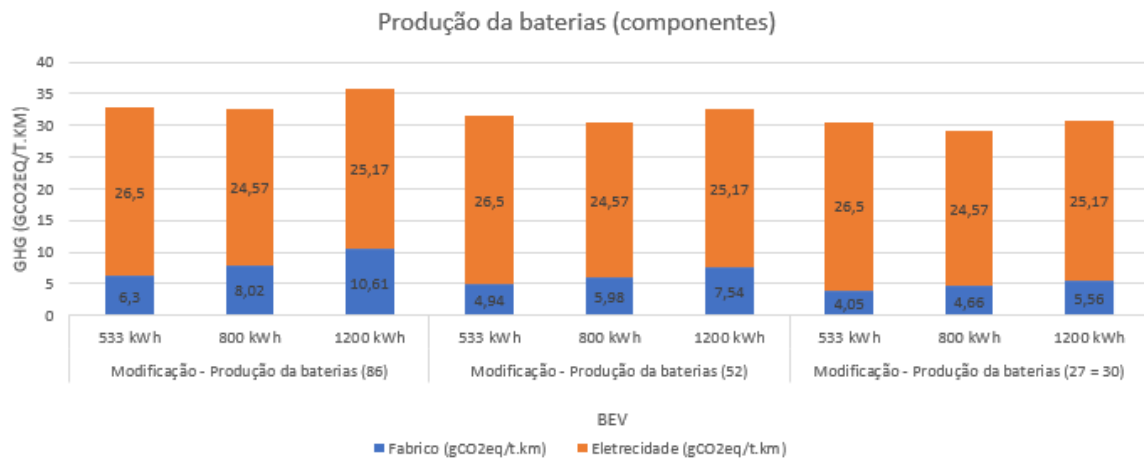


Figura 22: Resultados obtidos a partir da variação de emissões da produção das baterias com parciais, original

Observando as Figura 21 e Figura 22 a diminuição dos efeitos das produções das baterias para BEV, melhora os valores das emissões de GEE. Como anteriormente o único parâmetro que se altera é as emissões geradas durante os processos de fabrico. Mais uma vez o aumento das emissões no fabrico pode ser devido a extração de matérias para que exista uma

qualidade melhor para a longevidade das baterias e o uso de operações e de energia para produzi-las.

### Níveis de eficiência dos motores ICE e FCEV

Para a avaliação da eficiência energética dos sistemas de propulsão em motores de combustão (ICE) e em veículos elétricos a pilha de combustível (FCEV), o *software* CONCAWE apresenta as emissões de GEE considerando 3 cenários:

- Cenário “Low” (mínimo) que considera os ICE e os FCEV com máximo de eficiência, respetivamente de 40% de 55%.
- Um cenário “High” (máximo) onde os motores de combustão apresentam 50% do pico de eficiência, já as pilhas de combustível de 70%.
- E um último cenário de “Ref.” (referência), que apresenta um funcionamento a nível de eficiência *standard* dos motores usados no dia a dia ConcaWE (2023).

Posto isto os resultados obtidos são demonstrados nas respetivas Figura 23 e Figura 24.

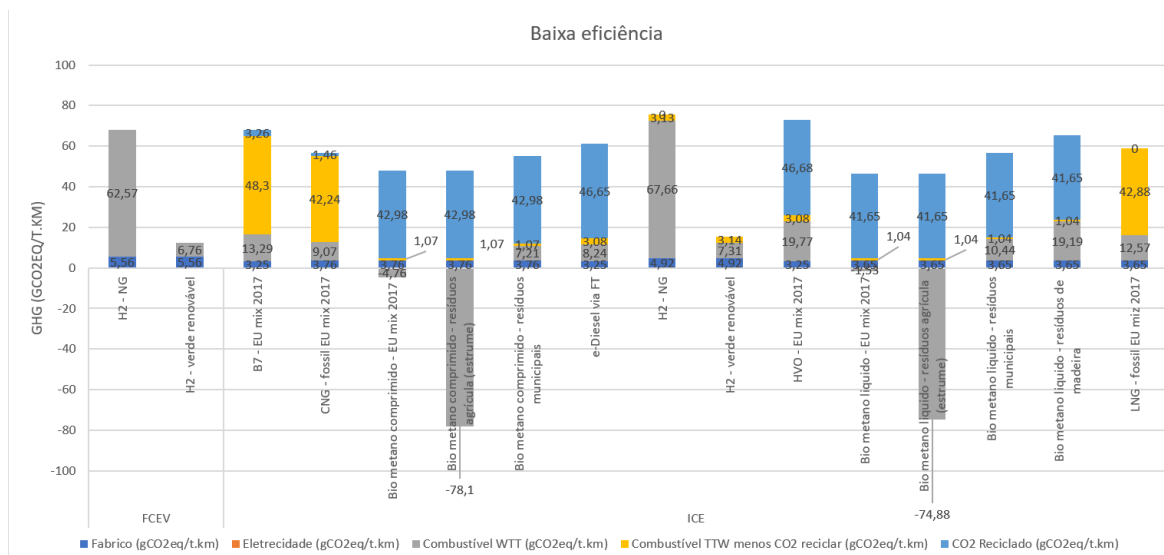


Figura 23: Resultados obtidos na situação de baixa eficiência do motor parciais, original

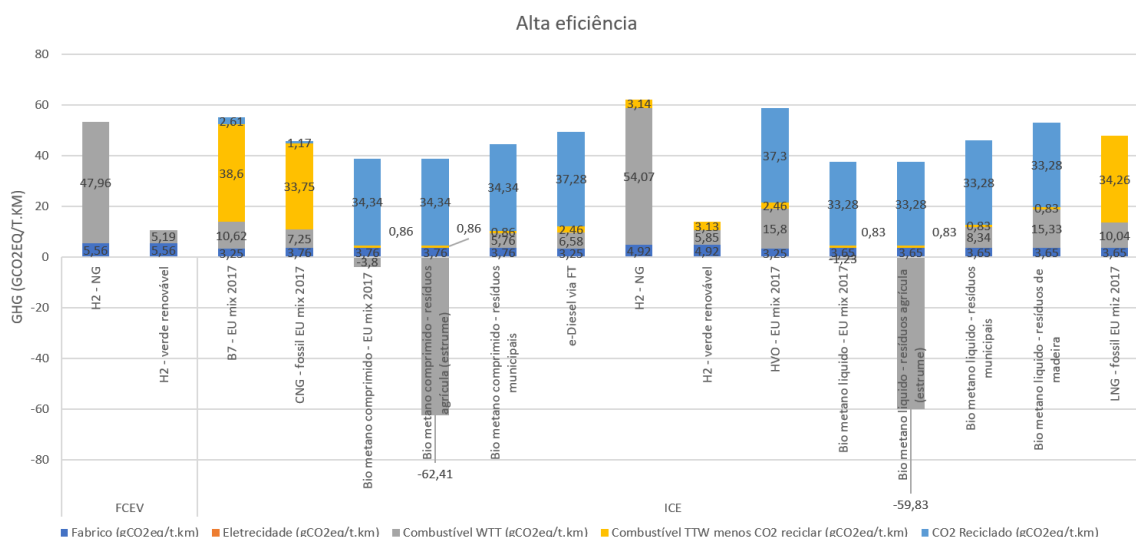


Figura 24: Resultados obtidos na situação de alta eficiência do motor parciais, original

Observando as Figura 23 e Figura 24 verifica-se que uma baixa eficiência do motor desfavorece a redução das emissões de GEE. Embora no combustível do biometano com origem nos resíduos agrícolas, apresentam melhores valores comparando com uma eficiência elevada. Este caso deve-se ao facto de como o biometano de resíduos agrícolas evitam as emissões de metano (CH<sub>4</sub>) para a atmosfera, uma vez que são capturados para usar como fonte de energia resulta de um balanço negativo reduzindo as emissões totais dos GEE. Outro parâmetro a ter em conta com as eficiências dos motores é a capacidade de autonomia do veículo e o consumo. Observa-se que com uma eficiência baixa nos veículos estes tendem a diminuir a autonomia e a aumentar o consumo. O que implica uma maior gasto de energia e conseqüente oferece um aumento das emissões GEE. Por exemplo veículos pesados usando B7 com baixo rendimento apresenta uma autonomia de 1426 km e um consumo de 35,07 L/100km. Com um rendimento elevado o mesmo apresenta uma autonomia de 1784 km e um consumo de 28,03 L/100km.

## Capacidade de H<sub>2</sub>

A capacidade de armazenamento de hidrogénio nos veículos pesados é fundamental para avaliar a autonomia do veículo e conseqüentemente o impacto ambiental associado ao transporte. É necessário ter este ponto em consideração em estimativas de logística porque a capacidade de armazenamento de hidrogénio pode influenciar a frequência de abastecimentos, peso total do veículo e emissões associadas ao transporte.

Nas Figura 25 e Figura 26 são apresentados os resultados das variações da capacidade de armazenamento de hidrogénio.

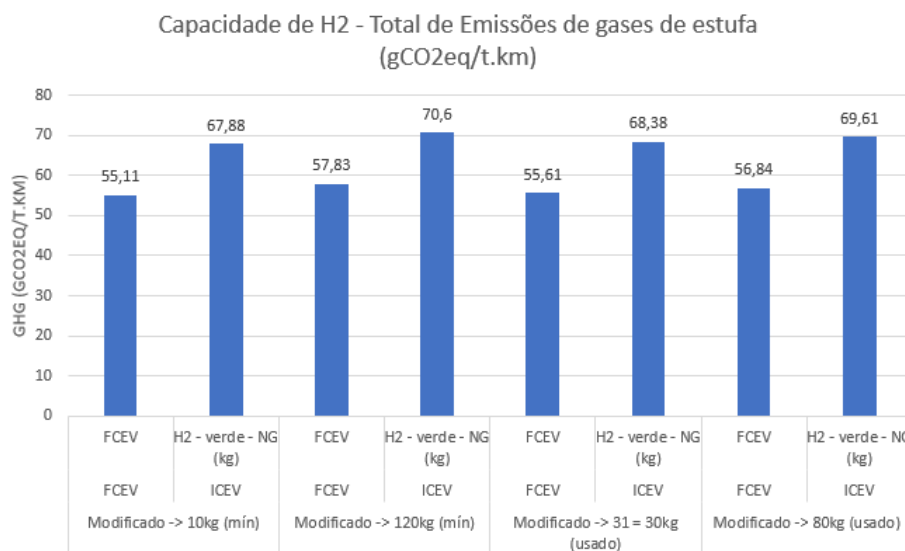


Figura 25: Resultados obtidos a partir da capacidade de armazenamento, original

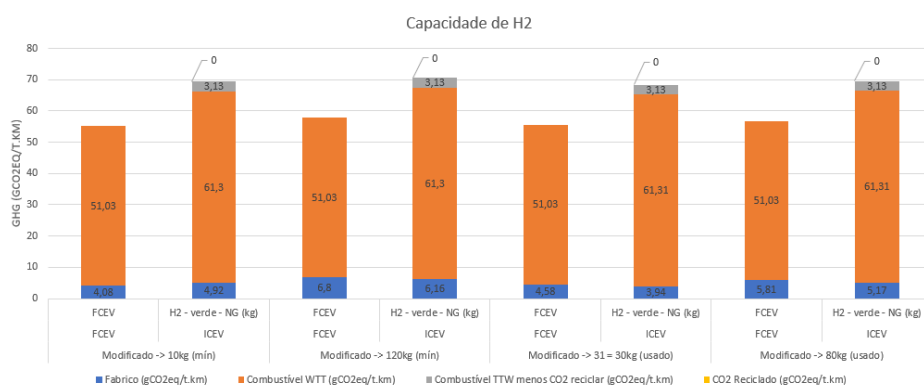


Figura 26: Resultados obtidos a partir da capacidade de armazenamento parcial, original

Observando as Figura 25 e Figura 26 as emissões dos GEE aumentam com o aumento da capacidade do tanque de H<sub>2</sub>. Observando-se que o único parâmetro que varia são as emissões no fabrico.

## Produção de Fuel Cells

Na produção das pilhas de combustível a extração, refinação e montagem destes materiais exigem processos industriais complexos, o que contribui para emissões significativas de CO<sub>2eq</sub> por unidade de potência fabricada.

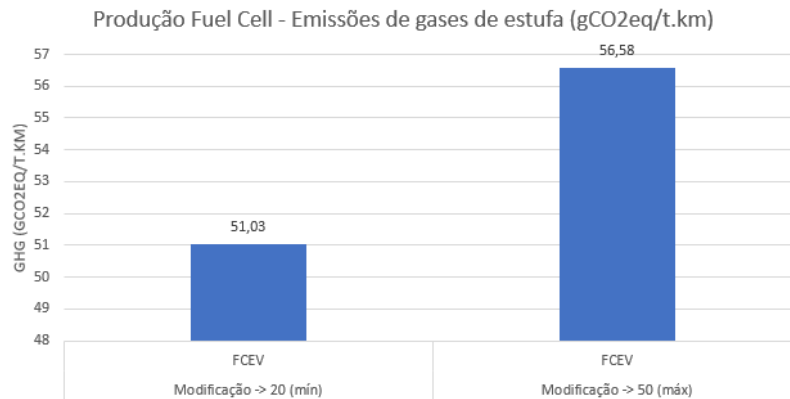


Figura 27: Resultados obtidos para a produção da Fuel Cells, original

Na variação da produção a diminuição da produção das pilhas de combustível diminui as emissões de GEE, embora observando os valores de fabrico são muito idênticos. Para o valor de produção de 20 – o fabrico apresentado é de 5,39, enquanto para a produção de 50 – o fabrico apresentado é de 5,65. Os valores de combustível TTW ficam inalterados.

## Produção do Tanque de H<sub>2</sub>

Para avaliar o impacto do tanque de hidrogénio no ciclo de vida, variou-se os valores de produção mínimo 10 kg e máximo 50 kg, para perceber o impacto de emissões na realização do tanque.

Na Figura 28 e Figura 29 são apresentados os resultados para esses valores.

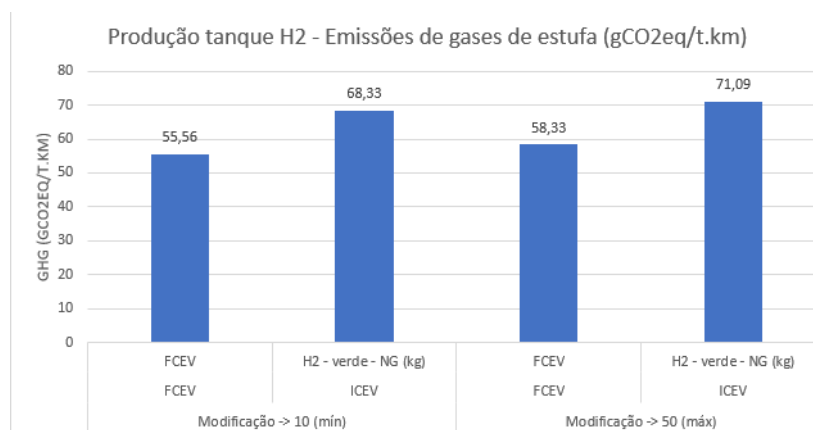


Figura 28: Resultados obtidos na Produção do Tanque, original

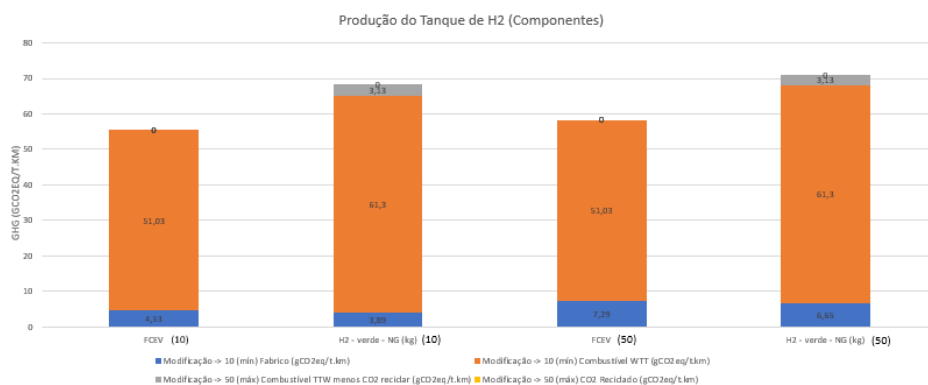


Figura 29: Resultados obtidos na Produção do Tanque parciais, original

Já na produção dos tanques de H<sub>2</sub>, as emissões dos GEE aumentam com o aumento do fabrico da produção, que pode ter a ver com o tipo de material e operação para produzir os tanques.

### Ciclos de condução

Os ciclos de condução representam um elemento fundamental para simular com precisão o desempenho energético e ambiental dos veículos pesados em diferentes contextos operacionais.

Estes ciclos definem perfis de velocidade e carga típicos para diversos tipos de trajetos – como urbano, regional e longo curso – permitindo estimar o consumo de energia e as emissões associadas de forma representativa.

O modelo CONCAWE baseia-se na ferramenta VECTO, desenvolvido pela Comissão Europeia, como referência para calibração dos seus ciclos, Figura 30.

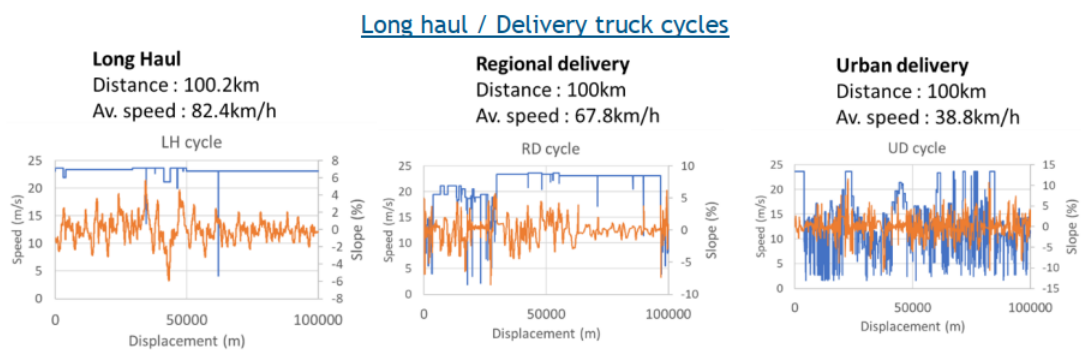


Figura 30: Ciclos de condução, retirada de (Pascal Smague, 2024)

Desta forma, os resultados obtidos no modelo CONCAWE mantêm consistência com a regulamentação europeia e, paralelamente, permitem comparações realistas entre diferentes tecnologias de sistemas de propulsão e tipos de combustível.

Na Figura 31, Figura 32 e Figura 33 são apresentados resultados dos 3 ciclos de funcionamento.

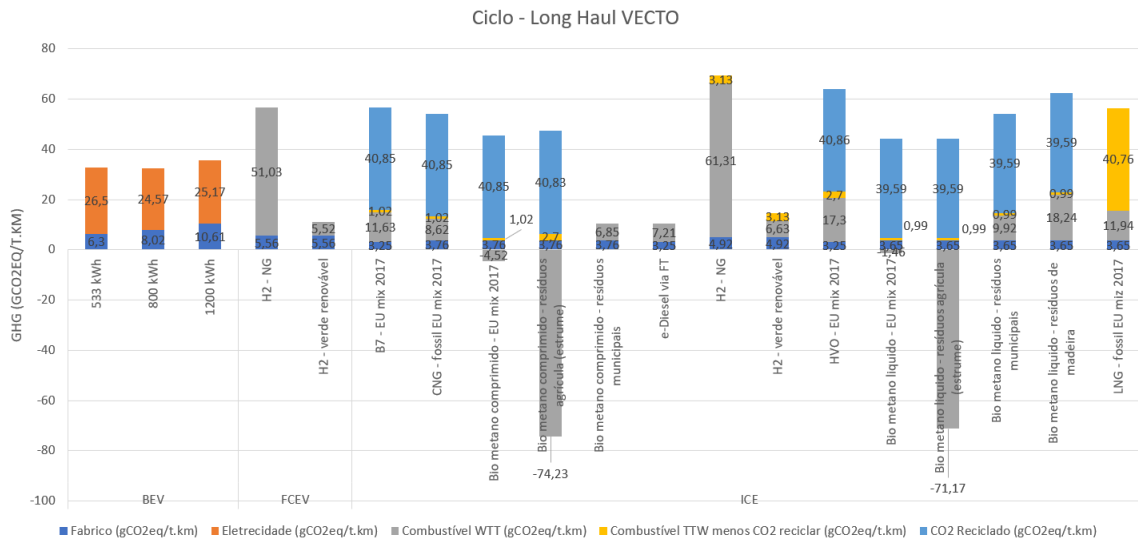


Figura 31: Resultados do Percurso Long Haul, original

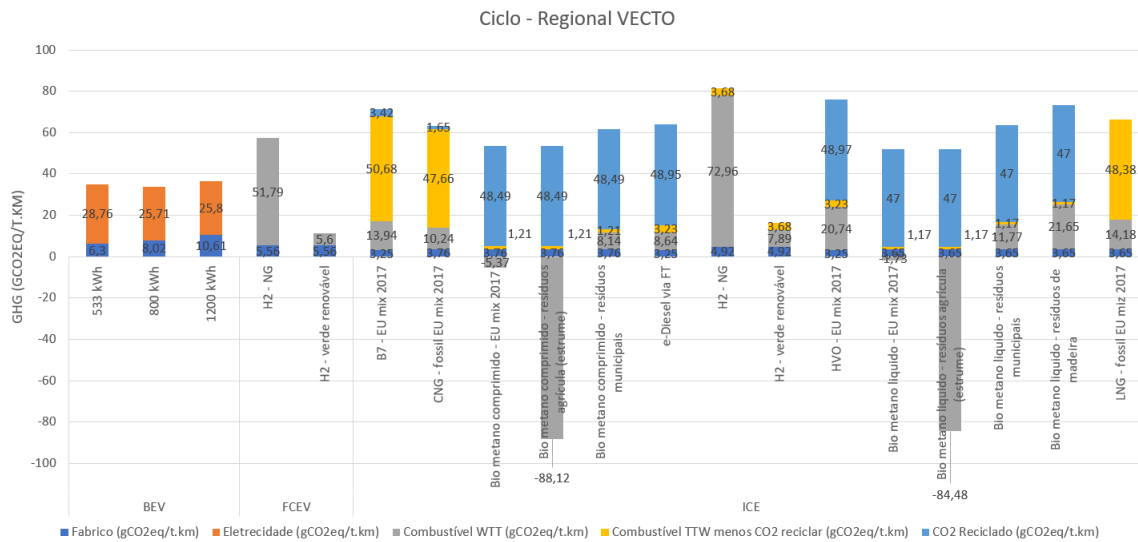


Figura 32: Resultados do Percurso Regional, original

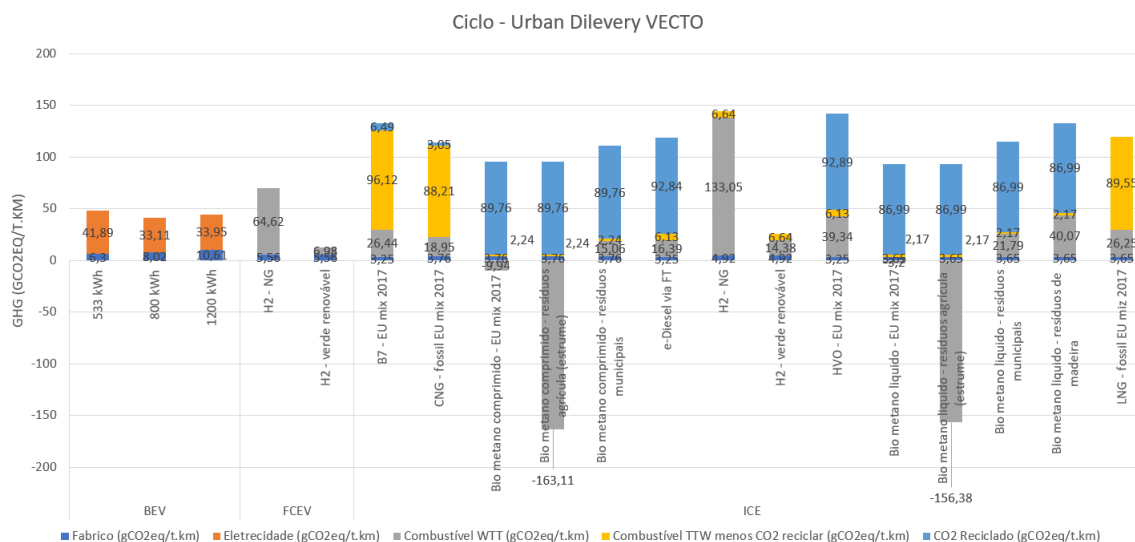


Figura 33: Resultados do Percurso Urbano, original

Observando as Figura 31, Figura 32 e Figura 33 verifica-se que os circuitos de longas distâncias favorecem emissões baixas já circuitos urbanos apresentam os maiores valores de emissões de GEE.

Emissões como: Combustíveis WTT, Eletricidade, Combustíveis TTW – CO<sub>2</sub> reciclado e CO<sub>2</sub> reciclado variam consoante o tipo de trajeto, sabendo que circuitos urbanos aumentam as parcelas de valores destes contributos.

O consumo de combustível é menor em circuitos de longa distância, uma vez que apresentam condições de conduções mais regulares comparando com os circuitos regionais e urbanos.

## Cargas

No programa CONCAWE, a carga transportada (carga útil) pelos veículos pesados (*payload*) é um fator essencial na avaliação do ciclo de vida LCA, pois influencia diretamente o consumo energético por tonelada-quilómetro (t.km). O modelo permite simular diferentes cenários de carga – (*low*), médio (*rep.*), e carga máxima (*max.*) – para refletir as variações reais da operação logística.

A carga *low* corresponde a 2600 kg, a *ref* a 19000 kg e a *high* 29000 kg para motores ICE e FCEV e para BEV 27800 kg (533 kW), 26400 kg (800 kW) e 24300 kg (1200 kW) (Pascal Smague, 2024).

Os valores definidos para as cargas *high* na tecnologia BEV diferem dos restantes, devido ao peso elevado das baterias e às limitações legais do peso bruto do veículo.

Nas Figura 34 e Figura 35 são apresentados os resultados.

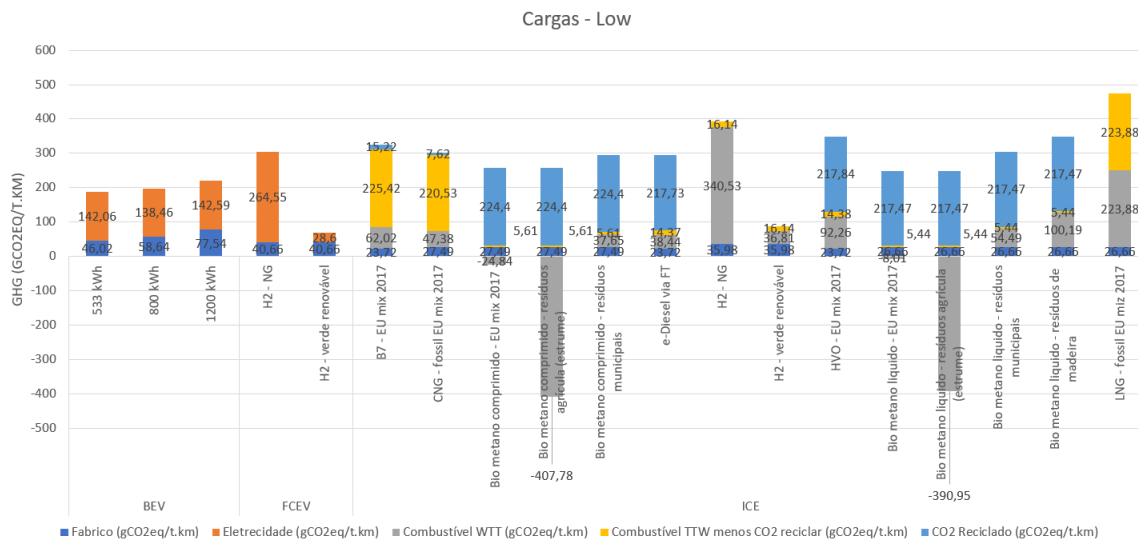


Figura 34: Resultados das cargas baixas, original

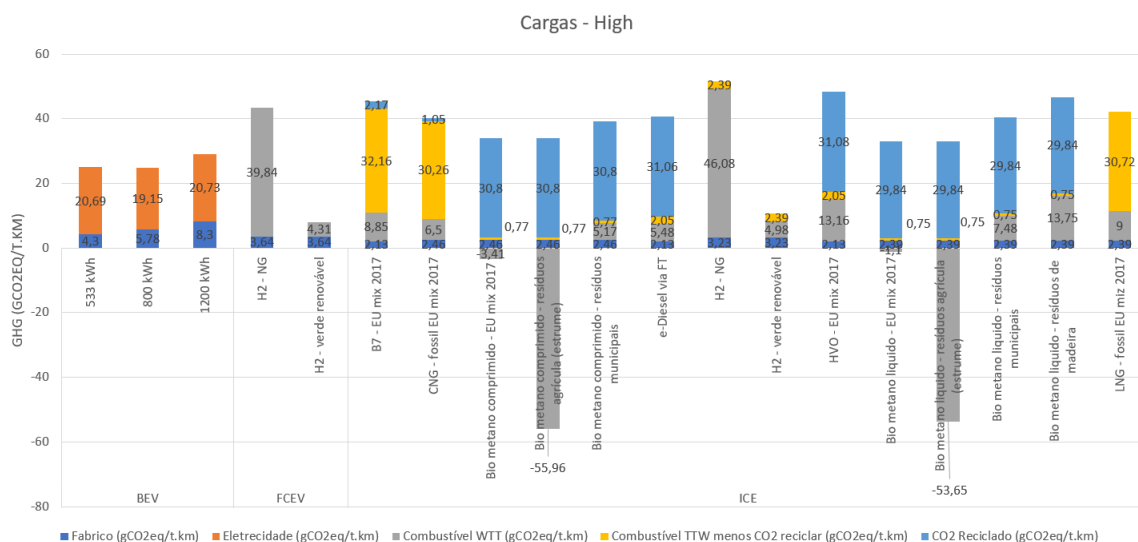


Figura 35: Resultados das cargas altas, original

Observando as variações de cargas, verifica-se que para as emissões de GEE são menores as cargas *high* comparando com as *low*, devido a otimização das viagens realizadas. As cargas mais elevadas, apesar de aumentarem o consumo total, reduzem as emissões específicas por tonelada transportada, tornando o transporte mais eficiente em termos ambientais. Por outro lado, operar frequentemente com carga reduzida pode aumentar significativamente as emissões por unidade útil.

Isto devesse ao facto de tentar otimizar a carga transportada, dado estar a transportar mais toneladas, as emissões são divididas por uma carga maior. Portanto, o valor por t.km diminui, refletindo maior eficiência logística, que se traduz numa maior eficiência por unidade de carga. Assim, existe uma otimização da logística e a redução de viagens em vazio. Ambas estratégias são cruciais na descarbonização do transporte de mercadorias. No programa da

CONCAWE, quando se aumenta o *payload* (carga útil), o consumo absoluto de combustível/energia aumenta, mas as emissões por tonelada-quilómetro (gCO<sub>2</sub>eq/t.km) diminuem.



## **4. Análise do Potencial de implementação do Biometano no setor dos transportes**

---

### **4.1. Introdução**

---

Este capítulo é dedicado à avaliação energética do biometano, examinando o seu desenvolvimento e a sua aplicação tanto no contexto europeu como nacional. Inicialmente, apresenta-se o panorama do biometano na Europa, seguido de uma caracterização mais detalhada da situação em Portugal, destacando alguns casos de estudo relevantes. Por fim, discute-se a perspetiva do mercado nacional, identificando estratégias de implementação que podem apoiar o uso do biometano como vetor relevante na descarbonização do setor dos transportes.

### **4.2. Metodologia**

---

A metodologia adotada para a análise energética do biometano baseia-se numa análise documental, recorrendo tanto a artigos científicos como a estimativas presentes na literatura. A opção por esta abordagem deve-se ao atual estado de desenvolvimento do biometano, sendo a informação empírica sobre determinados parâmetros ainda escassa ou de difícil acesso. Assim, o recurso a fontes proporciona uma base consistente e reconhecida na comunidade científica para apoiar a avaliação da viabilidade do biometano como alternativa energética, particularmente no âmbito dos veículos de transporte pesados. Além disso, esta abordagem proporciona uma visão geral do tema, considerando diferentes hipóteses, fontes de matéria-prima e cenários futuros de implementação.

Na avaliação da TCO, optou-se pelo consumo de energia/combustível como parâmetro principal, uma vez que ele proporciona uma base clara e mensurável para comparar diferentes alternativas de sistemas de propulsão. Além disso, sendo o consumo de energia um reflexo direto da eficiência de cada tecnologia, torna-se particularmente relevante na avaliação de diferentes cenários de implementação de biometano. Dessa forma, é possível determinar, a partir da produção de biometano do Plano de Ação para o Biometano, quantos veículos pesados poderiam ser abastecidos, considerando o seu consumo médio, e assim apoiar uma avaliação mais fundamentada do potencial de substituição de combustíveis fósseis nos veículos de transporte pesados.

Como referido anteriormente, e após analisar vários estudos observou-se que os custos da energia são os que tem maior peso na TCO, tal como demonstrado na Figura 36 e Figura 37.

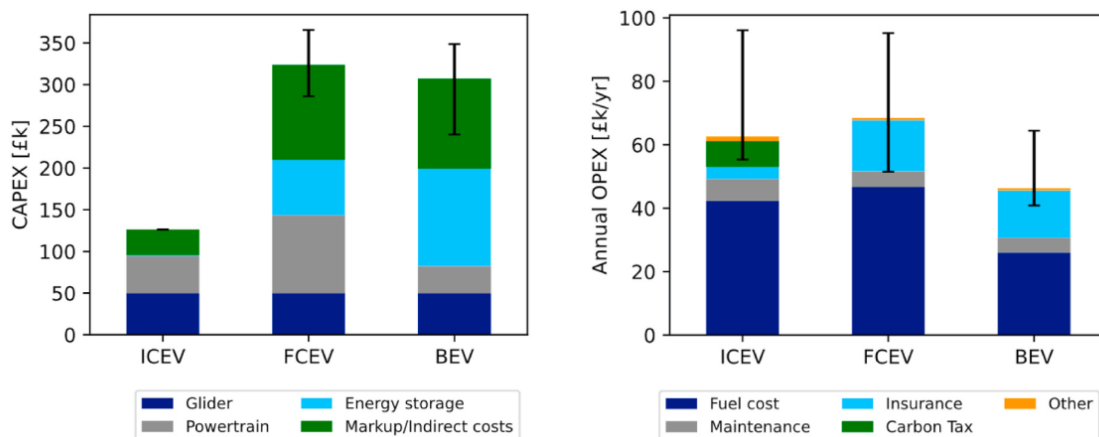


Figura 36: Custos de TCO de diferentes tecnologias, retirado de Wang et al. (2023)

O estudo desenvolvido por Wang et al. (2023), realizado no Reino Unido, analisa diversas tecnologias de transporte médio e pesado, demonstrando que o CAPEX para FCEVs e BEVs é significativamente mais elevado em comparação com os ICEVs (veículos com motor de combustão interna), sendo estes 156% e 144% mais caros, respetivamente. No caso dos BEVs para transporte pesado, os custos de armazenamento de energia são particularmente relevantes devido à maior exigência de autonomia. No entanto, esse impacto é atenuado ao longo do ciclo de vida do veículo, dado o custo relativamente baixo da eletricidade em comparação com o diesel e o hidrogénio. Nos FCEVs, embora o sistema de pilha de combustível represente o componente mais caro, o custo de armazenamento de energia é 43% inferior ao dos BEVs.

No que diz respeito ao OPEX, os ICEVs apresentam despesas consideráveis com combustível, manutenção, seguros e outros encargos. Apesar de esses custos variarem consoante o preço do diesel, tendem a ser mais elevados devido à maior frequência de manutenção. Por outro lado, os BEVs beneficiam de um OPEX substancialmente inferior, graças à maior eficiência energética e à reduzida necessidade de manutenção. O custo com energia (eletricidade) é também consideravelmente mais baixo face ao diesel. Os FCEVs, contudo, registam custos operacionais superiores aos dos BEVs, refletindo o preço elevado do hidrogénio e os encargos de manutenção associados às pilhas de combustível, que exigem cuidados técnicos específicos.

De uma forma geral, os ICEVs destacam-se por apresentarem um CAPEX mais acessível, os BEVs revelam-se mais económicos em termos de operação, e os FCEVs, apesar do potencial competitivo em termos de desempenho, enfrentam atualmente custos operacionais mais elevados. Importa ainda referir que, para as três tecnologias, o custo da energia continua a ser um dos principais fatores a influenciar o OPEX total, Wang et al. (2023).

A Figura 37 apresenta a TCO das várias tecnologias e fontes de energia para veículos de transportes pesados.

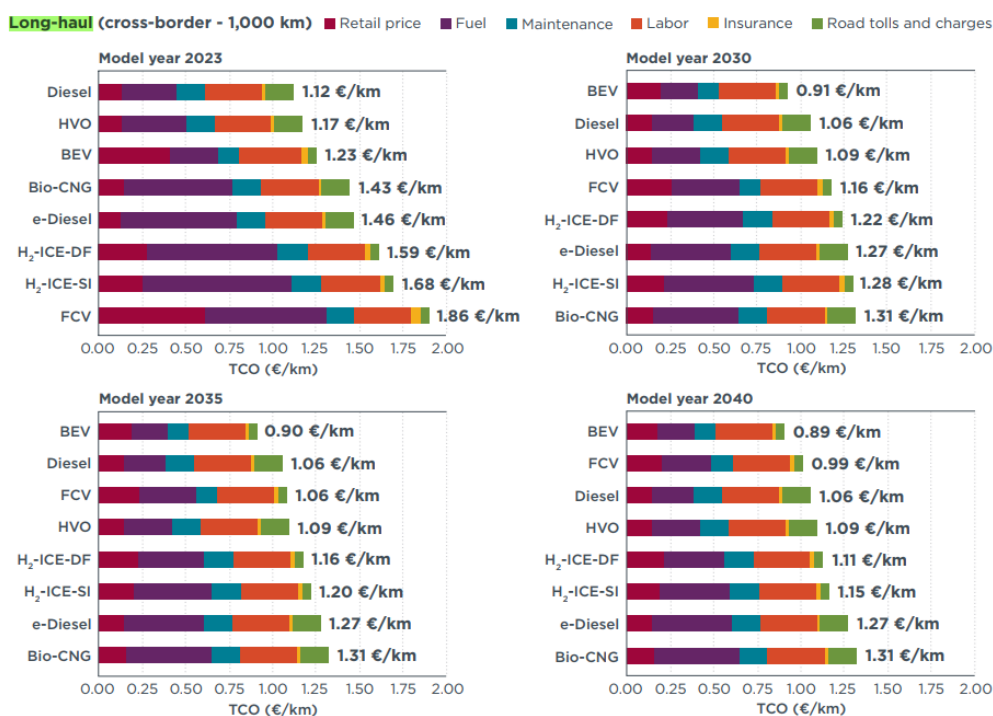


Figura 37: Custos de TCO de diferentes tecnologias, retirado de Basma e Rodriguez, (2023 b)

A partir da análise do estudo realizado por Basma e Rodriguez, (2023 b) conclui-se que os veículos pesados a diesel apresentam um custo inicial reduzido e beneficiam de uma infraestrutura consolidada, fruto da maturidade tecnológica e da ampla adoção no mercado. No caso dos BEVs, os custos de manutenção são significativamente mais baixos em comparação com os veículos a diesel, o que representa uma vantagem relevante no TCO. No entanto, os elevados custos de aquisição, aliados à necessidade de maior desenvolvimento tecnológico e de infraestrutura de carregamento, ainda representam um desafio para a adoção em larga escala dos BEV's para veículos pesados.

Quanto aos veículos FCEVs, ou motor de combustão interna que utilizam hidrogénio como combustível (H<sub>2</sub>-ICE), estes oferecem menores emissões durante a operação. No entanto, enfrentam custos tecnológicos elevados e limitações significativas em termos de acesso à infraestrutura de reabastecimento, o que compromete a sua viabilidade económica e operacional no curto prazo Basma e Rodriguez, (2023 b).

A análise do TCO ao longo do tempo para diferentes tecnologias de sistemas de propulsão de veículos pesados revela importantes tendências para o setor de transporte rodoviário de carga.

Em 2023, os veículos pesados a diesel continuam a apresentar o menor TCO, sendo considerados a opção mais económica, sobretudo devido à infraestrutura consolidada e à maturidade tecnológica. No entanto, estima-se que até 2040 o TCO possa vir a aumentar de forma significativa. Deste modo, a sua competitividade tende a diminuir face as outras tecnologias de sistemas de propulsão.

Os veículos pesados BEVs apresentaram em 2023, custos iniciais elevados, o que limita a sua adoção em larga escala. Contudo, o seu TCO já começa a tornar-se competitivo, graças aos custos operacionais mais baixos, nomeadamente no que diz respeito à eletricidade e à manutenção. Até 2040, projeta-se uma redução significativa no preço das baterias, o que deverá impulsionar a penetração desta tecnologia no mercado. Neste contexto, a médio prazo os BEVs poderão alcançar um TCO inferior ao dos veículos a diesel, posicionando-se como uma alternativa economicamente atrativa e ambientalmente mais sustentável.

Por sua vez, os veículos pesados FCEVs ainda apresentam, em 2023, um TCO elevado, devido aos custos tecnológicos e à limitada infraestrutura de abastecimento de hidrogénio. No entanto, espera-se que até 2040 haja uma redução nos custos de produção do hidrogénio e uma expansão significativa da infraestrutura, o que poderá tornar os FCEVs mais competitivos. Projeções indicam que esta tecnologia poderá alcançar a paridade de TCO com os veículos a diesel a meio da década de 2040, Basma e Rodriguez (2023 b).

Os veículos pesados com motor de combustão interna (ICE) que utilizam a hidrogénio apresentam, atualmente, um desempenho semelhante ao dos veículos a diesel, embora com menor eficiência. A sua viabilidade futura, até 2040, dependerá fortemente da disponibilidade e acessibilidade ao hidrogénio. Contudo, ao contrário das tecnologias elétricas, é improvável que esta solução se torne competitiva, especialmente considerando o avanço contínuo da eletrificação no setor dos transportes pesados.

Por fim, os veículos pesados que utilizam biocombustíveis, como o e-diesel, HVO e biometano apresentam em 2023, custos relativamente competitivos quando comparados ao diesel convencional. No entanto, esses custos estão sujeitos à volatilidade dos preços dos biocombustíveis. Até 2040, prevê-se um aumento do TCO dessas tecnologias, impulsionado pela crescente procura por combustíveis sustentáveis e pelo endurecimento das regulamentações ambientais, sobretudo no que se refere às emissões líquidas de carbono.

Importa destacar que, no cálculo do TCO, os custos com combustível ou energia representam uma das componentes com maior impacto, sendo determinantes na comparação entre diferentes tecnologias de sistemas de propulsão, Basma e Rodriguez (2023 b).

O artigo Fuel Prices (2024) refere que “os custos de combustível representam uma parte significativa da TCO de qualquer autocarro ou veículo pesado comercial ao longo da vida útil do veículo. Da perspetiva de uma empresa, os custos de combustível representam cerca de um terço dos custos anuais. Compreender a dinâmica dos preços dos combustíveis é, portanto, crucial para que as operadoras preservem a lucratividade e as margens reduzidas, mantendo a capacidade, o serviço e a qualidade do transporte para os seus clientes”.

Dessa forma, com base na análise dos documentos estudados, verifica-se que o parâmetro com maior impacto na TCO é o custo da energia. Assim, o presente trabalho irá centrar-se na produção de biometano, procurando avaliar se a produção atual em Portugal permite satisfazer as necessidades do setor dos transportes.

### 4.3. Biometano na Europa

No artigo desenvolvido pelo autor Sulewski (2023) apresenta uma análise da a produção de biometano na União Europeia e destaca o seu desenvolvimento e potencial desenvolvimento.

O uso do biometano é crucial para descarbonizar vários setores e ajudar a atingir as metas de emissões de CO<sub>2</sub>, uma vez que, este pode reduzir as emissões de GEE até 80% quando utilizando em substituição de combustíveis fósseis, em alguns casos, o documento apresenta casos específicos onde existe uma redução de 200%, como por exemplo nas emissões líquidas negativas.

A Figura 38 e Figura 39 destacam o aumento das instalações de produção de biometano na Europa.

Neste caso, em 2020 quase 900 instalações produziram 3.3 *billion cubic meters* (BCM) de biometano, o que equivale a 32 TWh (115,2 PJ). A Alemanha é o país onde existe maior produção de biometano com 11 TWh, produzidos anualmente. Já a França é o país onde se encontram mais instalações de produção de biometano. O segundo país com maior produção de biometano é a Dinamarca com 4 TWh. Seguem-se os Países Baixos e Itália com cerca de 2 TWh, similar a França, seguido da Suécia.

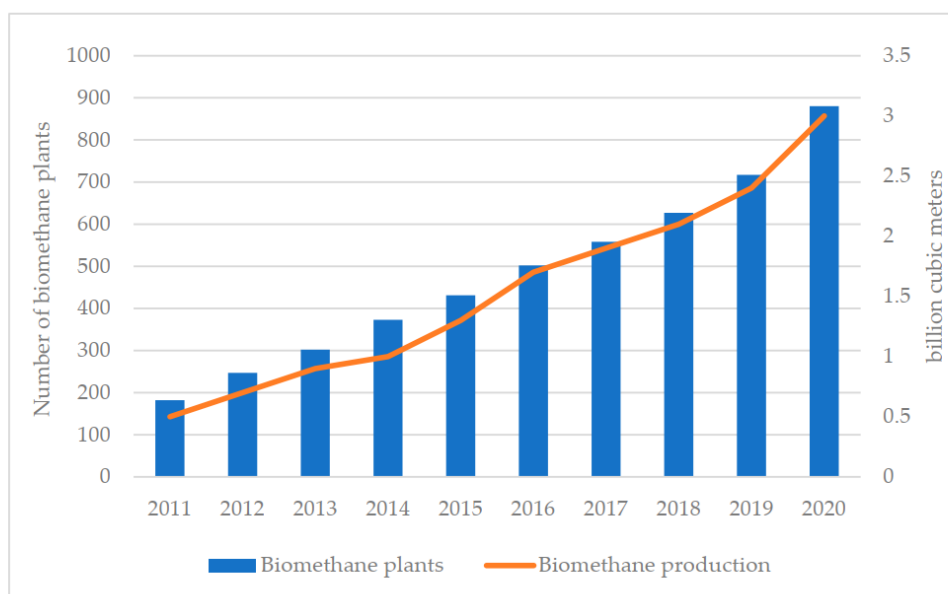


Figura 38: Infraestruturas para produção de biometano, retirado de Sulewski (2023)

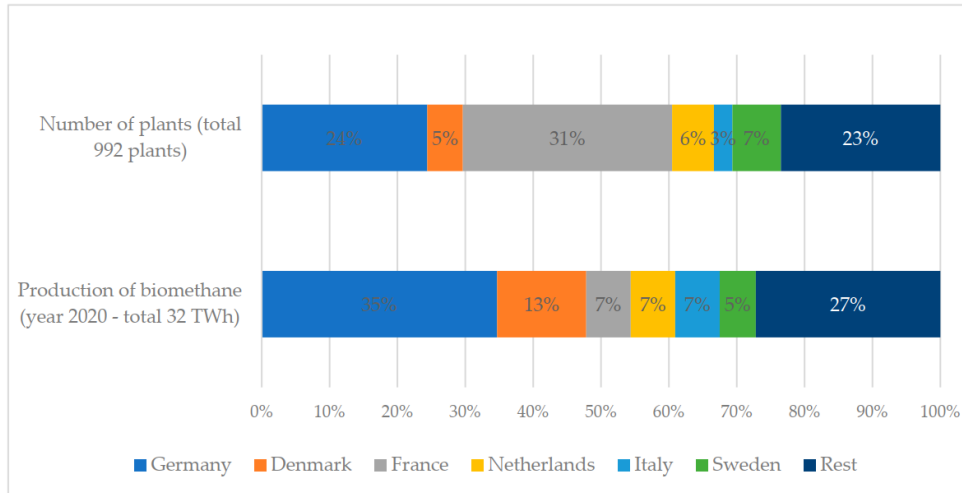


Figura 39: Os principais produtores de biometano na EU, retirada de Sulewski (2023)

A produção de biometano é baseada em várias categorias de desperdícios orgânicos, observando a Figura 40, é possível verificar que os resíduos agrícolas têm vindo a ser os mais utilizados.

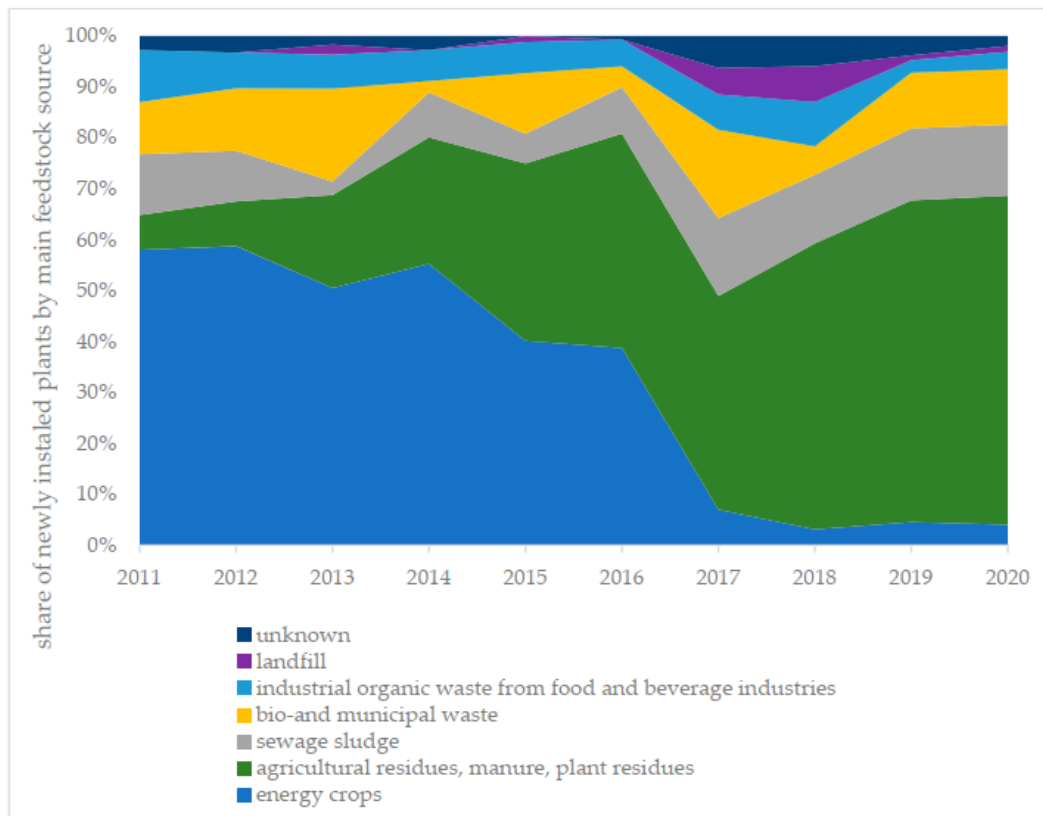


Figura 40: Tipo de resíduos utilizados na produção de biometano, retirado de Sulewski (2023)

Também é importante referir que o custo total do biometano pode ser influenciado pelos seguintes fatores: tipos de tecnologias na extração, fatores geográficos e logísticos, matéria-prima, apoios e dimensão da produção.

Numa visão mais de longo prazo, tendo em vista o ano de 2050 o artigo apresenta a Figura 41 que demonstra as perspectivas dos países para a produção de biometano e a quantidade anual.

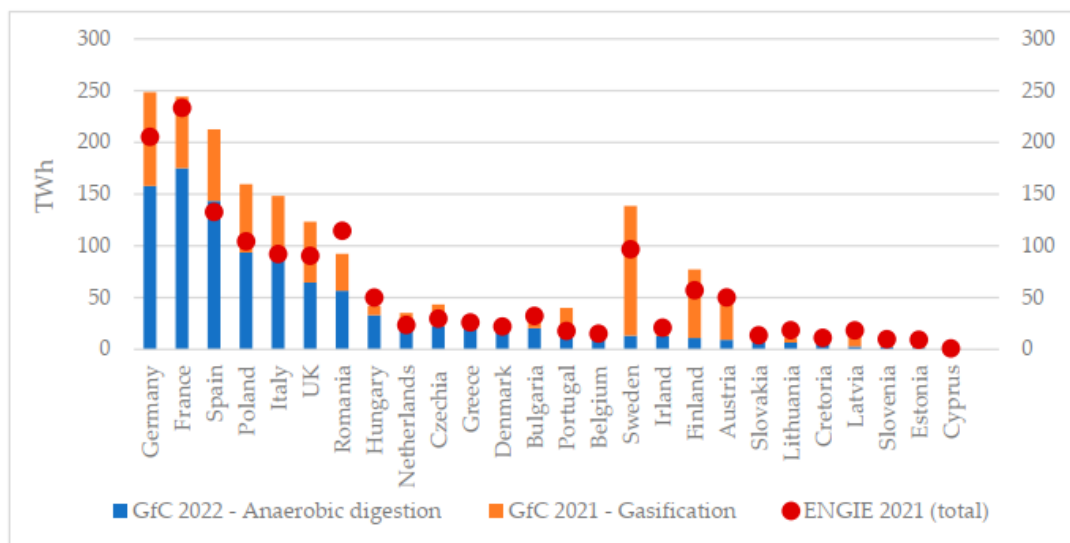


Figura 41: Estimativa dos potenciais produtores para 2050, retirado de Sulewski (2023)

Este artigo também demonstra que um dos últimos relatórios da *European Biogas Association* (EBA), indica que o custo atual de biometano na Europa é de 80€/MWh, onde 20% matérias-primas, 40% são de CAPEX e 40% são de OPEX.

Também no artigo é demonstrado que os custos totais de produção de biometano, por digestão anaeróbia, incluindo os custos de matéria-prima podem ser entre de 70 €/MWh e 90 €/MWh, com o nível superior para instalações mais pequenas e o nível inferior para instalações maiores.

Noutra fonte citada neste artigo, na perspectiva para 2050 podem diminuir em cerca de 20 €/MWh, para o nível de 57 €/MWh. Do mesmo modo, o relatório da EBA indica que, nos próximos 30 anos, os custos de produção do biometano deverão diminuir para cerca de 57 a 66 €/MWh. “Espera-se que tal se deva a um aumento da escala de produção, à redução dos custos de melhoramento (as unidades de melhoramento do biogás podem ser alimentadas com biogás de diferentes digestores, reduzindo os custos de melhoramento), à redução dos custos da matéria-prima, a melhorias nas tecnologias de pré-tratamento que aumentam a eficiência da digestão anaeróbia e à valorização do CO<sub>2</sub> biogénico obtido durante o melhoramento do biogás”. Assim comparando com custos mencionados com os preços atuais de gás natural, em novembro 2022, que são em estimativa 120 €/MWh, o biometano apresenta uma produção lucrativa Sulewski (2023).

Assim nas conclusões do artigo observa-se que:

- O aumento da produção de biometano foi impulsionado pela da crise energética e pela guerra na Ucrânia, levando à redução da dependência de combustíveis fósseis e aos planos da União Europeia;
- Atualmente o mercado de biometano ainda é pouco desenvolvido na União Europeia e em 2019 representa menos de 4% da procura de gás natural;
- No futuro a meta será duplicar o consumo até 2030 de 17 BCM (179 TWh) para 35 BCM (369 TWh) e a longo prazo para 2050 atingir 1000 TWh por ano;
- Em alguns anos o biometano poderá ser mais barato que o gás natural;
- O nível dos desafios, estes estão nos preços do gás natural e dos custos de produção de biometano, dificuldade em avaliar a rentabilidade a longo prazo, a necessidade de criar incentivos políticos e Estados-Membros têm de definir os mecanismos e montantes de apoio para o biometano, Sulewski (2023).

A viabilidade económica da produção de biometano na Europa depende fortemente dos mecanismos de apoio e incentivos implementados pelos diferentes Estados-Membros. Em países como Itália, os produtores beneficiam de um sistema atrativo de incentivos: além de o poderem vender a um preço próximo ao do gás natural (com um desconto inferior a 5%), recebem ainda certificados de incentivos à produção de biocombustíveis (CIC), os certificados CIC são garantias de origem que certificam que um determinado volume de gás corresponde a biometano renovável. Funcionam como um selo de rastreabilidade, permitindo comprovar a origem sustentável do gás. São particularmente relevantes para comércio, descarbonização e cumprimento de metas energéticas, que representam um incentivo adicional de cerca de 65€/MWh. Cada certificado equivale a 5GCal (aproximadamente 5,8 MWh) e tem um valor fixado em 375 €.

Na Dinamarca, o modelo de apoio baseia-se na compensação direta dos custos de produção. Os produtores vendem o biometano ao preço de mercado do gás natural e recebem um subsídio que cobre a diferença entre o custo de produção e esse preço, assegurando a viabilidade económica da operação.

Importa referir que, nas condições atuais de mercado, a produção de biometano não é ainda competitiva face ao gás natural, essencialmente devido aos preços baixos deste último. Ainda assim, o contexto de transição energética e descarbonização da economia justifica a continuidade e o reforço de políticas de incentivo à produção de biometano. Adicionalmente, é importante salientar que, conforme estabelecido na Diretiva RED II, não se devem utilizar culturas energéticas dedicadas na produção de biogás, para evitar competição com terras destinadas à produção alimentar.

## 4.4. Biometano em Portugal

---

Como demonstrado na secção 2.2, Portugal apresentou um plano de ação para promover a produção e distribuição de biogás.

Na iniciativa aprovada pelo estado português, Plano de Ação para o Biometano (PAB), Portugal visa promover o mercado do biometano como uma forma sustentável de reduzir as importações de gás natural utilizado no setor industrial e doméstico e aumentar de utilização de biometano no setor dos transportes.

O PAB foca-se em três objetivos:

- Capacitar setores estratégicos para o aproveitamento do potencial de biogás, de forma a implementar um mercado interno de biometano;
- Consolidar o desenvolvimento do mercado de biometano nacional enquanto vetor estratégico de descarbonização e da bioeconomia;
- Construir um setor sustentável do ponto de vista social e ambiental.

O PAB foca-se em cinco setores estratégicos para o seu desenvolvimento, concluindo os resíduos de elevado potencial:

- Resíduos Sólidos Urbanos;
- Águas Residuais;
- Agricultura;
- Pecuária;
- Agroindustrial.

O PAB prevê duas fases para a implementação da estratégia. A primeira fase será dedicada à criação de um mercado em Portugal até 2026, para isso será necessário:

- Prosseguir um quadro de apoios à produção;
- Efetivar a recolha de bioresíduos e capacitar o Sistema de Gestão de Resíduos Urbanos (SGRU) a maximizar a valorização orgânica por digestão anaeróbia;
- Fomentar a reconversão de unidades de biogás já existentes para biometano;
- Estabelecer metas de incorporação na Rede Pública de Gás Natural;
- Simplificar e agilizar os processos de licenciamento.

A segunda fase Portugal consiste em consolidar o mercado, e no aumento da escala de produção de biometano a médio-prazo, entre 2026 e 2040. Para isso as medidas a implementar são:

- O aproveitamento do potencial no setor pecuário (estrumes e chorume - líquido poluente que sai da matéria orgânica);
- A avaliação de tecnologias inovadoras para a produção de biometano e a consequente criação de novas cadeias de valor;

- Aumento do financiamento em Investigação & Desenvolvimento nas áreas de investigação associadas ao aproveitamento deste gás alternativo e renovável.

O PAB estima uma produção de 2,7 TWh em 2030 a partir da digestão anaeróbica dos cinco setores residuais estratégicos, permitindo a substituição de até 9,1% do consumo de gás natural previsto para o mesmo ano Sustentável (2024).

Na fundamentação das metas propostas para a transição energética, um artigo publicado pelo Jornal de Negócios refere que a produção de biometano se apresenta como uma solução estratégica no contexto da transição energética nacional, com elevado potencial de crescimento e impacto económico. De acordo com um estudo da consultora Roland Berger para a Floene, Portugal poderá aumentar a produção de biometano em 178% até 2030, alcançando 2,5 TWh, com projeções de 14 TWh até 2050. Esta evolução poderá resultar numa poupança acumulada de até 2,5 mil milhões de euros face a uma eletrificação extensiva da economia, sendo 1,4 mil milhões diretamente para os consumidores.

A nível europeu, estima-se que o biogás e o biometano possam substituir até dois terços do consumo de gás natural até 2050, partindo dos atuais 43 TWh para cerca de 370 TWh em 2030. Em Portugal, o PAB estabelece como meta substituir 9% do consumo de gás natural até 2030. Este objetivo é mais ambicioso que o de países como Espanha, requerendo uma aceleração do investimento, à semelhança do modelo francês, onde se ligam semanalmente múltiplas unidades à rede.

Portugal conta atualmente com cerca de 70 unidades de produção de biogás, localizadas sobretudo em aterros e ETAR, que podem ser adaptadas à produção de biometano através de investimentos relativamente reduzidos (cerca de 1,5 milhões de euros por unidade). A proposta da Floene prevê a substituição das atuais tarifas subsidiadas (120–130 €/MWh) por mecanismos de *feed-in tariffs* (incentivos financeiros criados solicitado pelo governo para promover a produção de energias renováveis) mais estáveis (cerca de 62 €/MWh), com custos de produção a longo prazo estimados entre 40 a 45 €/MWh.

O estudo estima que, até 2030, seja possível integrar 16% de gases renováveis na rede, correspondendo a 1,5 TWh de biometano e 1,1 TWh de hidrogénio verde. O biometano pode ainda assumir um papel relevante na valorização de resíduos orgânicos, contribuindo para a economia circular e gerando receitas adicionais para agricultores, municípios e indústrias.

Do ponto de vista económico, a integração de gases renováveis representa a via mais eficiente para a descarbonização do sistema energético nacional, exigindo investimentos inferiores aos de uma eletrificação massiva ou ao recurso extensivo ao hidrogénio. A estratégia proposta permitirá, ainda, mitigar riscos associados à subutilização do potencial de produção estimado (2,7 TWh em 2030), cuja concretização dependerá da existência de incentivos claros e de uma política regulatória favorável, Silva (2024).

## 4.5. Projetos Piloto

---

A análise de projetos-piloto e cenários de implementação do biometano é fundamental para compreender a viabilidade técnica, económica e ambiental desta fonte de energia. Nesta secção são analisados documentos e artigos científicos que apresentam casos práticos e estratégias adotadas noutros contextos, que não os transportes. O objetivo principal é destacar ideias relevantes que possam orientar a definição de um modelo eficaz para o mercado de biometano em Portugal, com especial enfoque no setor dos transportes.

O trabalho desenvolvido pelos autores, Noussan et.al (2024) analisa o papel do biometano na descarbonização dos transportes públicos em Itália, com base em dados sobre produção, consumo e emissões. Em Itália, a produção projetada de biometano em 2030 é de 5,7 BCM (60,99 TWh), sendo 1,5 BCM (16,05 TWh) destinados ao setor dos transportes. Em Itália, em 2022, a maioria dos autocarros urbanos ainda usava gasóleo (67%), com apenas 4% elétricos e 29% a GNC.

Itália tem cerca de 2200 centrais de biogás, apoiadas por incentivos estatais, e parte da sua capacidade está agora a ser redirecionada para a produção de biometano para a utilização no setor dos transportes.

Noussan et.al (2024) estudaram dois cenários futuros para 2030:

- 1º cenário: Manutenção do número de autocarros GNC e BEV, com substituição de diesel;
- 2º cenário: Transição acelerada para veículos BEV, mantendo estável o número de GNC.

A Figura 42 apresenta as estimativas para os 2 cenários.

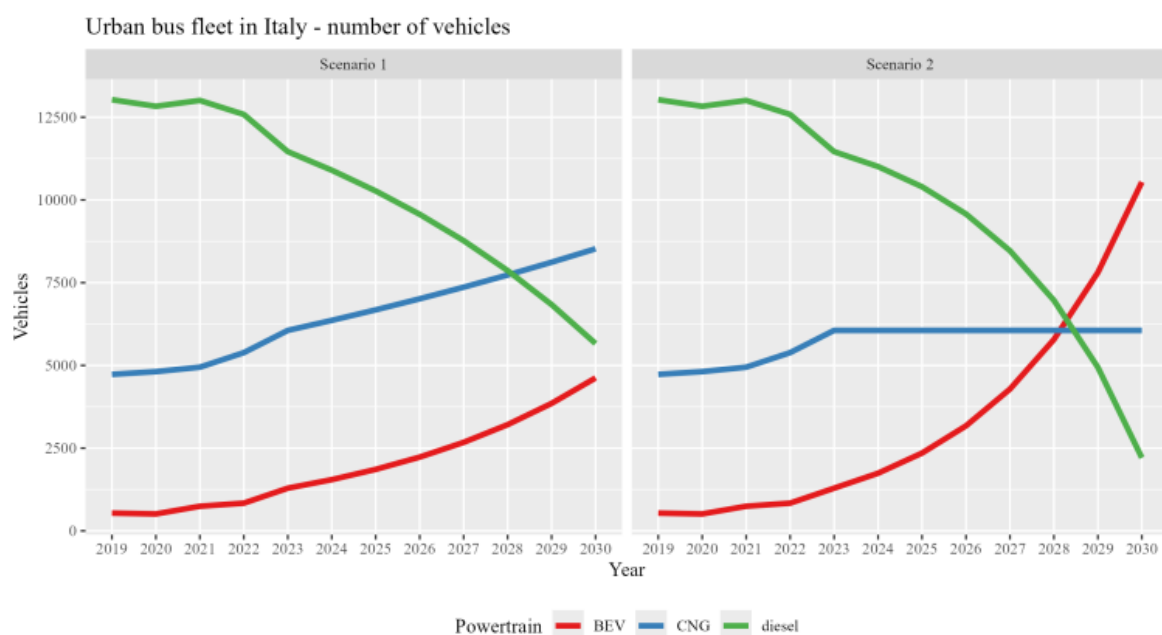


Figura 42: Estimativa dos 2 cenários, retirado de Noussan et.al (2024)

Assume-se uma substituição progressiva do gás natural por biometano nos autocarros a GNC até atingir 100% em 2030. Os resultados mostram reduções significativas de emissões WTW:

- Cenário 1: 55% de redução (para 0,44 Mt CO<sub>2</sub>);
- Cenário 2: 73% de redução (para 0,27 Mt CO<sub>2</sub>).

Este estudo demonstra que o biometano pode desempenhar um papel essencial na transição energética dos transportes públicos urbanos, sobretudo quando combinado com a eletrificação progressiva da frota. Ambos os cenários analisados indicam reduções substanciais de emissões até 2030, comprovando que a integração de biometano, mesmo em percentagens relativamente modestas, contribui significativamente para os objetivos de descarbonização. A infraestrutura para veículos elétricos e a produção/distribuição de biometano serão, no entanto, fatores críticos para garantir o sucesso da implementação. Estes resultados oferecem uma base sólida para políticas públicas em Portugal que visem uma transição semelhante, especialmente no setor dos transportes urbanos, onde o potencial do biometano está ainda por explorar.

O artigo realizado também por Noussan et al. (2023) explora o papel do biometano em diferentes cenários de produção e uso no setor dos transportes, com projeções para o ano de 2030. Estima-se que 1 BCM de biometano possa evitar 2,33 a 4,37 MtCO<sub>2</sub>, dependendo da origem das matérias-primas. A análise aponta o biometano como uma solução eficaz para

setores de difícil eletrificação, como o transporte rodoviário de longa distância e o transporte marítimo.

Três cenários foram considerados:

- Cenário baixo: produção de 2,3 BCM/ano — viável com recursos atuais, mas com impacto limitado;
- Cenário médio: produção de 5,5 BCM/ano — maior redução de emissões, torna o biometano mais competitivo;
- Cenário alto: produção de 7,6 BCM/ano — potencial máximo, requer fortes investimentos e políticas públicas robustas.

O estudo também destaca benefícios adicionais do biometano: valorização de resíduos, redução da dependência de combustíveis fósseis, aproveitamento da infraestrutura de gás existente e oportunidades económicas para áreas rurais. Contudo, aponta desafios importantes, como custos de produção elevados, limitação de matérias-primas e barreiras logísticas na produção e distribuição.

A análise considera ainda o potencial adicional de captura e armazenamento ou reutilização de CO<sub>2</sub> durante a produção de biometano, o que poderia contribuir para evitar mais 3,1 a 8,1 MtCO<sub>2</sub>. A Figura 43 mostra as poupanças a nível das emissões nos diferentes cenários.

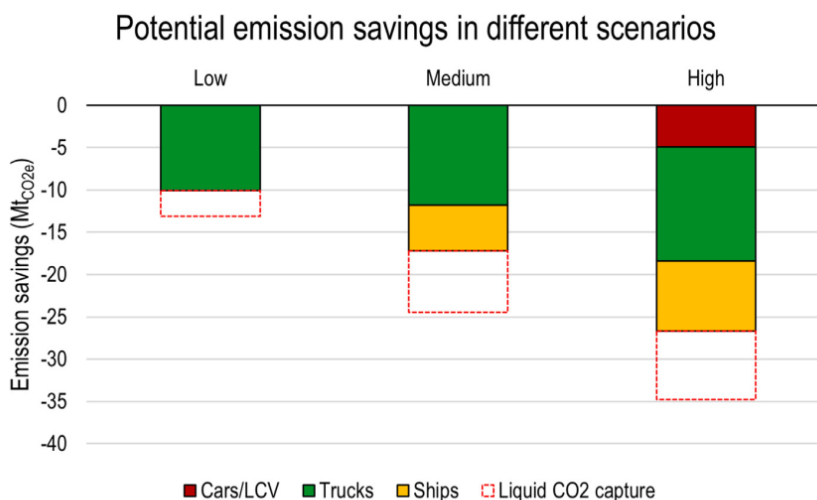


Fig. 3. Total potential emission savings by scenario and application (MtCO<sub>2e</sub>).

Figura 43: Potencial de poupança das emissões consoante os cenários, retirado de Noussan et al. (2023)

O artigo confirma o elevado potencial do biometano como ferramenta estratégica para a descarbonização dos transportes em Itália. Independentemente do cenário, a utilização crescente deste combustível renovável resulta em poupanças significativas de emissões de gases com efeito de estufa. O biometano revela-se particularmente vantajoso em setores de difícil eletrificação e pode ser implementado de forma eficiente através da infraestrutura de gás natural existente. No entanto, para alcançar os cenários mais ambiciosos, será indispensável superar barreiras económicas e logísticas com políticas públicas adequadas e investimentos sustentados em infraestrutura. Estes dados reforçam a relevância do

biometano também para Portugal, como complemento à eletrificação no caminho da neutralidade carbónica no setor dos transportes, Noussan et al. (2023).

Em Portugal, vários artigos demonstram a necessidade do biometano, que seja nos transportes, como também no uso de produção de eletricidade, como fonte de descarbonização de emissões.

Um projeto piloto entre a Dourogás e Leroy Merlin testa o biometano em veículos pesados de mercadorias (SUPPLY CHAIN, 2023). A Dourogás e a Leroy Merlin lançaram um projeto piloto nacional para testar a utilização de biometano em veículos pesados de mercadorias, com duração de três meses a partir de setembro. Cada veículo pesado percorrerá cerca de 5000 km por mês, com o objetivo de evitar mais de 10 toneladas de emissões de CO<sub>2</sub>, comparativamente aos combustíveis fósseis.

O biometano, fornecido pela Dourogás, é destacado como uma alternativa renovável ao Gás Natural Veicular, com vantagens ambientais e económicas. Não requer alterações nas frotas existentes, já que os veículos a GNL e GNC são compatíveis com este combustível.

O projeto promove a economia circular, a independência energética e o desenvolvimento regional, sendo visto como uma solução estratégica para a descarbonização da mobilidade e uma transição mais sustentável nas cidades. A Leroy Merlin reforça assim os seus Compromissos de Impacto Positivo através desta colaboração.

A nível do projeto ainda não existe resultados publicados.

No contexto da descarbonização do setor dos transportes, destaca-se também outra iniciativa pioneira da Dourogás, em parceria com a HAVI e a Scania, que resultou no primeiro abastecimento em Portugal de um veículo pesado com gás natural veicular (GNV) 100% renovável – biometano. A operação, realizada em 2021, percorreu cerca de 8000 km num mês, demonstrando o potencial do biometano como solução imediata para uma mobilidade mais sustentável.

Este projeto integrou-se no consórcio ibérico ECO-GATE, que visa promover a eficiência do mercado de GNV através de soluções inovadoras, alinhadas com os objetivos da transição energética. Os veículos a gás natural da Scania estão aptos a operar com biometano sem necessidade de alterações técnicas, facilitando a sua integração em frotas existentes.

Comparado com o gasóleo, o GNV permite reduções significativas nas emissões: -30% em CO, -35% em NO<sub>x</sub>, -20% em CO<sub>2</sub>, -95% em partículas e elimina completamente as emissões de SO<sub>2</sub>. Estes benefícios reforçam o papel dos gases renováveis na melhoria da qualidade do ar e no combate às alterações climáticas.

O biometano utilizado foi produzido no âmbito do projeto Biogasmove, que valoriza resíduos orgânicos por digestão anaeróbia. O modelo foi ampliado com a produção de biometano a partir de lamas de ETAR, em parceria com as Águas do Tejo Atlântico.

As entidades envolvidas destacam o impacto estratégico do projeto: a HAVI pretende reduzir 40% das suas emissões até 2030, a Scania considera o biometano como um vetor de descarbonização no curto prazo, e a Dourogás compromete-se a disponibilizar este combustível em todos os seus postos até 2025, dourogas (2021).

Em Mirandela, no Centro de Competências de Hidrogénio e Gases Renováveis, ocorreu a primeira injeção de biometano 100% renovável na rede nacional de gás. A iniciativa, parte do projeto Biogasmove, visa provar a viabilidade técnica, económica e ambiental dos gases renováveis, principalmente em setores de difícil eletrificação. Produzido a partir de resíduos orgânicos, o biometano é totalmente compatível com a rede de gás.

Durante a cerimónia, o Ministro do Ambiente destacou:

- Os três fluxos prioritários para produção de biogás: fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos, lamas de ETAR e efluentes agropecuários;
- O biometano como ferramenta estratégica para reduzir as importações de gás natural;
- A importância dos gases renováveis para a criação de emprego qualificado e crescimento económico.

O projeto permitiu ainda testar e comparar o desempenho de veículos de recolha de resíduos a GNC e a biometano, validando a sua eficácia técnica e ambiental.

Complementarmente, a Dourogás está a desenvolver os projetos Solargasmove e Hidrogasmove, em parceria com as Águas do Tejo Atlântico, para produção de hidrogénio verde e biometano a partir de lamas de ETAR, reforçando o compromisso com soluções inovadoras em gases renováveis.

Assim, o Biogasmove posiciona-se como um marco nacional na transição energética, evidenciando o papel do biometano como combustível de futuro e colocando Portugal na vanguarda da descarbonização na Europa, EURO transporte (2022).

Em 2023, o setor dos transportes representou 37,2% do consumo final de energia em Portugal, sendo o transporte rodoviário responsável por 95,3% da mobilidade energética, águas & ambiente online (2024).

Ainda que a eletrificação tenha registado um crescimento, a eletricidade correspondeu apenas a 0,32% do consumo rodoviário, enquanto o gás natural veicular atingiu 0,58%, águas & ambiente online (2024).

A partir de outubro de 2023, deu-se a injeção de biometano 100% renovável na rede, totalizando 180,5 GWh (0,65 PJ) distribuídos principalmente para veículos pesados, sendo uma solução complementar à eletrificação.

Com 19 postos gás natural envolvidos, o biometano já representa cerca de 35% da energia renovável utilizada na mobilidade, evidenciando o seu potencial como alternativa sustentável.

Adicionalmente, destaca-se a compatibilidade do biometano com a frota gás natural, a viabilidade econômica, o armazenamento facilitado e a possibilidade de injeção na rede de gás, ampliando o seu uso a outras aplicações, águas & ambiente online (2024).

## **4.6. Perspetiva do mercado de Biometano em Portugal e Estratégias de Implementação**

---

O Plano de Ação para o Biometano (PAB) surge como uma resposta estratégica à necessidade de acelerar a transição energética em Portugal, promovendo a substituição progressiva de combustíveis fósseis por alternativas renováveis e sustentáveis. Esta secção tem como objetivo demonstrar as metas e projeções do plano PAB e demonstrar potenciais estratégias para a implementação e concretização destas metas.

Será igualmente apresentada a dimensão do consumo energético nacional, com ênfase no consumo anual de gás natural, de modo a aferir a relevância e o impacto potencial do biometano no contexto energético português. Neste sentido, também se analisará a quantidade de biometano já alocada ou prevista no âmbito do plano, servindo de base para a construção de diferentes cenários de transição energética.

Um dos enfoques será a aplicação prática do biometano no setor dos transportes, através da sua utilização em veículos pesados, nomeadamente através da estimativa do número de veículos pesados que poderiam circular com base na produção nacional projetada. Esta análise permitirá avaliar o seu contributo efetivo para a descarbonização do setor dos transportes.

Por fim, será realizada uma análise crítica ao PAB e às suas limitações, identificando barreiras técnicas, económicas e regulamentares que possam comprometer a sua execução. Conclui-se com a apresentação de estratégias e planos complementares que possam contribuir para a valorização da utilização do biometano em Portugal, integrando perspetivas de inovação, investimento e políticas públicas.

Em Portugal, no ano de 2023 atingiu-se um consumo energético final de 195,8 TWh, uma subida de 1,7% face a 2022, DGEG (2024).

Já na produção observa-se que as energias renováveis abasteceram 61% do consumo de eletricidade em 2023, num total de 31,2 TWh, Greensavers (2024).

Em 2024, o consumo energia elétrica abastecido a partir da rede pública totalizou 51,4 TWh, sendo que 71% do consumo de eletricidade em 2024 foi garantido por energias renováveis e totalizou-se 36,7 TWh, Sul informação (2025).

As análises realizadas pela DGEG mostram que o setor dos transportes continua a ser o principal consumidor de energia representando, em 2022, 35,7% do consumo total de energia

final (+1,2%, face a 2021) e ligeiramente abaixo do valor verificado em 2012 (36,1%) DGEG (2024).

Posto isto, com base nas diretrizes do PAB, Portugal pretende iniciar o mercado de biometano e depois consolidar. Para isso, o PAB prevê que uma produção de 2,72 TWh de biometano em 2030, e 5,57 TWh para 2040, DGEG (2024). Na Tabela 6 são apresentadas as matérias-primas utilizadas na produção do biometano e também as suas estimativas de produção.

*Tabela 6: Matérias-primas para a produção de biometano, informação obtida em DGEG (2024)*

<b>Matéria-prima</b>	<b>Matérias-primas usadas para biogás (%)</b>	<b>Biogás (TWh)</b>	<b>Biogás convertido em biometano (%)</b>	<b>Biometano (TWh)</b>	<b>Ano</b>
<b>Biogás (atual)</b>	-	-	50	0,44	2030
<b>RU (fração orgânica)</b>	90	0,40	90	0,36	2030
<b>Lamas de ETAR</b>	100	0,05	90	0,05	2030
<b>Efluentes pecuários</b>	100	1,04	90	0,94	2030
<b>Resíduos agroindustriais</b>	75	0,08	90	0,07	2030
<b>Resíduos agrícolas</b>	56	0,62	90	0,56	2030
<b>Subtotal digestão anaeróbia (DA)</b>	-	2,19	-	2,42	2030
<b>Resíduos florestais</b>	0,3	-	100	0,01	2030
<b>Subtotal G</b>	-	-	-	0,01	2030
<b>CO<sub>2</sub> biogénico</b>	100	-	10	0,29	2030
<b>Subtotal PtM</b>	-	-	-	0,29	2030
<b>Total</b>	-	2,19	-	2,72	2030
<b>Biogás (atual)</b>	-	-	90	0,78	2040
<b>RU (fração orgânica)</b>	100	0,44	90	0,40	2040
<b>Lamas de ETAR</b>	100	0,05	90	0,05	2040
<b>Efluentes pecuários</b>	100	1,04	90	0,94	2040
<b>Resíduos agroindustriais</b>	80	0,08	90	0,07	2040
<b>Resíduos agrícolas</b>	83	0,92	90	0,83	2040
<b>Subtotal AD</b>	-	2,53	-	3,07	2040
<b>Resíduos florestais</b>	10	-	100	0,48	2040
<b>Subtotal G</b>	-	-	-	0,48	2040
<b>CO<sub>2</sub> biogénico</b>	100	-	70	2,02	2040
<b>Subtotal PtM</b>	-	-	-	2,02	2040
<b>Total</b>	-	-	-	5,57	2040

Na Tabela 7 são apresentados os benefícios ambientais e económicos promovidos pela utilização do biometano.

Tabela 7: Benefícios do biometano, informação obtida em DGEG (2024)

<b>Benefícios</b>	<b>2030</b>	<b>2040</b>
<b>Potencial de implementação de biometano (TWh)</b>	2,72	5,57
<b>Redução do consumo de gás natural (referente ao consumo previsto para 2030)</b>	9,1%	18,6%
<b>Redução de custos de importação de gás natural (M€)</b>	136	279
<b>Emissões evitadas (MtCO<sub>2eq</sub>)</b>	0,56	1,14
<b>Redução de custos em emissões CO<sub>2</sub> (M€)</b>	44,5	91,2

Tal como é possível observar na Tabela 7, em 2030 estima-se uma produção total de biometano de 2,7 TWh. Tendo como referência o consumo estimado para 2030, o aproveitamento do biometano permitirá uma redução do consumo de gás natural na ordem de 9,1% em 2030 e 18,6% em 2040, respetivamente.

Considerando um valor médio de referência para o gás natural de 50 €/MWh, esta redução corresponde a uma poupança de cerca de 136 e 279 milhões de euros em importações. Para o mesmo período, o aproveitamento de biometano contribui ainda para uma redução de emissões de GEE, o que se traduz num valor económico de aproximadamente 45 e 91 milhões de euros, considerando um preço de 80 €/tCO<sub>2</sub>.

Assim o PAB estabelece como objetivo uma redução de emissões de GEE em pelo menos 40 % e o alcançar de uma quota mínima de 32% de energia de fontes renováveis no consumo final bruto de energia. Para além da meta global, também o setor dos transportes é alvo de uma meta específica mínima de 14% de energia consumida em 2030, sendo que 3,5% desta energia deve ser proveniente da utilização de biocombustíveis e biogás produzidos a partir de matérias primas, DGEG (2024).

Na atualidade, o biometano é usado para cogeração (é um processo que produz simultaneamente energia elétrica e calor a partir de uma única fonte de energia), eletricidade e aquecimento, embora uma parte significativa do biometano produzido também seja injetada na rede de gás.

Atualmente, os países líderes na produção de biometano incluem a Alemanha, a França e a Dinamarca. A Alemanha é o maior produtor de biometano, em 2022, tinha 19% das centrais europeias, registando 13 TWh de produção de biometano, 1,1 TWh dos quais foram utilizados no setor dos transportes (mais ou menos 8,46%), Floene (2022).

Com base em Nagy e Jakovis (2025), verificou-se que países como a Itália, a Estónia e a República Checa utilizam mais intensamente a produção de biometano no setor dos transportes, tal como é possível observar na Figura 44.

Itália é um exemplo do uso predominante do biometano no setor dos transportes, o que se deve à ampla rede de postos de reabastecimento de gás espalhados pelo país. Em contraste,

países como a Alemanha e a França direcionam maioritariamente a produção de biometano para o aquecimento de edifícios ou para a geração de eletricidade.

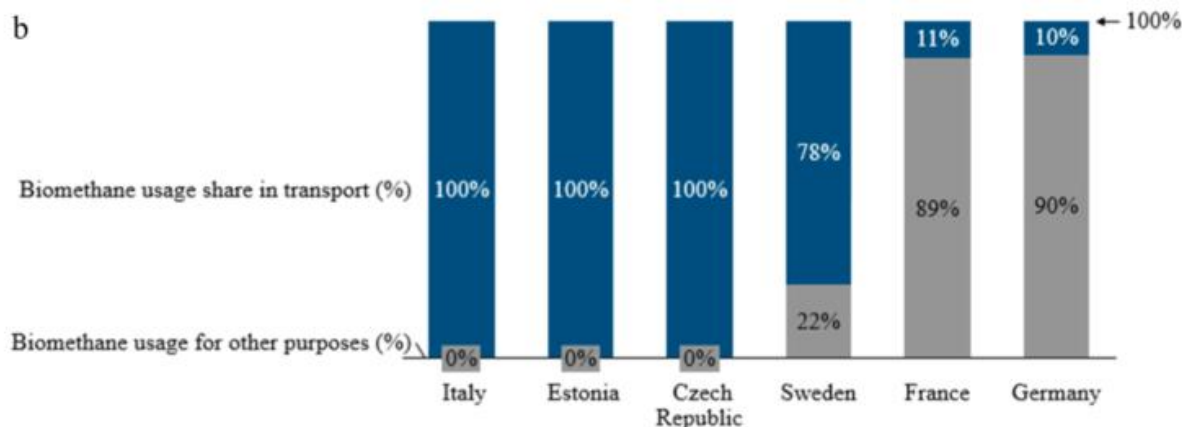


Figura 44: Uso do biometano em percentagem, retirado de Nagy e Jakovis (2025)

Assim, de modo a quantificar o número de veículos pesados que, em estimativa, poderão circular em Portugal foi utilizado a metodologia apresentada de seguida.

Para a realização dos cálculos em primeiro lugar foi necessário o consumo por cada 100 km que o veículo pesado a biometano percorreu. Essa estimativa foi feita utilizando o modelo CONCAWE. Nos resultados adquiridos no programa, um veículo pesado que percorre 1,4 milhões de km e utiliza um ciclo *Long Haul*, ou seja, um percurso em autoestrada e um *payload* de “Rep” o consumo médio final foi de 29,4 kg/100 km.

Posto isto, outro dado importante é saber o poder calorífico do biometano. Com base em alguns estudos estima-se que esta propriedade seja semelhante ao do gás natural.

É necessário referir que os cenários estudados tiveram em consideração as metas do PAB, para 2030 (2,7 TWh) e 2040 (5,57 TWh). Os 8,4% de utilização de biometano foi obtido com base no documento Sulewski (2023).

Posto isto, os cenários definidos são:

- 1º cenário (ano 2030): 100% da utilização de biometano = 2,7 TWh;
- 2º cenário (ano 2030): 8,4% da utilização do biometano = 0,2268 TWh;
- 3º cenário (ano 2040): 100% da utilização de biometano = 5,57 TWh;
- 4º cenário (ano 2040): 8,4% da utilização de biometano = 0,46788 TWh.

O procedimento utilizando nos cálculos considerou-se os seguintes dados:

- Poder Calorífico do biometano = 50 MJ/kg;
- Energia disponível do biometano = 2,7 TWh, 0,2268 TWh, 5,57 TWh, 0,46788 TWh;
- Consumo do veículo pesado = 29,4 kg/100 km, valor obtido na CONCAWE;
- Ciclo de Vida Útil = 15 anos;
- Distância total percorrida ao longo da vida útil 1400000 km.

Para exemplificar o procedimento adotado nos cálculos ir-se-á utilizar o valor de 2,7 TWh (100%).

Primeiro, foi necessário de perceber quantos quilómetros faz um veículo pesado por ano, desta forma fez-se o seguinte cálculo:

$$\frac{\text{Distância Total ao longo da vida útil do veículo}}{\text{Ciclo de Vida do veículo pesado}} = \frac{1400000 \text{ km}}{15 \text{ anos}} = 93333 \frac{\text{km}}{\text{ano}} \quad (2)$$

Seguidamente converteu-se o valor de energia de TWh para MJ:

$$\begin{aligned} \text{Energia disponível pela produção de biometano} \times \text{fator de conversão para MJ} = \\ 2,7 \text{ TWh} = 2,7 \times 10^6 \text{ MW} \times 3600 \text{ s} = 9,72 \times 10^9 \text{ MJ} = 9,72 \text{ PJ} \end{aligned} \quad (3)$$

A energia consumida por quilometro foi calculado do seguinte modo:

$$\text{Consumo do veículo pesado} = \frac{29,4 \text{ kg}}{100 \text{ km}} = 0,294 \left(\frac{\text{kg}}{\text{km}}\right) \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \text{Consumo do veículo pesado por} \left(\frac{\text{kg}}{\text{km}}\right) \times \text{Poder Calorífico (MJ/kg)} = 0,294 \frac{\text{kg}}{\text{km}} \times 50 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}} = \\ 14,7 \frac{\text{MJ}}{\text{km}} \quad (5) \end{aligned}$$

$$14,7 \left(\frac{\text{MJ}}{\text{km}}\right) * 93333 \left(\frac{\text{km}}{\text{ano}}\right) = 1371999 \frac{\text{MJ}}{\text{ano}} \quad (6)$$

Conclui-se assim que a energia consumida por um veículo pesado que utiliza biometano como combustível é de  $1371999 \frac{\text{MJ}}{\text{ano}}$ .

$$\text{Número de veículos pesados} = \frac{9,72 * 10^9 \text{ MJ}}{1371999 \left(\frac{\text{MJ}}{\text{ano}}\right)} = 7086 \text{ veículo pesado} \quad (7)$$

Assim os resultados obtidos para os cenários foram:

- 1º cenário: 7086 veículos pesados;
- 2º cenário: 595 veículos pesados;
- 3º cenário: 14618 veículos pesados;
- 4º cenário: 1228 veículos pesados.

Com base em 2023, Portugal registou um parque automóvel de 138 800 veículos pesados, acea (2025). Na Tabela 8 é apresentada uma comparação da percentagem do parque automóvel dos veículos pesados face a estimativa de circulação dos veículos pesados de biometano.

Tabela 8: Estimativas do número de veículos pesados com base nos cenários, original

Cenário	Energia total (TWh)	Percentagem alocada	Veículos pesados	% total do parque
1	2,7	100 %	7086	5,1 %
2	2,7	8,4 %	595	0,4 %
3	5,57	100 %	14618	10,53 %
4	5,57	8,4 %	1228	0,88 %

Embora o uso de biometano nos transportes apresente vantagens significativas — como a redução das emissões de GEE, a valorização de resíduos orgânicos, a menor dependência de combustíveis fósseis e a compatibilidade com as infraestruturas existentes de distribuição de gás natural, Portugal enfrenta atualmente várias limitações à utilização de veículos pesados a biometano. Estas limitações incluem a ainda insuficiente produção nacional de biometano, os elevados custos para o consumidor final em comparação com o diesel, a escassez de postos de abastecimento de biometano/GNC, o que compromete a viabilidade logística, e a concorrência com outros setores mais otimizados para o uso deste recurso, como a cogeração, o aquecimento e a produção de eletricidade.

Embora o biometano represente uma solução complementar promissora para a descarbonização dos transportes pesados, a sua capacidade de substituição total é limitada pelas restrições de produção e logística. A implementação de políticas de apoio, como subsídios, isenções fiscais e investimento em infraestruturas, será crucial para tornar o uso do biometano viável e competitivo no contexto português.

A aposta na diversificação das fontes de energia renovável para os transportes, combinando biometano com eletrificação e hidrogénio verde, poderá ser o caminho mais equilibrado para atingir as metas climáticas e energéticas do setor.

No contexto de uma empresa no setor dos transportes a esmagadora maioria dos veículos pesados é a gasóleo, no estudo de 2023, acea (2025), observa-se que representam 99,6% do parque automóvel, revelando a sua maturidade no mercado tanto a nível de tecnologia como também na logística de infraestruturas quer de produção, abastecimento e manutenção. O mesmo não se pode dizer do biometano, dado que apesar de existirem vários estudos acerca do uso deste combustível em veículos pesados com motores preparados para gás natural, a maturidade da tecnologia e a sua contribuição para a descarbonização das emissões, não são suficientes pois ainda existe certas dificuldades em usar os veículos pesados a biometano.

Assim apesar de ser uma estratégia viável para a descarbonização das frotas é necessário perceber onde se pode enquadrar esta tecnologia. Por exemplo, em vez de utilizar em veículos pesados de longo alcance que realiza vários quilómetros, uma frota que se situe perto de postos de abastecimento de biometano poderão começar por realizar cargas/entregas mais em regime urbano ou utilizar esta tecnologia em veículos pesados citadinos, como é o caso de autocarros e de veículos pesados do lixo.

Assim o biometano não substituirá toda a frota de pesados, mas pode ser altamente rentável se:

- Focado em usos intensivos, locais e previsíveis (ex: veículos pesados de resíduos, distribuição urbana, transportes agrícolas).
- Integrado com a valorização de resíduos reduzindo custos de tratamento de efluentes e promovendo a economia circular.

Em paralelo, o biometano pode coexistir com soluções elétricas e de hidrogénio, formando um mix. tecnológico adaptado a diferentes segmentos do transporte pesado.

Uma forma de melhorar o panorama estratégico na implementação de biometano no transporte pesado em Portugal exige uma abordagem integrada, que envolva política pública, investimento em tecnologia, incentivos económicos e colaboração intersectorial.

Algumas sugestões para melhorar a implementação do mercado do biometano em Portugal são:

- **Desenvolver uma rede nacional de abastecimento de biometano:** um dos grandes problemas que se coloca depois de produzir o biometano será a sua logística de abastecimentos. Para isso poderá ser necessário implementar uma estratégia nacional de corredores verdes com postos, assim existe uma visam de promover transportes mais limpos, com menores emissões de GEE. Priorizar zonas logísticas, parque industriais e regiões rurais com produção de biometano e permitir contratos de longo prazo entre produtores e operadores logísticos. Assim facilita a adoção, adoção por empresas transportadoras e reduz a dependência de rotas curtas ou locais.
- **Criar incentivos financeiros e fiscais:** Apoios à aquisição de veículos pesados a biometano (ex: isenção de ISV, IVA reduzido, subsídios), financiamento à conversão de frotas municipais e industriais e tarifa garantida ou prémio ao kWh para produtores de biometano usado em transportes. Assim reduz o custo inicial e acelera a escala.
- **Estimular projetos de produção descentralizada:** Apoiar cooperativas agrícolas, suiniculturas, ETARs e agroindústrias na instalação de unidades de biometano e criar modelos de negócio locais: produção, refinação e uso local (ex: autarquias, transportadoras regionais). Assim reduz custos logísticos, promove economia circular e fortalece territórios de baixa densidade.
- **Fixar metas nacionais específicas para os transportes:** Um dos problemas do PAB é a definição de metas globais, mas ainda vagas para o setor dos transportes. Assim uma solução seria criar um roteiro de descarbonização dos transportes pesados com metas claras para o biometano, quotas obrigatórias (como nos combustíveis líquidos) e integração com o PNEC e PRR. Assim dá um sinal claro ao mercado e atrai investimento.
- **Educar o mercado e promover confiança tecnológica:** Criar campanhas de sensibilização e demonstração de projetos-piloto (ex: transporte urbano, logística de última milha, recolha de resíduos) e envolver grandes operadores logísticos e frotas públicas como "*early adopters*". Assim quebra barreiras culturais e acelera adoção.

- **Investir em I&D e certificação:** Desenvolver centros de competência em mobilidade a gás renovável e certificar o biometano para garantir rastreabilidade e qualidade (ex: sistema de garantias de origem). Assim permite aumentar a confiança e permite exportar o excedente futuro.

Assim é necessária uma conjugação de esforços entre o governo, setor privado, produtores de resíduos, operadores de transporte e municípios, para implementar o biometano em Portugal.



## 5. Análise global – emissões de GEE e TCO

O presente capítulo apresenta uma análise global considerando as emissões de GEE e o custo total de propriedade (TCO), permitindo uma avaliação integrada e fundamentada das alternativas discutidas.

### 5.1. Análise Comparativa das emissões de GEE

Para a análise de emissões de GEE, os resultados apresentados e discutidos nesta seção são os obtidos no capítulo 3.3.2 – Comparação das diferentes tecnologias e com base nos artigos realizados por Basma e Rodriguez (2023 b).

Assim na Tabela 9 são apresentados resultados referentes as emissões de GEE.

*Tabela 9: Resultados das emissões GEE a partir da CONCAWE, presente estudo*

Sistemas de Propulsão	Combustíveis	Emissões - gCO <sub>2</sub> eq/t.km					Emissões de gases de estufa (GEE)
		Fabrico	Eletricidade	Combustível WTT	Combustível TTW menos CO <sub>2</sub> reciclar	CO <sub>2</sub> Reciclado	
ICE - Motores a Diesel	Diesel - B7	3,25	-	11,63	42,28	2,85	57,15
	HVO	3,25	-	17,3	2,7	40,86	23,25
	e-Diesel (eletricidade renovável)	3,25	-	7,21	2,7	40,83	13,15
ICE - Motores a Gás Natural	CNG	3,76	-	8,62	40,15	1,39	52,53
	LNG	3,65	-	11,94	40,76	-	56,35
	Biometano	3,76	-	-74,23	1,02	40,85	-69,45
ICE - Motores a H <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> - NG	4,92	-	61,31	3,13	-	69,36
	H <sub>2</sub> - Verde Renovável	4,92	-	6,63	3,13	-	14,68
FCEV	H <sub>2</sub> - NG	5,56	-	-	51,03	-	56,59
	H <sub>2</sub> - Verde Renovável	5,56	-	-	5,52	-	11,08
BEV	Eletricidade – mix.	6,3	26,5	-	-	-	32,8

Os resultados apresentados na Tabela 9 permitem efetuar uma análise pormenorizada das emissões de GEE associadas aos vários sistemas de propulsão e combustíveis, segmentando os contributos de cada fase: fabrico, consumo de eletricidade, uso do combustível (TTW), produção (WTT), e a compensação associada à reciclagem de CO<sub>2</sub>. Esta abordagem permite avaliar as tecnologias com base em critérios de emissões líquidas no ciclo de vida.

➤ **ICE – Motores a Diesel (Diesel B7, HVO e e-Diesel):**

- Diesel B7 apresenta emissões totais de 57,15 gCO<sub>2</sub>eq/t.km, com grande parte associada ao uso do combustível (TTW: 42,28);

- HVO reduz significativamente as emissões TTW para 2,7, devido à componente de CO<sub>2</sub> reciclado, mas mantém um perfil semelhante nos restantes parâmetros, resultando em 23,25 gCO<sub>2</sub>eq/t.km;
- O e-Diesel produzido com base em energia elétrica renovável tem desempenho superior: ao reduzir o TTW para apenas 7,21 e manter o WTT baixo, resulta em 13,15 gCO<sub>2</sub>eq/t.km, beneficiando da reciclagem de CO<sub>2</sub> e da utilização de hidrogénio verde;
- O e-Diesel destaca-se entre os combustíveis líquidos como a opção com menores emissões líquidas, graças ao uso de fontes renováveis na sua produção.
- **ICE – Motores a Gás Natural (CNG, LNG e Biometano):**
  - CNG e LNG apresentam emissões elevadas (52,53 e 56,35 gCO<sub>2</sub>eq/t.km, respetivamente), devido ao elevado TTW (40,15 e 40,76);
  - Por contraste, o Biometano apresenta emissões negativas (-69,45 gCO<sub>2</sub>eq/t.km). Isto ocorre porque a produção deste combustível permite a captura e valorização de metano que, de outra forma, seria emitido diretamente para a atmosfera, resultando numa compensação líquida de emissões no ciclo de vida;
  - O Biometano é a única opção com emissões líquidas negativas, sendo particularmente atrativo para a descarbonização do no setor dos transportes pesados.
- **ICE e FCEV com Hidrogénio (H<sub>2</sub> Cinzento vs H<sub>2</sub> Verde Renovável):**
  - O H<sub>2</sub> cinzento (NG) apresenta elevadas emissões (69,36 gCO<sub>2</sub>eq/t.km em ICE e 56,59 em FCEV), com a maior parte das emissões associadas à fase de utilização (TTW) e produção (WTT);
  - Já o H<sub>2</sub> verde renovável apresenta valores muito inferiores: 14,68 gCO<sub>2</sub>eq/t.km (ICE) e apenas 11,08 gCO<sub>2</sub>eq/t.km (FCEV). Isto deve-se ao facto de o hidrogénio verde ser produzido por eletrólise da água com eletricidade renovável, praticamente sem emissões associadas à sua produção ou uso;
  - A escolha da origem do hidrogénio tem um impacto relevante. O H<sub>2</sub> verde permite uma redução significativa das emissões, especialmente quando usado em FCEV, onde o TTW é muito reduzido.
- **Veículos Elétricos a Bateria (BEV):**
  - No presente estudo considera-se a energia elétrica produzida com base no mix. europeu. As emissões totais são de 32,8 gCO<sub>2</sub>eq/t.km, das quais a maior parte provém da eletricidade usada no carregamento (26,5). O fabrico do veículo e da bateria também contribui significativamente (6,3);
  - Apesar de não haver emissões diretas no uso (TTW = 0), o valor total ainda depende fortemente da intensidade carbónica da produção de energia elétrica;
  - Os BEVs representam uma opção intermédia entre o FCEV com H<sub>2</sub> verde e os combustíveis fósseis. A sua performance ambiental pode melhorar com uma maior penetração de fontes renováveis no mix. elétrico.

➤ **Conclusões Gerais:**

- A melhor opção absoluta é o Biometano em termos de redução de emissões de GEE, com emissões líquidas negativas;
- Seguem-se os FCEV com H<sub>2</sub> verde e os ICE com e-Diesel como alternativas de baixo carbono, especialmente viáveis quando a infraestrutura de BEV ou H<sub>2</sub> ainda é limitada;
- O BEV apresenta bons resultados, mas a sua eficácia depende diretamente da descarbonização da rede elétrica;
- O uso de H<sub>2</sub> cinzento, LNG ou CNG deve ser evitado a longo prazo, dada a sua elevada pegada carbónica.

## 5.2. Análise comparativa do TCO

Nesta secção é apresentada uma análise comparativa qualitativa, para as diferentes tecnologias e combustíveis, com base no artigo de Basma e Rodriguez, (2023 b).

*Tabela 10: Análise qualitativa entre as diferentes tecnologias, com base no artigo Basma e Rodriguez, (2023 b)*

Sistemas de Propulsão	Combustíveis	TCO - Parâmetros						Global
		Preço de Venda	Combustíveis	Manutenção	Mão-de-obra (Trabalhadores)	Seguros	Portagens e taxas rodoviárias Trabalho	
ICE - Motores a Diesel	Diesel - B7	5	4	4	3	5	4	25
	HVO	5	2	4	3	5	4	23
	e-Diesel (eletricidade renovável)	5	2	4	3	5	4	23
ICE- Motores a Gás Natural	CNG	5	2	4	3	5	4	23
	LNG	5	2	4	3	5	4	23
	Biometano	5	2	4	3	5	4	23
ICE - Motores a H <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> - NG	3	1	4	3	5	5	21
	H <sub>2</sub> - Verde Renovável	3	1	4	3	5	5	21
FCEV	H <sub>2</sub> - NG	1	2	3	3	5	5	20
	H <sub>2</sub> - Verde Renovável	1	2	3	3	5	5	20
BEV	Eletricidade	2	5	5	3	5	5	25

Nota para a tabela: Muito mau – 1; Mau – 2; Satisfaz – 3; Bom – 4; Muito bom – 5.

A Tabela 10 reflete a avaliação qualitativa dos diferentes componentes que integram o TCO para veículos pesados. A análise considera os seguintes parâmetros:

- Preço de Venda;
- Custo dos Combustíveis;
- Manutenção;
- Mão-de-obra;
- Seguros;
- Portagens e Taxas Rodoviárias.

O objetivo é identificar, qualitativamente, qual a solução tecnologicamente e economicamente mais equilibrada, projetando uma visão integrada para o futuro do transporte de mercadorias rodoviário.

- **ICE – Motores a Diesel (Diesel B7, HVO, e-Diesel):**
  - Diesel B7 obteve a pontuação global mais elevada (25). Isso deve-se ao seu baixo custo total, com valores elevados em todos os critérios exceto mão-de-obra (3), refletindo a maturidade tecnológica, infraestrutura consolidada e disponibilidade do combustível.
  - Tanto o HVO como o e-Diesel apresentam pontuações ligeiramente inferiores (23). Isso deve-se principalmente ao custo mais elevado do combustível, embora mantenham boas classificações nos restantes parâmetros.
  - As tecnologias a diesel mantêm-se altamente competitivas no TCO atual, especialmente o Diesel B7, apesar de serem menos sustentáveis em termos ambientais.
- **ICE – Motores a Gás Natural (CNG, LNG, Biometano):**
  - Todas as três opções (CNG, LNG, Biometano) obtêm uma pontuação global de 23, o que indica um equilíbrio entre custo de aquisição, combustível e operação.
  - O Biometano, apesar de ter custos semelhantes aos outros gases, é valorizado pelo seu benefício ambiental em ciclos de vida, o que pode justificar a sua inclusão em estratégias futuras.
  - Os sistemas a gás natural têm uma viabilidade económica razoável, embora dependam fortemente de subsídios ou estratégias fiscais para serem ambientalmente e economicamente vantajosos a longo prazo.
- **ICE – Motores a Hidrogénio (H<sub>2</sub> Cinzento e Verde Renovável):**
  - Ambas as variantes (ICE H<sub>2</sub> - NG e ICE H<sub>2</sub> - Verde) apresentam pontuação de 21.
  - Os custos de combustível e preço de venda ainda são as maiores barreiras, apesar de os restantes critérios (seguros, manutenção) já se encontrarem em linha com outras tecnologias.
  - Atualmente, os motores ICE a hidrogénio não são a opção mais competitiva economicamente, mas beneficiam de bom desempenho em termos operacionais e poderão ganhar atratividade com a queda nos preços do H<sub>2</sub> verde.
- **FCEV:**
  - Tanto com H<sub>2</sub> cinzento como com H<sub>2</sub> verde, os FCEVs obtêm pontuação global de 20, a mais baixa entre todas as opções.
  - Os principais fatores negativos são o preço de venda elevado (nota 1) e o custo do hidrogénio (nota 2), embora compensem em áreas como seguros, mão-de-obra e portagens.

- Os FCEV enfrentam barreiras significativas de custo inicial e infraestrutura, mas podem tornar-se competitivos com economias de escala, incentivos fiscais e redução do preço do hidrogénio.
- **BEV:**
  - O BEV atinge uma pontuação global de 25, igual ao diesel B7.
  - Apresenta excelente desempenho em custo de combustível, manutenção e portagens, mas um custo de aquisição moderado (2).
  - O crescimento da infraestrutura e da produção em massa está a contribuir positivamente para a sua competitividade.
  - O BEV representa a melhor alternativa sustentável ao diesel em termos de TCO, sendo previsível que supere todas as outras soluções a longo prazo, principalmente com a descarbonização da eletricidade e incentivos à eletrificação.
- **Conclusão Geral:**
  - A análise qualitativa do TCO demonstra que, atualmente, as tecnologias mais competitivas economicamente são o Diesel B7 e os veículos BEV, cada uma com vantagens distintas: maturidade e alcance no caso do diesel, sustentabilidade e custos operacionais no caso dos elétricos. As tecnologias baseadas em hidrogénio e gás natural encontram-se num ponto intermédio de viabilidade, com potencial crescente à medida que a tecnologia avança e os custos associados diminuem. O Biometano, apesar de não ser o mais competitivo em custo direto, destaca-se fortemente nas análises ambientais, o que pode justificar o seu incentivo em políticas públicas.

### 5.3. Análise comparativa das emissões de GEE e do custo total de propriedade (TCO)

Para a análise das emissões de GEE, os resultados expostos foram adquiridos pelo análise no capítulo 3.3.2 – Comparação das diferentes tecnologias e com base nos artigos realizados por Basma e Rodriguez (2023 b), para a TCO.

Assim na Tabela 11 são apresentados resultados referentes as emissões de GEE e à TCO.

Tabela 11: Resultados acerca dos GEE e TCO, presente estudo e com base na informação Basma e Rodriguez, (2023 b)

Veículos Pesados					
Combustíveis	GEE (Líquidas /Recicladas) - gCO <sub>2</sub> eq/t.km	TCO - €/km			
		2023	2030	2035	2040
Diesel - B7	57,15	1,12	1,06	1,06	1,06
HVO	23,25	1,17	1,09	1,09	1,09
e-Diesel (eletricidade renovável)	13,15	1,46	1,27	1,27	1,27
CNG	52,53	1,43	1,31	1,31	1,31
LNG	56,35	1,43	1,31	1,31	1,31
Biometano	-69,45	1,43	1,31	1,31	1,31
H <sub>2</sub> - NG	69,36	1,68	1,28	1,2	1,15
H <sub>2</sub> - Verde Renovável	14,68	1,68	1,28	1,2	1,15
H <sub>2</sub> - NG	56,59	1,86	1,16	1,06	0,99
H <sub>2</sub> - Verde Renovável	11,08	1,86	1,16	1,06	0,99
Eletricidade – mix.	32,8	1,23	0,91	0,9	0,89

Com base na Tabela 11 podem-se retirar as seguintes conclusões:

➤ **ICE com Motores Diesel (B7, HVO, e-Diesel):**

- Emissões de GEE: O e-Diesel produzido com base em energia elétrica renovável apresenta o melhor desempenho ambiental (13,15 gCO<sub>2</sub>eq/t.km), significativamente inferior ao diesel B7 (57,15 gCO<sub>2</sub>eq/t.km) e ao HVO (23,25 gCO<sub>2</sub>eq/t.km). Esta vantagem deve-se ao facto de o e-Diesel poder ser produzido a partir de hidrogénio verde e CO<sub>2</sub> capturado, resultando numa redução potencial das emissões de GEE entre 94–97 %, conforme indicado por (Schmidt, 2021). e dados da CONCAWE;
- TCO: Apesar do bom desempenho ambiental do e-Diesel, o diesel B7 continua a ser o combustível com menor TCO até 2040, refletindo a sua maturidade no mercado, cadeia de abastecimento consolidada e infraestruturas amplamente implementadas.

➤ **ICE com Motores a Gás Natural (CNG, LNG e Biometano):**

- Emissões de GEE: O biometano apresenta o menor valor de emissões (–69,4 gCO<sub>2</sub>eq/t.km), devido ao seu carácter de emissões negativas no ciclo de vida

- (LCA), associado à valorização de resíduos orgânicos e captura de metano que seria libertado naturalmente;
- TCO: Os três combustíveis (CNG, LNG e Biometano) apresentam valores semelhantes ao longo do período analisado, indicando que, do ponto de vista económico, a escolha entre eles depende mais de fatores ambientais ou regionais de disponibilidade do que de custos operacionais.
- **Motores a Hidrogénio (ICE H<sub>2</sub>: Cinzento vs Verde Renovável):**
- Emissões de GEE: O H<sub>2</sub> verde renovável (14,68 gCO<sub>2</sub>eq/t.km) mostra uma redução significativa face ao H<sub>2</sub> cinzento (69,36 gCO<sub>2</sub>eq/t.km). Isto deve-se à origem da energia: o hidrogénio cinzento é produzido por reforma de metano a vapor (SMR), gerando grandes quantidades de CO<sub>2</sub>, enquanto o hidrogénio verde resulta da eletrólise da água com energia renovável, praticamente eliminando emissões diretas;
  - TCO: O estudo de Basma e Rodriguez (2023) não especifica o tipo de hidrogénio utilizado, o que levou à adoção de valores iguais de TCO para ambas as variantes. Isto representa uma limitação, dado que o custo do hidrogénio verde tende a ser mais elevado atualmente.
- **FCEV e BEV (Veículos a Pilha de Combustível e Eléctricos a Bateria):**
- Emissões de GEE: Os FCEV com H<sub>2</sub> verde (11,08 gCO<sub>2</sub>eq/t.km) apresentam melhor desempenho do que com H<sub>2</sub> cinzento (56,59 gCO<sub>2</sub>eq/t.km). Contudo, os BEVs apresentam um valor intermediário (32,8 gCO<sub>2</sub>eq/t.km), refletindo a intensidade de emissões da rede elétrica usada na sua operação;
  - TCO: A tendência aponta para uma redução significativa do TCO nos BEV até 2040, atingindo os 0,89 €/km, inferior aos FCEV. Isto justifica-se por diversos fatores:
    - Custo decrescente das baterias;
    - Aumento da produção em escala;
    - Infraestruturas de carregamento mais acessíveis;
    - Incentivos públicos para a eletrificação;
    - Eficiência energética superior.
- **Conclusões Gerais:**
- Desempenho ambiental: O biometano apresenta as emissões líquidas mais baixas, inclusive negativas, sendo a opção mais favorável do ponto de vista do ciclo de vida. O e-Diesel e o H<sub>2</sub> verde também se destacam como soluções com baixa pegada carbónica;
  - Desempenho económico (TCO): Os BEVs surgem como a tecnologia com o menor custo total de propriedade até 2040, devido à sua eficiência energética, avanços tecnológicos e políticas de apoio.

## **5.4. Panorama Tecnológico dos Fabricantes**

---

A presente secção tem como objetivo apresentar exemplos de fabricantes de veículos pesados que já disponibilizam, ou se encontram em fase de desenvolvimento, de modelos equipados com tecnologias de baixas emissões. Serão abordadas as principais soluções tecnológicas adotadas, bem como as respetivas especificações técnicas. Esta seleção não pretende ser exaustiva, mas sim ilustrativa, destacando alguns dos fabricantes que têm vindo a apostar na transição para sistemas de propulsão mais sustentáveis, alinhados com os objetivos de descarbonização do setor dos transportes.

A Tabela 12 apresenta os veículos pesados com as tecnologias a Baterias e Pilhas de combustível.

Tabela 12: Marcas e suas características nas tecnologias Baterias e Pilhas de combustível, retirado de E-Truck (2021)

	Modelos	Classificação do peso bruto de combinação (lbs.)	Potência do Motor (kW)	Bateria (kWh)	Carregamento (kW)	Autonomia (miles)	Potência da pilha de combustível (kg)	Armazenamento de H <sub>2</sub> (kg)	Mercado
<b>Baterias</b>	Volvo VNR Electric Tractor	82000	340	264	150	Até 120	-	-	Produção
	eCascadia	82000	391	475	250	250	-	-	Produção e Desenvolvimento
	BYD 8TT	150000	360	435	300	124	-	-	Produção
	Nikola Tre	80000	480	750	350	300	-	-	Desenvolvimento
	Tesla Semi	80000	-	600	250	300	-	-	Desenvolvimento
<b>Pilhas de combustível</b>	Nikola Two	80000	480	-	-	500 – 750	-	-	Desenvolvimento
	Toyota FC Semi	80000	500	12	-	300	226	60	Desenvolvimento
	US Hybrid – Navistar	80000	320	>22	6,6	200	80	20	Desenvolvimento e Protótipo

A Tabela 13 apresenta algumas marcas com motores de combustão a hidrogénio.

*Tabela 13: Marcas e suas características na tecnologia de motores de combustão a H<sub>2</sub>, retirado de “Fontes”*

Marca/Modelo	Motor/Sistema	Tipo de Combustão / Tipo de sistema	Potência (kW)/CV	Binário (Nm)	Armazenamento de H <sub>2</sub>	Autonomia (km)	Reabastecimento	Fontes
<b>MAN hTGX (H45 ICE)</b>	Motor H <sub>2</sub> baseado no D38	Motor de combustão interna a hidrogénio com ignição por faísca	383 kW (~520 cv)	~2 500 Nm (900–1 300 rpm)	Tanques CG H <sub>2</sub> a 700 bar (56 kg)	Até 600 km	< 15 minutos	(Carey, 2024) (HYDROGEN Technology wordexpo, 2024) (MAN Truck & Bus, s.d.)
<b>Volvo (H<sub>2</sub> HPDI ICE)</b>	Motor HPDI com ignição por HVO + H <sub>2</sub> (Dual Fuel)	Combustão por compressão	-	-	-	Até 600 km (estimado)	Reabastecimento rápido	(Volvo Trucks, 2024)
<b>Daimler / Mercedes-Benz</b>	Motor a combustão adaptada para H <sub>2</sub> (propostas Gen H <sub>2</sub> ICE)	Motor de combustão interna a hidrogénio com ignição por faísca	300 kW (2 pilhas de combustível com cada uma de 150 kW)	3154 Nm (2 x 1577 Nm)	Hidrogénio líquido em tanques criogénicos (80 kg)	Até ~1 000 km (projetado)	Reabastecimento rápido com H <sub>2</sub> líquido	(DAIMLER TRUCK, 2025) (Daimler Truck, 2024)

A Tabela 14 apresenta algumas marcas de motores a gás natural/biometano.

*Tabela 14: Marcas e suas características na tecnologia de motores de combustão usando a tecnologia de gás natural, retirado de “Fontes”*

Marca/Modelo	Motor/Sistema	Tipo de Combustão / Tipo de Sistema	Potência (cv/kW)	Binário (Nm)	Armazenamento (LNG)	Autonomia (km)	Reabastecimento	Estado de Mercado/Observações	Fontes
<b>Volvo FH/FM/FMX</b>	G13C Euro 6 HPDI (injeção direta HPDI)	Dual-fuel (HPDI – injeção direta)	420 cv (309 kW), 460 cv (338 kW), 500 cv (368 kW)	2100 Nm (420 cv), 2300 Nm (460 cv), 2500 Nm (500 cv)	Tanques até 225 kg de LNG (~10% maior que antes)	Até ~1 000 km	Tempo similar ao diesel (LNG/bio-LNG)	Comercial na Europa, vendas > 8 000 unidades até 2024, potencial Redução CO <sub>2</sub> até 100% com bio-LNG + HVO	(Volvo Trucks, 2023)
<b>IVECO S-Way Natural Power</b>	C9G (8,9 litros) e XC13G (12,9 litros)	Mono-fuel – só utiliza gás (Spark Ignition)	C9G (344,76 cv – 251 kW, 405,6 cv – 294 kW) XC13G (507 cv – 368 kW)	C9G (344,76 cv – 1500 Nm, 405,6 cv – 1700 Nm) XC13G (507 cv – 2200 Nm)	-	4x2 (Articulado): CNG (até 800 km), LNG (até 1700 km) 4x2 (Rígido): CNG (até 1000 km), LNG (1700 km) 6x2P (Rígido): CNG (até 1000 km), LNG (1700 km)	-	-	(Iveco, s.d.) (Wikipédia, s.d.)



O estudo conduzido por Rajalehto e Helo (2025) apresenta uma análise comparativa relevante entre diferentes tipos de veículos pesados de transporte, nomeadamente veículos a diesel (como referência), veículos elétricos e veículos alimentados por gás liquefeito de biomassa, com ênfase na avaliação do TCO.

Nas Tabela 15 e Tabela 16 são apresentadas as especificações dos veículos e também as estatísticas realizadas na análise TCO.

*Tabela 15: Especificações dos veículos, adaptado de Rajalehto e Helo (2025)*

	<b>Diesel</b>	<b>LBG</b>	<b>EV</b>
<b>Tipo de veículo</b>	Volvo FH6x4	Volvo FH6x4	Volvo FH Elétrico
<b>Consumo médio</b>	42 l/100 km	32 kg/100 km	110 kWh/100 km
<b>Preço de compra</b>	162 000 €	204 000 €	300 000 €
<b>Autonomia média</b>	1463 km	703 km	393 km
<b>Fator de emissões</b>	2,64 kgCO <sub>2</sub> e/l	0,39 kgCO <sub>2</sub> e/kg	0,21 kgCO <sub>2</sub> e/kWh
<b>Seguros</b>	4955 €/a	4782 €/a	5128 €/a
<b>Custo de mão de obra</b>	27,70 €/h	27,70 €/h	27,70 €/h
<b>Tempo de mão de obra</b>	202 h/mês	202 h/mês	202 h/mês

*Tabela 16: Análise comparativa entre as diferentes tecnologias, adaptada de Rajalehto e Helo (2025)*

		<b>Diesel</b>	<b>LBG</b>	<b>EV</b>
<b>Consumo médio</b>	Limite inferior	25,5 l/100 km	27,2 kg/100 km	93,5 kWh/100 km
	Modo	41,01 l/100 km	32,0 kg/100 km	110,0 kWh/100 km
	Limite Superior	47,7 l/100 km	36,8 kg/100 km	126,5 kWh/100 km
<b>Distâncias diárias</b>	Limite inferior	116 km	116 km	116 km
	Modo	537 km	537 km	201 km
	Limite Superior	722 km	722 km	393 km
<b>Preço do Combustível</b>	Média do preço do combustível	1,96 €/l	1,72 €/kg	0,07 €/kWh
	Dispersões em relação ao preço de combustível	0,36 €/l	0,69 €/kg	0,06 €/kWh
<b>Preço ETS (Sistema de comércio das emissões de carbono)</b>	Distribuição (dados obtidos)	5,37	5,37	5,37
	Largura (dispersão dos dados)	0,08	0,08	0,08

Com base no estudo de Rajalehto e Helo (2025), a análise comparativa do TCO entre veículos pesados a Diesel, elétricos e a gás liquefeito de biomassa evidencia que cada tecnologia apresenta vantagens em diferentes contextos operacionais. Os veículos a Diesel, embora com menores custos iniciais, mantêm o maior impacto ambiental devido às suas elevadas emissões. O veículo a gás liquefeito de biomassa surge como uma solução competitiva em percursos intermédios (100 - 270 km), oferecendo redução de emissões de GEE e custos operacionais atrativos. Por sua vez, os veículos elétricos revelam-se mais vantajosos em percursos longos (superiores a 270 km), combinando baixos custos operacionais com emissões potencialmente reduzidas, dependendo da fonte de eletricidade, apesar do seu elevado custo de aquisição inicial. O estudo reforça ainda a importância de um planeamento estratégico na adoção destas tecnologias, tendo em conta a evolução da infraestrutura, o perfil de utilização e os objetivos ambientais das frotas.

## 5.5. Estimativa da TCO de combustível para Portugal

---

Como referido anteriormente para os veículos pesados o parâmetro que mais influência na TCO é o preço dos combustíveis, desta forma, com base na TCO do documento, Basma e Rodriguez (2023 b) e nos preços de combustíveis em Portugal estimou-se o custo de TCO em 2023 e 2030, em comparação com o combustível mais utilizado Diesel – B7 (Referência).

Com base no artigo Basma e Rodriguez (2023 b) este proporciona a TCO com os seguintes parâmetros todos em €/km: preço de aquisição do veículo, preço de manutenção, preço de combustível/fontes, preço de seguros de trabalho, preço de mão de obra, preço das taxas rodoviárias e preço residual. O único preço que se alertou foi o do combustível/fontes a partir dos preços praticados em Portugal e dos consumos médios obtidos no *software* CONCAWE.

Nas seguintes Tabela 17 e Tabela 18 são apresentados os preços dos combustíveis praticados/estimados em Portugal e conseqüentemente a análise TCO.

Tabela 17: Preço dos combustíveis em Portugal, retirado de “fontes”

<b>Combustível</b>	<b>Preço (Basma e Rodriguez b)</b>	<b>Preço – Presente estudo</b>	<b>Fontes (Preço – Presente estudo)</b>	<b>Consumo Médio</b>	<b>Custo por (€/km)</b>
<b>Gasóleo - B7</b>	1,22 €/l	1,580 €/l	(DGEG Preço)	30,7 l/100km	0,485
<b>HVO</b>	1,36 €/l	1,954 €/l	Custo de comercialização em Portugal em julho 2025	33,1 l/100km	0,647
<b>e-Diesel</b>	2,51 €/l	2,51 €/l	Adaptado de (Basma e Rodriguez, nov. 2023)	31,93 l/100km	0,801
<b>Biometano</b>	2,04 €/kg	2,04 €/kg	(PAB, 2024)	29,4 kg/100km	0,600
<b>Biometano (com infraestrutura)</b>	2,68 €/kg	[0,584 – 1,179] €/kg	(PAB, 2024)	29,4 kg/100km	0,788
<b>Eletricidade</b>	0,21 €/kWh	0,21€/kWh, (rede normal) 0,43 €/kWh (valor médio) 0,79 €/kWh (carregamento rápido)	(ACP, s.d.)	143,65 kWh/100km	0,302 0,718 1,135

Tabela 18: Análise TCO, modificado a partir de (Basma e Rodriguez, nov. 2023)

Sistemas de Propulsão	Combustível e Energia	TCO em 2025 (€/km)	TCO em 2025 Variação relativa ao Diesel –B7 (%)	TCO em 2030 (€/km)	TCO em 2030 Variação relativa ao Diesel –B7 (%)
ICE - Motor Diesel	Diesel - B7	1,37	-	1,30	-
	HVO	1,64	+12,9	1,503	+10,6
	<i>e-Diesel</i>	1,97	+35,3	1,73	+24,4
ICE – Motor a Gás Natural	Biometano	1,54	+12,5	1,41	+8,9
	Biometano (com infraestrutura)	1,76	+28,3	1,61	+24,2
BEV	Eletricidade (rede normal)	1,37	-0,1	1,01	-21,9
	Eletricidade (valor médio)	1,93	+ 41,0	1,43	+10,3
	Eletricidade (carregamento rápido)	2,49	+ 82,1	1,84	+42,5

Analisado dos dados da Tabela 18 conclui-se que:

- **ICE (Motores a Diesel):** o Diesel B7 apresenta como referência de menores custos absolutos de 1,37 €/km em 2025 e 1,30 €/km em 2030, já o HVO apresenta custos ligeiramente superiores ao Diesel B7 e mais atrativos comparando também com o e-Diesel. Além disso, o HVO oferece vantagens ambientais significativas para a redução de emissões, podendo ser uma opção viável para curto/médio prazo. O e-Diesel como referido anteriormente apresenta custos muito elevados face ao Diesel B7, o que compromete a viabilidade económica, assim para este ser aplicado teria de ter fortes incentivos de utilização pelo os estados membros, por exemplo, ou reduções drásticas de custo de produção;
- **ICE (Motores a Gás Natural - Biometano):** o biometano sem infraestruturas apresenta valores próximos do HVO o que torna uma excelente alternativa, sobretudo pela renovabilidade e contribui para metas de descarbonização. O biometano com o uso de infraestruturas apresenta valores menos competitivos o que conclui que a rentabilidade do biometano depende fortemente da existência prévia de redes de abastecimento, o que em Portugal ainda é um enorme obstáculo;
- **BEV:** os valores de carregamento da rede influenciam fortemente os custos de TCO, veículos elétricos. O carregamento em rede normal apresenta valores idênticos ao Diesel B7 em 2025, ultrapassando estes em 2030, confirmando que os BEV's são uma tecnologia chave para a transição energética. Para carregamentos rápidos observa-se que não apresenta uma opção viável devido aos elevados custos;

- **Conclusões:** Desta forma a opção mais viável para a transição energética será veículos a BEV usando carregamento normal, Biometano sem custos de infraestrutura e HVO, tendo todos como vantagem a redução de emissões de GEE. Já combustíveis como e-Diesel, BEV com carregamento rápido e Biometano com infraestruturas próprias dependem de apoios políticos muito fortes ou algumas inovações tecnológicas, para se tornarem competitivas.



## 6. Conclusões

---

Com base no estudo realizado, conclui-se que Portugal definiu metas ambiciosas para a implementação do Plano de ação para o biometano (PAB), tendo em vista a transição energética e a descarbonização de vários setores. Apesar do mercado nacional do biometano estar ainda numa fase embrionária, começam a surgir iniciativas para a sua introdução. No entanto, a concretização destas metas dependerá fortemente do desenvolvimento de infraestruturas adequadas de produção e distribuição, bem como da criação de incentivos direcionados às frotas de transporte pesado, promovendo a substituição de veículos a combustíveis fósseis por alternativas sustentáveis como o biometano.

Numa perspetiva estratégica, para se alcançar maior eficiência na redução de emissões de GEE será necessário combinar o uso de diferentes tecnologias de propulsão de veículos pesados, nomeadamente a eletricidade, biocombustíveis líquidos e o biometano. Esta abordagem híbrida poderá maximizar o impacto ambiental positivo, particularmente no setor dos transportes.

Na primeira parte deste estudo, com base na análise efetuada, utilizando o modelo CONCAWE, verificou-se que os veículos pesados alimentados a biometano representam uma solução eficaz na mitigação de emissões, sendo que a percentagem de redução dependerá do tipo de resíduo utilizado e dos processos tecnológicos adotados na produção do biometano. Para o caso específico de Portugal, a estratégia mais viável parece ser o aproveitamento de resíduos urbanos provenientes de aterros, através de digestão anaeróbica, o que permitiria simultaneamente melhorar a gestão de resíduos e produzir biometano para uso energético.

No contexto das diferentes tecnologias aplicáveis ao transporte de mercadorias por veículos pesados, o biometano destaca-se como a opção com as emissões líquidas GEE mais reduzidas, sendo estas, inclusive, negativas. Este facto torna-o particularmente atrativo do ponto de vista ambiental. No entanto, quando analisado o TCO, os BEV's apresentam-se como a solução mais vantajosa até 2040, beneficiando da sua elevada eficiência energética, da evolução tecnológica contínua e do suporte proporcionado por políticas públicas e incentivos.

Contudo, a segunda parte do estudo revela um panorama ainda incerto para a aplicação do biometano no setor dos transportes. A ausência de dados específicos sobre a alocação energética para este setor, bem como o cenário realista de que apenas cerca de 8,4% da energia produzida com biometano poderá ser destinada ao transporte, resultaria numa substituição de apenas 595 veículos pesados em 2030, ou seja, 0,4% do parque automóvel de veículos pesados existente em 2023 (138 800 unidades). Este valor é relativamente baixo para provocar uma transformação estrutural no setor, o que evidencia os limites atuais da escalabilidade do biometano neste domínio.

Em suma, Portugal ainda enfrenta grandes desafios estruturais e económicos para atingir as metas definidas no PAB, especialmente no setor dos transportes. Para que o biometano se

torne uma solução competitiva e impactante, será fundamental investir na expansão da produção nacional, otimização de políticas públicas, e no desenvolvimento de um mercado regulado e transparente, com incentivos claros à adoção por parte das empresas e operadores logísticos.

A nível da análise qualitativa de parâmetros económicos, as tecnologias mais competitivas são o Diesel B7 e os BEV, enquanto o biometano, embora não sendo a opção mais competitiva em termos de custo direto, distingue-se pelo seu desempenho ambiental superior, o que reforça a necessidade de apoios institucionais para fomentar a sua implementação.

Deste modo, conclui-se que não existe uma única tecnologia capaz de resolver, de forma isolada, o desafio da descarbonização no setor dos transportes pesados. A estratégia mais eficaz passará pela complementaridade de soluções tecnológicas, promovendo um *mix* energético diversificado e equilibrado, que permita conciliar a redução das emissões de GEE com os objetivos ambientais definidos pela União Europeia e pelos programas nacionais, como o PAB.

# Bibliografia

---

- PAB (2024): 41/2024, R. d. (15 de março de 2024). Aprova o Plano de Ação para o Biometano 2024-2040. p. 51. Obtido em 4 de junho de 2025
- (ACP, s.d): *ACP*. (s.d.). Obtido de Quanto custa carregar um carro elétrico?: <https://www.acp.pt/eletricos/carregar-carro-eletrico/quanto-custa-carregar-um-carro-eletrico>
- águas & ambiente online (2024).: *águas & ambiente online*. (29 de abril de 2024). Obtido em 29 de junho de 2025, de Projeto-piloto vai testar veículo pesado de mercadorias movido a biometano: <https://www.ambienteonline.pt/opinio/a-descarbonizacao-dos-transportes-rodoviaros-2024-foi-o-ano-do-biometano>
- (AMERICAN POWER GROUP, s.d.): *AMERICAN POWER GROUP*. (s.d.). Obtido em 05 de junho de 2025, de Dual Fuel Systems for Vehicular Diesel Engines: <https://americanpowergroupinc.com/technology/v6000-vehicular/>
- (Carey, 2024): Carey, C. A. (1 de agosto de 2024). *Reuters*. Obtido de Big truckmakers bet on hydrogen to extend combustion engine life: <https://www.reuters.com/business/autos-transportation/big-truckmakers-bet-hydrogen-extend-combustion-engine-life-2024-08-01/>
- (CNG Eurpoe, s.d): *CNG Europe*. (s.d.). Obtido de Map of Cng and Lng stations in Europe: [https://cng europe.com/#google\\_vignette](https://cng europe.com/#google_vignette)
- Concawe (2023): *CONCAWE*. (dezembro de 2023). Obtido em 06 de junho de 2025, de Life Cycle Assessment (LCA) of greenhouse gas emissions from Heavy Duty Vehicles: <https://hdvco2comparator.eu/>
- (cummins, 2023): *cummins*. (23 de março de 2023). Obtido em 05 de junho de 2025, de Vantagens dos motores a diesel : <https://www.cummins.com/pt/news/2023/03/23/advantages-diesel-engines>
- Nagy e Jakovis (2025): Daniel ' Nagy, T. P.-J. (2025 de maio de 2025). Biogas regulatory frameworks in Europe: Comparative analysis of biomethane usage in transport. *Energy Report*. Obtido em 14 de julho de 2025
- (Daimler Truck , 2024):*Daimler Truck* . (25 de julho de 2024). Obtido de Fuel cell trucks deployed in real-life operations: start of initial customer trials with Mercedes-Benz GenH2 Trucks: <https://www.daimlertruck.com/en/newsroom/pressrelease/fuel-cell->

trucks-deployed-in-real-life-operations-start-of-initial-customer-trials-with-mercedes-benz-genh2-trucks-52775389

(DAIMLER TRUCK, 2025): *DAIMLER TRUCK*. (24 de março de 2025). Obtido de <https://www.daimlertruck.com/en/newsroom/pressrelease/next-generation-fuel-cell-truck-daimler-truck-tests-first-prototypes-in-the-swiss-alps-53027304>

DGEG (2024): *Direção-Geral de Energia e Geologia*. (31 de 10 de 2024). Obtido em 07 de junho de 2025, de Balanço Energético Nacional 2023: <https://www.dgeg.gov.pt/pt/destaques/balanco-energetico-nacional-2023>

*Direção-Geral de Energia e Geologia*. (29 de maio de 2024). Obtido de Energia em Números, edição 2024: <https://www.dgeg.gov.pt/pt/destaques/energia-em-numeros-edicao-2024>

(DGEG Preço): *Direção-Geral de Energia e Geologia*. (s.d.). Obtido de Preços de combustíveis em Portugal Continental: <https://www.dgeg.gov.pt/pt/estatistica/energia/precos-de-energia/precos-de-combustiveis-em-portugal-continental/>

dourogas (2021): *dourogas*. (10 de setembro de 2021). Obtido em 07 de junho de 2025, de Dourogás GNV inaugurou primeiro posto de biogás em Portugal: <https://www.dourogassgps.pt/2021/09/10/dourogas-gnv-inaugurou-primeiro-posto-de-biogas-em-portugal/>

E-Truck (2021): E-Truck Virtual Teardown Study. (11 de junho de 2021).

EURO transporte (2022): *EURO transportes*. (20 de julho de 2022). Obtido em 06 de junho de 2025, de Dourogás renovável faz injeção inédita em Portugal: <https://www.eurotransporte.pt/noticia/42/4571/dourogas-renovavel-faz-injecao-inedita-em-portugal/>

acea (2025): europe, a. d. (janeiro de 2025). VEHICLES ON EUROPEAN ROADS. Obtido em 04 de junho de 2024

Diretivas EU (2023): Europeia, J. O. (Ed.). (31 de outubro de 2023). DIRETIVA (UE) 2023/2413 DO PARLAMENTO EUROPEU E DO CONSELHO. *que altera a Diretiva (UE) 2018/2001, o Regulamento (UE) 2018/1999 e a Diretiva 98/70/CE no que*. Obtido em 04 de junho de 2025

Farm Energy (2019): *Farm Energy*. (03 de abril de 2019). Obtido de Biogas Utilization and Cleanup: <https://farm-energy.extension.org/biogas-utilization-and-cleanup/>

Floene (2022): *Floene*. (2022). Obtido de Biometano na Europa: <https://gasesrenovaveis.floene.pt/biometano-na-europa/>

- (Fuel Prices, 2024): *Fuel prices in the EU: Understanding future dynamics*. (28 de agosto de 2024). Obtido em 07 de 06 de 2025, de IRU: <https://www.iru.org/news-resources/newsroom/fuel-prices-eu-understanding-future-dynamics>
- DGEG (2024): Geologia, D.-G. d. (s.d.). *O Plano de Ação para o Biometano 2024-2040 (PAB)*. Obtido de Direção-Geral de Energia e Geologia: <https://www.dgeg.gov.pt/pt/areas-transversais/relacoes-institucionais-e-de-mercado/politica-energetica/plano-de-acao-para-o-biometano-2024-2040-pab/>
- Green Car Congress*. (17 de novembro de 2021). Obtido de DHL, Shell and Grundfos Bio-LNG pilot for road freight delivers 85% CO2 savings over conventional diesel: <https://www.greencarcongress.com/2021/11/20211117-dhl.html>
- Green Car Congress*. (02 de fevereiro de 2023). Obtido de Liquefied biogas Volvo Trucks models getting a new power level of 500 hp; more fuel efficient, larger tank: <https://www.greencarcongress.com/2023/02/20230202-volvo.html>
- Green Car Congress*. (24 de maio de 2023). Obtido de German supermarket chain EDEKA to convert its 700-vehicle fleet to low CO2 by 2025 with IVECO S-WAY LNG trucks: <https://www.greencarcongress.com/2023/05/20230524-iveco.html>
- Greensavers (2024): *Greensavers*. (02 de janeiro de 2024). Obtido em 07 de janeiro de 2025, de Portugal: Renováveis abastecem 61% do consumo de eletricidade em 2023: <https://greensavers.sapo.pt/portugal-renovaveis-abastecem-61-do-consumo-de-eletricidade-em-2023/>
- Haodong Lin, M. J. (23 de julho de 2024). Biogas utilisation – Life cycle assessment of enabling technology for transport biomethane - UK case study, Bore Hill farm Biodigester.
- (HYDROGEN Technology wordexpo, 2024): *HYDROGEN Technology wordexpo*. (12 de abril de 2024). Obtido de MAN has created 200 hydrogen combustion-powered trucks: <https://www.hydrogen-worldexpo.com/industry-news/man-created-200-hydrogen-combustion-powered-trucks>
- Rajalehto e Helo (2025): Helo, C. R. (19 de abril de 2025). Comparing feasibility of low-carbon heavy-duty road freight vehicles. *Journal of Cleaner Production*.
- (Isabel Cañete Vela, 2018) :Isabel Cañete Vela, e. a. (julho de 2018). *SYNTHESIZING LCA REPORTS ON FUELS FOR HEAVY DUTY TRUCKS*.
- Isabel Cañete Vela, H. T. (julho de 2018). *SYNTHESIZING LCA REPORTS ON FUELS FOR HEAVY DUTY TRUCKS*. Obtido em 05 de junho de 2025
- (Iveco, s.d.): *Iveco*. (s.d.). Obtido de <https://www.iveco.com/uk/S-Way-Natural-Gas/S-Way-Natural-Gas-Rigid>

- (JUNTOS NO CAMINHO, 2025): *JUNTOS NO CAMINHO*. (22 de janeiro de 2025). Obtido em 05 de junho de 2025, de Scania a gás: confira como funciona e características: <https://juntosnocaminho.com.br/scania-a-gas-confira-como-funciona-e-caracteristicas/>
- KNAUFINDUSTRIES (2022).: *KNAUFINDUSTRIES*. (05 de agosto de 2022). Obtido em 05 de junho de 2025, de Vantagens e desvantagens do combustível de hidrogênio para o carro: <https://knaufautomotive.com/pt-br/vantagens-e-desvantagens-do-combustivel-de-hidrogenio-para-o-carro/>
- Krause, J. D. (2018). *Heavy duty vehicle CO2 emission reduction cost curves and cost assessment – enhancement of the DIONE model*.
- (Landirengo 2, s.d.): *Landirengo*. (s.d.). Obtido em 05 de junho de 2025, de Sistemas Dual Fuel: diesel + gás natural: <https://landirengo.com/br/sistemas-dual-fuel-diesel-gas-natural>
- (Landirengo 1, s.d.): *Landirengo*. (s.d.). Obtido em 05 de junho de 2025, de Sistema Diesel/Gás – Dual Fuel: <https://www.landirengo.com.br/sistema-diesel-gas-dual-fuel/>
- (LNG AUTOMOTIVE PARTS, s.d.): *LNG AUTOMOTIVE PARTS*. (s.d.). Obtido de Caminhão a gás: descubra quais são as vantagens e desvantagens: <https://www.lng.com.br/caminhao-a-gas-descubra-quais-sao-as-vantagens-e-desvantagens/>
- MAPFRE, (2023): *MAPFRE*. (10 de maio de 2023). Obtido em 06 de junho de 2025, de Biometano, o futuro da energia limpa?: <https://www.mapfre.com/pt-br/actualidade/sustentabilidade/biometano-futuro-energia-limpa/>
- Pressi et al. (2022): Matteo Prussi, L. L. (2022). Comparing e-Fuels and Electrification for Decarbonization of Heavy-Duty Transports.
- (MAN Truck & Bus, s.d.): *MAN Truck & Bus*. (s.d.). Obtido de Zero Emission: <https://www.man.eu/corporate/en/zero-emission/zero-emission.html>
- Noussan et.al (2024): Michel Noussan, M. P. (2024). The biomethane potential for public transport. Obtido em 07 de junho de 2025
- Noussan et al. (2023): Michel Noussan, V. N. (20 de julho de 2023). The potential role of biomethane for the decarbonization of transport: An analysis of 2030 scenarios in Italy. Obtido em 06 de junho de 2025
- N. Keogh, D. C. (06 de novembro de 2023). An environmental and economic assessment for biomethane injection and natural gas heavy goods vehicles.
- (Nicolae Scarlat, 2021): Nicolae Scarlat, M. P. (15 de abril de 2021). Quantification of the carbon intensity of electricity produced and used. Obtido em 06 de junho de 2025

- Pål Börjesson et al. (2016): Pål Börjesson, M. L. (setembro de 2016). METHANE AS VEHICLE FUEL – A WELL-TO-WHEEL ANALYSIS (METDRIV). Obtido em 05 de junho de 2025
- Smague (2024): Pascal Smague, O. G. (2024). *A life-cycle assessment tool for heavy-duty vehicles (CONCAWE)*.
- Paul D. Larson, R. V. (03 de janeiro de 2023). Zero-Emission Heavy-Duty, Long-Haul Trucking: Obstacles and Opportunities for Logistics in North America.
- Pierre-Louis Ragon, F. R. (setembro de 2021). CO2 emissions from trucks in the EU: An analysis of the heavy-duty CO2 standards baseline data.
- Sulewski (2023): Piotr Sulewski, W. I. (12 de janeiro de 2023). Development of the Biomethane Market in Europe.
- (Quasis energia, 2024): *Quasis energia*. (01 de setembro de 2024). Obtido em 05 de junho de 2025, de Desafios e Oportunidades no Desenvolvimento de Motores a Combustão Interna Movidos a Hidrogênio para Veículos Leves: <https://quasis.com.br/desafios-e-oportunidades-no-desenvolvimento-de-motores-a-combustao-interna-movidos-a-hidrogenio-para-veiculos-leves/>
- Rands (2022): *Rands*. (07 de outubro de 2022). Obtido em 05 de junho de 2025, de Entenda características do caminhão a gás e saiba se vale a pena!: <https://blog.rands.com.br/caminhao-a-gas>
- (REPSOL, s.d.): *REPSOL*. (s.d.). Obtido em 05 de junho de 2025, de Carros a hidrogénio: tudo o que precisa de saber: <https://www.repsol.pt/particulares/assessoramento/carros-a-hidrogenio-tudo-o-que-precisa-de-saber/>
- (Revista Cultivar, 2021): *Revista Cultivar*. (15 de janeiro de 2021). Obtido em 05 de junho de 2025, de Como funciona o motor a diesel e suas vantagens : <https://revistacultivar.com.br/noticias/como-funciona-o-motor-a-diesel-e-suas-vantagens>
- Basma e Rodriguez, (2023 b): Rodríguez, H. B. (novembro de 2023). A total cost of ownership comparison of truck decarbonization pathways in Europe. Obtido em 06 de junho de 2025
- Basma e Rodriguez, (2023 a): Rodríguez, H. B. (janeiro de 2023). THE EUROPEAN HEAVY-DUTY VEHICLE MARKET UNTIL 2040: ANALYSIS OF DECARBONIZATION PATHWAYS. (icct, Ed.) Obtido em 04 de junho de 2025
- (SCANIA Portugal, s.d.): *SCANIA Portugal*. (s.d.). Obtido em 05 de junho de 2025, de Como funciona um camião elétrico de células de combustível de hidrogénio?: <https://www.scania.com/pt/pt/home/about-scania/newsroom/news/2021/how-does-a-hydrogen-fuel-cell-electric-truck-work.html>

- (Schmidt, 2021): Schmidt, A. S. (27 de setembro de 2021). E-Fuels: A techno-economic assessment of EU domestic production and imports towards 2050. *CONCAWE*.
- (EU Commission, 2018): service, E. C. (novembro de 2018). The European Commission's. Obtido em novembro de 2018
- Silva (2024): Silva, B. (17 de julho de 2024). *Jornal de Negócios*. Obtido em 07 de junho de 2025, de Produção de biometano pode crescer 178% até 2030 e poupar 1,4 mil milhões aos consumidores: <https://www.jornaldenegocios.pt/empresas/energia/detalhe/producao-de-biometano-pode-crescer-178-ate-2030-e-poupar-14-mil-milhoes-aos-consumidores>
- Soheil e Nestah (2016): Soheil A. Neshat, M. M. (2016). Anaerobic co-digestion of animal manures and lignocellulosic residues as a potent approach for sustainable biogas production. Obtido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032117307694>
- Sul informação (2025): *Sul informação*. (01 de janeiro de 2025). Obtido em 01 de junho de 2025, de 71% do consumo de eletricidade em 2024 foi garantido por energias renováveis: <https://www.sulinformacao.pt/2025/01/71-do-consumo-de-eletricidade-em-2024-foi-garantido-por-energias-renovaveis/>
- (SUPPLY CHAIN, 2023): *SUPPLY CHAIN*. (30 de agosto de 2023). Obtido em 07 de junho de 2025, de Projeto piloto da Dourogás e Leroy Merlin testa biometano em veículos pesados de mercadorias: <https://www.supplychainmagazine.pt/2023/08/30/projeto-piloto-da-dourogas-e-leroy-merlin-testa-biometano-em-veiculos-pesados-de-mercadorias/>
- Sustentável (2024): *Sustentável*. (24 de janeiro de 2024). Obtido em 07 de junho de 2025, de Qual é o plano para promover o mercado do biometano em Portugal?: <https://www.revistasustentavel.pt/circularidade/plano-biometano-portugal/>
- (TE connectivity, s.d.): *TE connectivity*. (s.d.). Obtido em 05 de junho de 2025, de Eletrificação de um movimento: <https://www.te.com/pt/industries/hybrid-electric-mobility/insights/electrifying-movement-trend-paper.html>
- (Torres, 2021): Torres, G. d. (2021). APROVEITAMENTO DO BIOGÁS DE ESGOTO PARA GERAÇÃO DE ENERGIA: UMA ANÁLISE TERMODINÂMICA.
- (Volvo Trucks, 2023): *Volvo Trucks*. (1 de fevereiro de 2023). Obtido de Volvo launches powerful biogas truck for lowering CO2 on longer transports: <https://www.volvotrucks.com/en-en/news-stories/press-releases/2023/feb/volvo-launches-powerful-biogas-truck-for-longer-transports.html>
- (Volvo Trucks, 2024): *Volvo Trucks*. (23 de maio de 2024). Obtido de Volvo to launch hydrogen-powered trucks: <https://www.volvotrucks.com/en-en/news-stories/press-releases/2024/may/Volvo-to-launch-hydrogen-powered-trucks.html>

Wang et al. (2023): Zixian Wang, S. A. (06 de janeiro de 2023). A total cost of ownership analysis of zero emission powertrain solutions for the heavy goods vehicle sector. Obtido em 07 de junho de 2025

(Wikipédia, s.d.): *Wikipédia*. (s.d.). Obtido de Iveco S-Way: [https://fr.wikipedia.org/wiki/Iveco\\_S-Way](https://fr.wikipedia.org/wiki/Iveco_S-Way)

*Esta página foi intencionalmente deixada em branco*

# Anexos

---

## Anexo A

**Pal Borjesson et al. (setembro de 2016):** Este estudo analisa o uso de metano como combustível veicular, considerando o desempenho energético, as emissões de GEE e os custos de diferentes sistemas de produção e distribuição. A avaliação cobre todo o ciclo de vida (*well-to-wheel*) e proporciona recomendações para a adoção comercial.

As conclusões mostram que o metano, principalmente de fontes renováveis, apresenta uma alternativa sustentável ao diesel, com emissões de GEE inferiores, eficiência energética comparável e custos relativamente próximos. A minimização de perdas ao longo da cadeia e o apoio de políticas públicas serão determinantes para a sua implementação. Além disso, a diversidade de métodos de produção proporciona flexibilidade na adoção, dependendo das circunstâncias de cada região (Pål Börjesson, 2016).

**Krause, J., Donati, A.V (2018):** Este estudo analisa a redução de emissões de CO<sub>2</sub> em veículos pesados (HDV), considerando o comprometimento da UE na descarbonização, a necessidade de definição de padrões específicos e o apoio à formulação de políticas.

Com o modelo DIONE, foram avaliados custos, desenvolvidas curvas de custo e identificados pacotes tecnológicos otimizados para a diminuição de emissões, considerando diferentes cenários e grupos de veículos.

As conclusões reforçam a importância da adoção de padrões de CO<sub>2</sub> para atender às metas climáticas, considerando tanto a eficácia como a viabilidade econômica. Além disso, o estudo proporciona uma base relevante para apoiar a tomada de decisão e o investimento em tecnologias de transporte pesado mais sustentáveis (Krause, 2018).

**Isabel Cañete Vela et al. (julho 2018):** Com base nas emissões de GEE provenientes dos transportes pesados e dada a importância deste setor e também a necessidade de alternativas sustentáveis este estudo investiga as avaliações LCA para entender melhor os impactos ambientais associados os diferentes combustíveis. O estudo tende como objetivo avaliar os vários dados diferentes de LCA's dos vários veículos pesados, identificar limitações nestes estudos e propor recomendações para trabalhos futuros.

Nas conclusões finais o estudo apresenta limitações acerca da disponibilidade de veículos pesados para a análise de resultados como também os resultados da LCA dependerem de bastantes variáveis (metodologia de trabalho, perfis de condução, tipo de veículos, etc.), usar uma abordagem mais abrangente da LCA não só a nível do veículo em si, mas dos processos de produção do veículo pesado e também dos combustíveis. O cenário a longo prazo não deve só ter em atenção a redução de emissões, mas também ter em vista a sustentabilidade.

A análise do estudo indica que veículos pesados a diesel geralmente emitem mais emissões de GEE em comparação com veículos a CNG e biocombustíveis. O uso de biogás, por

exemplo, pode resultar em uma redução significativa das emissões de GEE, com reduções que variam de 50% a 90% em comparação com combustíveis fósseis.

Também o estudo reforça que para realizar estes estudos de LCA existe a necessidade de padrões consistentes nas análises para que os resultados possam ser mais facilmente comparados e aplicados em decisões políticas e industriais (Isabel Cañete Vela e. a., 2018).

**Pierre-Louis Ragon e Filipe Rodríguez (setembro 2021):** Este estudo visa apoiar o cumprimento das metas da UE na redução de CO<sub>2</sub> de veículos pesados, monitorizando as emissões, identificando caminhos tecnológicos e orientando a definição de políticas.

As conclusões mostram que o desempenho de emissão de CO<sub>2</sub> ainda apresenta grande variação entre fabricantes, sendo preciso adotar estratégias diferenciadas. A avaliação evidencia a urgência de apoiar a transição para veículos de emissão zero e de usar esses dados para preparar a revisão de futuros padrões de emissão (Pierre-Louis Ragon, 2021).

**N. Keogh et al. (novembro de 2023):** Este estudo avalia o uso de biometano, injetado na rede de gás, como alternativa ao diesel e ao gás natural no transporte pesado e no aquecimento. A avaliação cobre tanto o impacto ambiental quanto a viabilidade econômica.

As conclusões mostram que o biometano proporciona uma redução significativa de emissões de GEE e de outras partículas poluentes. Os custos de produção variam dependendo da localização e do transporte de biomassa, sendo importante considerar também o uso de digestato como fertilizante. Por fim, a capacidade da rede de receber biometano é um fator crucial para maximizar seus benefícios na descarbonização (N. Keogh, 2023).

**Paul D.Larson et al. (janeiro de 2024):** Este estudo responde à necessidade de reduzir as emissões de GEE no transporte pesado na América do Norte, considerando o crescimento do transporte de mercadoria e o Acordo de Paris.

Avalia o potencial de caminhões elétricos a bateria (BEV) e a célula de combustível (FCEV) para descarbonizar o setor, identifica barreiras econômicas e de infraestrutura, e propõe estratégias para facilitar essa transição.

As conclusões mostram que ambas as alternativas representam uma saída relevante, embora enfrentem desafios como custo, falta de infraestrutura e eficácia limitada da tributação de carbono. A produção de hidrogênio pelo reformado de metano a vapor pode apoiar a adoção de FCEVs. (Paul D. Larson, 2023).

**Haodong Lin et al. (julho 2024):** Este estudo avalia o uso de biometano como alternativa ao biogás para produção de eletricidade, considerando o contexto do Reino Unido, onde pequenas e médias instalações de digestão anaeróbica enfrentam dificuldades de escoar a produção de biogás para a rede.

Com base na avaliação de ciclo de vida, o estudo concluiu que o biometano como combustível de transporte proporciona uma maior redução de emissões de GEE e de escassez de recursos fósseis. Além disso, ele apresenta um maior potencial de captura de CO<sub>2</sub>

biogênico. A implementação de políticas de apoio e o investimento em tecnologias de atualização serão, assim, determinantes para apoiar a descarbonização e atender às metas climáticas de 2050 (Haodong Lin, 2024).

## Anexo B

Notas (unidades):

<b>Eletricidade</b>	gCO <sub>2</sub> eq/t.km
<b>Fabrico</b>	gCO <sub>2</sub> eq/t.km
<b>Combustível WTT</b>	gCO <sub>2</sub> eq/t.km
<b>Combustível TTW menos CO<sub>2</sub> reciclar</b>	gCO <sub>2</sub> eq/t.km
<b>CO<sub>2</sub> Reciclado</b>	gCO <sub>2</sub> eq/t.km
<b>Potência do motor</b>	kW
<b>Potência da Célula de Combustível</b>	kW
<b>Peso do veículo sem carga e com atrelado</b>	kg
<b>Peso da carga</b>	kg
<b>Distância</b>	km
<b>Consumo</b>	BEV (kWh/100km), FCEV (kg/100km), B7/e-diesel/HVO (L/100km), CHG/biometano/H <sub>2</sub> /LNG (kg/100km)
<b>Tempo de vida do veículo</b>	km
<b>Emissões de gases de estufa</b>	gCO <sub>2</sub> eq/t.km

### Resultados acerca das comparações das diferentes tecnologias

*Tabela 19: Resultados BEV, original*

	BEV		
	533 kWh	800 kWh	1200 kWh
<b>Fabrico</b>	6,3	8,02	10,61
<b>Eletricidade</b>	26,5	24,57	25,17
Potência do motor	350	350	350
Peso do veículo sem carga e com atrelado	16221	17554	19554
Peso da carga	19000	19000	19000
Distância	292	473	693
Consumo	154,91	143,65	147,15
Tempo de vida do veículo	750000	750000	750000
<b>Emissões de gases de estufa</b>	32,8	32,6	35,78

*Tabela 20: Resultados FCEV, original*

	FCEV	
	H <sub>2</sub> – Verde Renovável	H <sub>2</sub> - NG
<b>Fabrico</b>	5,56	5,56
<b>Combustível WTT</b>	5,52	51,03
Potência da Célula de Combustível	225	225
Potência do Motor	350	350
Peso do veículo sem carga e com atrelado	15449	15449
Peso da carga	19000	19000

Distância	873	873
Consumo	8,01	8,01
Tempo de vida do veículo	750000	750000
<b>Emissões de gases de estufa</b>	11,08	56,59

Tabela 21: Resultados ICE, original

	ICE													
	B7 - EU mix 2017	CNG - fóssil EU mix 2017	Bio metano comprimid o - EU mix 2017	Bio metano comprimid o - resíduos agrícolas (estrupe)	Bio metano comprimid o - resíduos municipais	e- Diesel via FT	H2 - NG	H2 - verde renovável	HVO - EU mix 2017	Bio metan o líquid o - EU mix 2017	Bio metano líquido - resíduos agrícolas (estrupe)	Bio metano líquido - resíduos municipai s	Bio metano líquido - resíduo s de madeira	LNG - fóssil EU mix 2017
<b>Fabrico</b>	3,25	3,76	3,76	3,76	3,76	3,25	4,92	4,92	3,25	3,65	3,65	3,65	3,65	3,65
<b>Combustível WTT</b>	11,63	8,62	-4,52	-74,23	6,85	7,21	61,31	6,63	17,3	-1,46	-71,17	9,92	18,24	11,94
<b>Combustível TTW menos CO2 reciclar</b>	42,28	40,15	1,02	1,02	1,02	2,7	3,13	3,13	2,7	0,99	0,99	0,99	0,99	40,76
<b>CO2 Reciclado</b>	2,85	1,39	40,85	40,85	40,85	40,83	0	0	40,86	39,59	39,59	39,59	39,59	0
Potência	400	340	340	340	340	400	410	410	400	340	340	340	340	340
Peso do veículo sem carga e com atrelado	15000	15020	15020	15020	15020	15000	15889	15889	15000 0	15020	15020	15020	15020	15020
Peso da carga	19000	19000	19000	19000	19000	19000	19000	19000	19000 0	19000	19000	19000	19000	19000
Distância	1629	1701	1701	1701	1701	1566	727	727	1566	1792	1792	1792	1792	1792
Consumo	30,7	29,4	29,4	29,4	29,4	31,93	9,63	9,63	31,93	27,9	27,9	27,9	27,9	27,9
Tempo de vida do veículo	75000 0	75000 0	750000	750000	750000	750000 0	75000 0	750000	75000 0	750000	750000	750000	750000	75000 0
<b>Emissões de gases de estufa</b>	57,15	52,53	0,26	-69,45	11,64	13,15	69,36	14,68	23,25	3,18	-66,53	14,56	22,88	56,35

**Resultados acerca das comparações das diferentes fontes de Biometano**

*Tabela 22: Resultado das diferentes fontes de Biometano, original*

	ICE						
	Bio metano comprimido - EU mix 2017	Bio metano comprimido - resíduos agrícolas (estrume)	Bio metano comprimido - resíduos municipais	Bio metano líquido - EU mix 2017	Bio metano líquido - resíduos agrícolas (estrume)	Bio metano líquido - resíduos municipais	Bio metano líquido - resíduos de madeira
<b>Fabrico</b>	3,76	3,76	3,76	3,65	3,65	3,65	3,65
<b>Combustível WTT</b>	-4,52	-74,23	6,85	-1,46	-71,17	9,92	18,24
<b>Combustível TTW menos CO2 reciclar</b>	1,02	1,02	1,02	0	0	0	0
<b>CO2 Reciclado</b>	40,85	40,85	40,85	39,59	39,59	39,59	39,59
Potência	340	340	340	340	340	340	340
Peso do veículo sem carga e com atrelado	15020	15020	15020	15020	15020	15020	15020
Peso da carga	19000	19000	19000	19000	19000	19000	19000
Distância	1701	1701	1701	1792	1792	1792	1792
Consumo	29,4	29,4	29,4	27,9	27,9	27,9	27,9
Tempo de vida do veículo	750000	750000	750000	750000	750000	750000	750000
<b>Emissões de gases de estufa</b>	0,26	-69,45	11,64	3,18	-66,53	14,56	22,88

## Resultados acerca da análise de sensibilidade dos diferentes parâmetros

### Modificação - Pack de baterias

*Tabela 23: Resultados de BEV com substituição dos packs das baterias 2, original*

Modificação - Pack de baterias ao longo do tempo de vida ( <b>2 packs</b> )	BEV		
	533 kWh	800 kWh	1200 kWh
<b>Fabrico</b>	6,3	8,02	10,61
<b>Eletricidade</b>	26,5	24,57	25,17
Potência do motor	350	350	350
Peso do veículo sem carga e com atrelado	16221	17554	19554
Peso da carga	19000	19000	19000
Distância	292	473	693
Consumo	154,91	143,65	147,15
Tempo de vida do veículo	750000	750000	750000
<b>Emissões de gases de estufa</b>	32,8	32,6	35,78

*Tabela 24: Resultados de BEV com substituição dos packs das baterias 1, original*

Modificação - Pack de baterias ao longo do tempo de vida ( <b>1 packs</b> )	BEV		
	533 kWh	800 kWh	1200 kWh
<b>Fabrico</b>	4,57	5,44	6,73
<b>Eletricidade</b>	26,5	24,57	25,17
Potência do motor	350	350	350
Peso do veículo sem carga e com atrelado	16221	17554	19554
Peso da carga	19000	19000	19000
Distância	292	473	693
Consumo	154,91	143,65	147,15
Tempo de vida do veículo	750000	750000	750000

<b>Emissões de gases de estufa</b>	31,07	30,01	31,9
------------------------------------	-------	-------	------

*Tabela 25: Resultados de BEV com substituição dos packs das baterias 4, original*

Modificação - Pack de baterias ao longo do tempo de vida ( <b>4 packs</b> )	<b>BEV</b>		
	533 kWh	800 kWh	1200 kWh
<b>Fabrico</b>	9,74	13,2	18,37
<b>Eletricidade</b>	26,5	24,57	25,17
Potência do motor	350	350	350
Peso do veículo sem carga e com atrelado	16221	17554	19554
Peso da carga	19000	19000	19000
Distância	292	473	693
Consumo	154,91	143,65	147,15
Tempo de vida do veículo	750000	750000	750000
<b>Emissões de gases de estufa</b>	36,24	37,77	43,54

Modificação - Produção das baterias

*Tabela 26: Resultados de BEV na produção de baterias 86 kgCO<sub>2</sub>eq/kWh, original*

Modificação - Produção das baterias ( <b>86</b> )	<b>BEV</b>		
	533 kWh	800 kWh	1200 kWh
<b>Fabrico</b>	6,3	8,02	10,61
<b>Eletricidade</b>	26,5	24,57	25,17
Potência do motor	350	350	350
Peso do veículo sem carga e com atrelado	16221	17554	19554
Peso da carga	19000	19000	19000
Distância	292	473	693
Consumo	154,91	143,65	147,15
Tempo de vida do veículo	750000	750000	750000

<b>Emissões de gases de estufa</b>	32,8	32,6	35,78
------------------------------------	------	------	-------

*Tabela 27: Resultados de BEV na produção de baterias 52 kgCO<sub>2</sub>eq/kWh, original*

Modificação - Produção das baterias (52)	BEV		
	533 kWh	800 kWh	1200 kWh
<b>Fabrico</b>	4,94	5,98	7,54
<b>Eletricidade</b>	26,5	24,57	25,17
Potência do motor	350	350	350
Peso do veículo sem carga e com atrelado	16221	17554	19554
Peso da carga	19000	19000	19000
Distância	292	473	693
Consumo	154,91	143,65	147,15
Tempo de vida do veículo	750000	750000	750000
<b>Emissões de gases de estufa</b>	31,43	30,55	32,71

*Tabela 28: Resultados de BEV na produção de baterias 30 kgCO<sub>2</sub>eq/kWh, original*

Modificação - Produção das baterias (30)	BEV		
	533 kWh	800 kWh	1200 kWh
<b>Fabrico</b>	4,05	4,66	5,56
<b>Eletricidade</b>	26,5	24,57	25,17
Potência do motor	350	350	350
Peso do veículo sem carga e com atrelado	16221	17554	19554
Peso da carga	19000	19000	19000
Distância	292	473	693
Consumo	154,91	143,65	147,15

Tempo de vida do veículo	750000	750000	750000
<b>Emissões de gases de estufa</b>	30,55	29,23	30,73

Modificação – Eficiências de Células de Combustível e Motores de combustão

*Tabela 29: Resultados de FCEV com eficiência baixa, original*

<b>Baixo</b>	<b>FCEV</b>	
	H2 – Verde Renovável	H2 - NG
<b>Fabrico</b>	5,56	5,56
<b>Combustível WTT</b>	6,76	62,57
Potência da Célula de Combustível	225	225
Potência do Motor	350	350
Peso do veículo sem carga e com atrelado	15449	15449
Peso da carga	19000	19000
Distância	712	712
Consumo	9,83	9,83
Tempo de vida do veículo	750000	750000
<b>Emissões de gases de estufa</b>	12,33	68,14

Tabela 30: Resultados de ICE com eficiência baixa, original

Baixo	ICE													
	B7 - EU mix 2017	CNG - fóssil EU mix 2017	Bio metano comprimido - EU mix 2017	Bio metano comprimido - resíduos agrícolas (estrume)	Bio metano comprimido - resíduos municipais	e-Diesel via FT	H2 - NG	H2 – Verde Renovável	HVO - EU mix 2017	Bio metano líquido - EU mix 2017	Bio metano líquido - resíduos agrícolas (estrume)	Bio metano líquido - resíduos municipais	Bio metano líquido - resíduos de madeira	LNG - fóssil EU mix 2017
<b>Fabrico</b>	3,25	3,76	3,76	3,76	3,76	3,25	4,92	4,92	3,25	3,65	3,65	3,65	3,65	3,65
<b>Combustível WTT</b>	13,29	9,07	-4,76	-78,1	7,21	8,24	67,66	7,31	19,77	-1,53	-74,88	10,44	19,19	12,57
<b>Combustível TTW menos CO2 reciclar</b>	48,3	42,24	1,07	1,07	1,07	3,08	3,13	3,14	3,08	1,04	1,04	1,04	1,04	42,88
<b>CO2 Reciclado</b>	3,26	1,46	42,98	42,98	42,98	46,65	0	0	46,68	41,65	41,65	41,65	41,65	0
Potência	400	340	340	340	340	400	410	410	400	340	340	340	340	340
Peso do veículo sem carga e com atrelado	15000	15020	15020	15020	15020	15000	15889	15889	15000	15020	15020	15020	15020	15020
Peso da carga	19000	19000	19000	19000	19000	19000	19000	19000	19000	19000	19000	19000	19000	19000
Distância	1426	1616	1616	1616	1616	1371	659	659	1371	1703	1703	1703	1703	1703
Consumo	35,07	30,93	30,93	30,93	30,93	36,48	10,62	10,62	36,48	29,36	29,36	29,36	29,36	29,36
Tempo de vida do veículo	750000	750000	750000	750000	750000	750000	750000	750000	750000	750000	750000	750000	750000	750000
<b>Emissões de gases de estufa</b>	64,83	55,07	0,08	-73,27	12,05	14,56	75,72	15,38	26,09	3,16	-70,19	15,13	23,88	59,09

Tabela 31: Resultados de FCEV com eficiência alta, original

Alta	FCEV	
	H2 – Verde Renovável	H2 - NG
<b>Fabrico</b>	5,56	5,56
<b>Combustível WTT</b>	5,19	47,96
Potência da Célula de Combustível	225	225
Potência do Motor	350	350
Peso do veículo sem carga e com atrelado	15449	15449
Peso da carga	19000	19000
Distância	926	926
Consumo	7,53	7,53
Tempo de vida do veículo	750000	750000
<b>Emissões de gases de estufa</b>	10,75	53,53

Tabela 32: Resultados de ICE com eficiência alta, original

Alta	ICE													
	B7 - EU mix 2017	CNG - fóssil EU mix 2017	Bio metano comprimido - EU mix 2017	Bio metano comprimido - resíduos agrícolas (estrume)	Bio metano comprimido - resíduos municipais	e-Diesel via FT	H2 - NG	H2 – Verde Renovável	HVO - EU mix 2017	Bio metano líquido - EU mix 2017	Bio metano líquido - resíduos agrícolas (estrume)	Bio metano líquido - resíduos municipais	Bio metano líquido - resíduos de madeira	LNG - fóssil EU mix 2017
<b>Fabrico</b>	3,25	3,76	3,76	3,76	3,76	3,25	4,92	4,92	3,25	3,65	3,65	3,65	3,65	3,65
<b>Combustível WTT</b>	10,62	7,25	-3,8	-62,41	5,76	6,58	54,07	5,85	15,8	-1,23	-59,83	8,34	15,33	10,04
<b>Combustível TTW</b>	38,6	33,75	0,86	0,86	0,86	2,46	3,14	3,13	2,46	0,83	0,83	0,83	0,83	34,26

<b>menos CO2 reciclar</b>														
<b>CO2 Reciclado</b>	2,61	1,17	34,34	34,34	34,34	37,28	0	0	37,3	33,28	33,28	33,28	33,28	0
Potência	400	340	340	340	340	400	410	410	400	340	340	340	340	340
Peso do veículo sem carga e com atrelado	15000	15020	15020	15020	15020	15000	15889	15889	15000 0	15020	15020	15020	15020	15020
Peso da carga	19000	19000	19000	19000	19000	19000	19000	19000	19000 0	19000	19000	19000	19000	19000
Distância	1784	2023	2023	2023	2023	1715	824	824	1715	2131	2131	2131	2131	2131
Consumo	28,03	24,72	24,72	24,72	24,72	29,15	8,49	8,49	29,15	23,46	23,46	23,46	23,46	23,46
Tempo de vida do veículo	75000 0	75000 0	750000	750000	750000	750000 0	75000 0	750000	75000 0	75000 0	750000	750000	750000	75000 0
<b>Emissões de gases de estufa</b>	52,46	44,76	0,82	-57,79	10,38	12,29	62,13		21,51	3,25	-55,35	12,82	19,81	47,95

Modificação – Capacidade de H2

*Tabela 33: Resultados da capacidade de armazenamento de H2 para FCEV 10 kg, original*

<b>10 kg (min)</b>	<b>FCEV</b>
	H2 - NG
<b>Fabrico</b>	4,08
<b>Combustível WTT</b>	51,03
Potência da Célula de Combustível	225
Potência do Motor	350
Peso do veículo sem carga e com atrelado	15449

Peso da carga	19000
Distância	125
Consumo	8,01
Tempo de vida do veículo	750000
<b>Emissões de gases de estufa</b>	55,11

*Tabela 34: Resultados da capacidade de armazenamento de H2 para ICE 10 kg, original*

<b>10 kg (min)</b>	<b>ICE</b>
	H2 - NG
<b>Fabrico</b>	4,92
<b>Combustível WTT</b>	61,3
<b>Combustível TTW menos CO2 reciclar</b>	3,13
<b>CO2 Reciclado</b>	0
Potência	410
Peso do veículo sem carga e com atrelado	15889
Peso da carga	19000
Distância	104
Consumo	9,63
Tempo de vida do veículo	750000
<b>Emissões de gases de estufa</b>	67,88

*Tabela 35: Resultados da capacidade de armazenamento de H2 para FCEV 120 kg, original*

<b>120 kg (máx.)</b>	<b>FCEV</b>
	H2 - NG
<b>Fabrico</b>	6,8
<b>Combustível WTT</b>	51,03
Potência da Célula de Combustível	225

Potência do Motor	350
Peso do veículo sem carga e com atrelado	15449
Peso da carga	19000
Distância	1497
Consumo	8,01
Tempo de vida do veículo	750000
<b>Emissões de gases de estufa</b>	<b>57,83</b>

*Tabela 36: Resultados da capacidade de armazenamento de H2 para ICE 120 kg, original*

<b>120 kg (máx)</b>	<b>ICE</b>
	H2 - NG
<b>Fabrico</b>	6,16
<b>Combustível WTT</b>	61,3
<b>Combustível TTW menos CO2 reciclar</b>	3,13
<b>CO2 Reciclado</b>	0
Potência	410
Peso do veículo sem carga e com atrelado	15889
Peso da carga	19000
Distância	1246
Consumo	9,63
Tempo de vida do veículo	750000
<b>Emissões de gases de estufa</b>	<b>70,6</b>

*Tabela 37: Resultados da capacidade de armazenamento de H2 para FCEV 30 kg, original*

<b>30-31 kg</b>	<b>FCEV</b>
-----------------	-------------

	H2 - NG
<b>Fabrico</b>	4,58
<b>Combustível WTT</b>	51,03
Potência da Célula de Combustível	225
Potência do Motor	350
Peso do veículo sem carga e com atrelado	15449
Peso da carga	19000
Distância	374
Consumo	8,01
Tempo de vida do veículo	750000
<b>Emissões de gases de estufa</b>	55,61

*Tabela 38: Resultados da capacidade de armazenamento de H2 para ICE 30 kg, original*

<b>30-31 kg</b>	<b>ICE</b>
	H2 - NG
<b>Fabrico</b>	3,94
<b>Combustível WTT</b>	61,31
<b>Combustível TTW menos CO2 reciclar</b>	3,13
<b>CO2 Reciclado</b>	0
Potência	410
Peso do veículo sem carga e com atrelado	15889
Peso da carga	19000
Distância	312
Consumo	9,63
Tempo de vida do veículo	750000
<b>Emissões de gases de estufa</b>	68,38

Tabela 39: Resultados da capacidade de armazenamento de H2 para FCEV 80 kg, original

<b>80 kg</b>	<b>FCEV</b>
<b>Fabrico</b>	5,81
<b>Combustível WTT</b>	51,03
Potência da Célula de Combustível	225
Potência do Motor	350
Peso do veículo sem carga e com atrelado	15449
Peso da carga	19000
Distância	998
Consumo	8,01
Tempo de vida do veículo	750000
<b>Emissões de gases de estufa</b>	56,84

Tabela 40: Resultados da capacidade de armazenamento de H2 para ICE 80 kg, original

<b>80 kg</b>	<b>ICE</b>
	H2 - NG
<b>Fabrico</b>	5,17
Combustível WTT	61,31
Combustível TTW menos CO2 reciclar	3,13
CO2 Reciclado	0
Potência	410
Peso do veículo sem carga e com atrelado	15889
Peso da carga	19000
Distância	831
Consumo	9,63

Tempo de vida do veículo	750000
<b>Emissões de gases de estufa</b>	69,61

Modificação – Produção das Células de Combustível

*Tabela 41: Resultados de FCEV na produção 20 kgCO<sub>2</sub>eq/kWh, original*

<b>(20)</b>	<b>FCEV</b>
	H2 - NG
<b>Fabrico</b>	5,39
<b>Combustível WTT</b>	51,03
Potência da Célula de Combustível	225
Potência do Motor	350
Peso do veículo sem carga e com atrelado	15449
Peso da carga	19000
Distância	873
Consumo	8,01
Tempo de vida do veículo	750000
<b>Emissões de gases de estufa</b>	51,03

*Tabela 42: Resultados de FCEV na produção 50 kgCO<sub>2</sub>eq/kWh, original*

<b>(50)</b>	<b>FCEV</b>
	H2 - NG
<b>Fabrico</b>	5,65
<b>Combustível WTT</b>	51,03

Potência da Célula de Combustível	225
Potência do Motor	350
Peso do veículo sem carga e com atrelado	15449
Peso da carga	19000
Distância	873
Consumo	8,01
Tempo de vida do veículo	750000
<b>Emissões de gases de estufa</b>	56,58

Modificação – Produção dos tanques de H2

*Tabela 43: Resultados de FCEV na produção 10 kgCO2eq/kWh, original*

<b>10</b>	<b>FCEV</b>
	H2 - NG
<b>Fabrico</b>	4,53
<b>Combustível WTT</b>	51,03
Potência da Célula de Combustível	225
Potência do Motor	350
Peso do veículo sem carga e com atrelado	15449
Peso da carga	19000
Distância	873
Consumo	8,01
Tempo de vida do veículo	750000
<b>Emissões de gases de estufa</b>	55,56

Tabela 44: Resultados de ICE na produção 10 kgCO<sub>2</sub>eq/kWh, original

<b>10</b>	<b>ICE</b>
	H2 - NG
<b>Fabrico (gCO<sub>2</sub>eq/t.km)</b>	3,89
Combustível WTT (gCO <sub>2</sub> eq/t.km)	61,3
Combustível TTW menos CO <sub>2</sub> reciclar (gCO <sub>2</sub> eq/t.km)	3,13
CO <sub>2</sub> Reciclado (gCO <sub>2</sub> eq/t.km)	0
Potência (kW)	410
Peso do veículo sem carga e com atrelado (kg)	15889
Peso da carga (kg)	19000
Distância (km)	727
Consumo (kg/100km ou l/100km)	9,63
Tempo de vida do veículo (km)	750000
<b>Emissões de gases de estufa (gCO<sub>2</sub>eq/t.km)</b>	68,33

Tabela 45: Resultados de FCEV na produção 50 kgCO<sub>2</sub>eq/kWh, original

<b>50</b>	<b>FCEV</b>
	H2 - NG
<b>Fabrico</b>	7,29
<b>Combustível WTT</b>	51,03
Potência da Célula de Combustível	225
Potência do Motor	350
Peso do veículo sem carga e com atrelado	15449
Peso da carga	19000
Distância	873
Consumo	8,01
Tempo de vida do veículo	750000
<b>Emissões de gases de estufa</b>	58,33

Tabela 46: Resultados de ICE na produção 50 kgCO<sub>2</sub>eq/kWh, original

<b>50</b>	<b>ICE</b>
	H2 - NG
<b>Fabrico</b>	6,65
Combustível WTT	61,3
Combustível TTW menos CO2 reciclar	3,13
CO2 Reciclado	0
Potência	410
Peso do veículo sem carga e com atrelado	15889
Peso da carga	19000
Distância	727
Consumo	9,63
Tempo de vida do veículo	750000
<b>Emissões de gases de estufa</b>	71,09

Modificação – Ciclo

Long haul VECTO:

Tabela 47: Resultados BEV em ciclos Long Haul VECTO, original

	BEV		
	533 kWh	800 kWh	1200 kWh
<b>Fabrico</b>	6,3	8,02	10,61
<b>Eletricidade</b>	26,5	24,57	25,17
Potência do motor	350	350	350
Peso do veículo sem carga e com atrelado	16221	17554	19554
Peso da carga	19000	19000	19000
Distância	292	473	693
Consumo	154,91	143,65	147,15
Tempo de vida do veículo	750000	750000	750000
<b>Emissões de gases de estufa</b>	32,8	32,6	35,78

Tabela 48: Resultados FCEV em ciclos Long Haul VECTO, original

	FCEV	
	H2 – Verde Renovável	H2 - NG
<b>Fabrico</b>	5,56	5,56
<b>Combustível WTT</b>	5,52	51,03
Potência da Célula de Combustível	225	225
Potência do Motor	350	350
Peso do veículo sem carga e com atrelado	15449	15449
Peso da carga	19000	19000
Distância	873	873
Consumo	8,01	8,01

Tempo de vida do veículo	750000	750000
Emissões de gases de estufa	11,08	56,59

Tabela 49: Resultados ICE em ciclos Long Haul VECTO, original

	ICE													
	B7 - EU mix 2017	CNG - fossil EU mix 2017	Bio metano comprimid o - EU mix 2017	Bio metano comprimid o - resíduos agrícola (estrupe)	Bio metano comprimid o - resíduos municipais	e- Diesel via FT	H2 - NG	H2 – Verde Renovável	HVO - EU mix 2017	Bio metan o líquid o - EU mix 2017	Bio metano líquido - resíduos agrícola (estrupe)	Bio metano líquido - resíduos municipais	Bio metano líquido - resíduos de madeira	LNG - fossil EU mix 2017
<b>Fabrico</b>	3,25	3,76	3,76	3,76	3,76	3,25	4,92	4,92	3,25	3,65	3,65	3,65	3,65	3,65
<b>Combustível WTT</b>	11,63	8,62	-4,52	-74,23	6,85	7,21	61,31	5,85	17,3	-1,46	-71,17	9,92	18,24	11,94
<b>Combustível TTW menos CO2 reciclar</b>	42,28	40,15	1,02	1,02	1,02	2,7	3,13	3,13	2,7	0,99	0,99	0,99	0,99	40,76

<b>CO2 Reciclado</b>	2,85	1,39	40,85	40,85	40,85	40,83	0	0	40,86	39,59	39,59	39,59	39,59	0
Potência	400	340	340	340	340	400	410	410	400	340	340	340	340	340
Peso do veículo sem carga e com atrelado	15000	15020	15020	15020	15020	15000	15889	15889	15000 0	15020	15020	15020	15020	15020
Peso da carga	19000	19000	19000	19000	19000	19000	19000	19000	19000 0	19000	19000	19000	19000	19000
Distância	1629	1701	1701	1701	1701	1566	727	727	1566	1792	1792	1792	1792	1792
Consumo	30,7	29,4	29,4	29,4	29,4	31,93	9,63	9,63	31,93	27,9	27,9	27,9	27,9	27,9

Tempo de vida do veículo	750000	750000	750000	750000	750000	750000	750000	750000	750000	750000	750000	750000	750000	750000
<b>Emissões de gases de estufa</b>	57,15	52,53	0,26	-69,45	11,64	13,15	69,36	13,9	23,25	3,18	-66,53	14,56	22,88	56,35

Regional VECTO:

*Tabela 50: Resultados BEV em ciclos Regional VECTO, original*

	<b>BEV</b>		
	533 kWh	800 kWh	1200 kWh
<b>Fabrico</b>	6,3	8,02	10,61
<b>Eletricidade</b>	28,76	25,71	25,8
Potência do motor	350	350	350
Peso do veículo sem carga e com atrelado	16221	17554	19554
Peso da carga	19000	19000	19000
Distância	269	452	676
Consumo	168,13	150,29	150,85
Tempo de vida do veículo	750000	750000	750000
<b>Emissões de gases de estufa</b>	35,06	33,73	36,41

Tabela 51: Resultados FCEV em ciclos Regional VECTO, original

	FCEV	
	H2 – Verde Renovável	H2 - NG
<b>Fabrico</b>	5,56	5,56
<b>Combustível WTT</b>	5,6	51,79
Potência da Célula de Combustível	225	225
Potência do Motor	350	350
Peso do veículo sem carga e com atrelado	15449	15449
Peso da carga	19000	19000
Distância	861	861
Consumo	8,13	8,13
Tempo de vida do veículo	750000	750000
<b>Emissões de gases de estufa</b>	11,16	57,36

Tabela 52: Resultados ICE em ciclos Regional VECTO, original

	ICE													
	B7 - EU mix 2017	CNG - fossil EU mix 2017	Bio metano comprimido - EU mix 2017	Bio metano comprimido - resíduos agrícolas (estrume)	Bio metano comprimido - resíduos municipais	e-Diesel via FT	H2 - NG	H2 – Verde Renovável	HVO - EU mix 2017	Bio metano líquido - EU mix 2017	Bio metano líquido - resíduos agrícolas (estrume)	Bio metano líquido - resíduos municipais	Bio metano líquido - resíduos de madeira	LNG - fossil EU mix 2017
<b>Fabrico</b>	3,25	3,76	3,76	3,76	3,76	3,25	4,92	4,92	3,25	3,65	3,65	3,65	3,65	3,65
<b>Combustível WTT</b>	13,94	10,24	-5,37	-88,12	8,14	8,64	72,96	7,89	20,74	-1,73	-84,48	11,77	21,65	14,18

<b>Combustível ITW menos CO2 reciclar</b>	50,68	47,66	1,21	1,21	1,21	3,23	3,68		3,23	1,17	1,17	1,17	1,17	48,38
								3,68						
<b>CO2 Reciclado</b>	3,42	1,65	48,49	48,49	48,49	48,95	0	0	48,97	47	47	47	47	0
Potência	400	340	340	340	340	400	410	410	400	340	340	340	340	340
Peso do veículo sem carga e com atrelado	15000	15020	15020	15020	15020	15000	15889	15889	15000	15020	15020	15020	15020	15020
Peso da carga	19000	19000	19000	19000	19000	19000	19000	19000	19000	19000	19000	19000	19000	19000
Distância	1359	1433	1433	1433	1433	1306	611	611	1306	1510	1510	1510	1510	1510
Consumo	36,8	34,9	34,9	34,9	34,9	38,28	11,46	11,46	38,28	33,12	33,12	33,12	33,12	33,12
Tempo de vida do veículo	750000	750000	750000	750000	750000	8E+06	750000	750000	750000	750000	750000	750000	750000	750000
<b>Emissões de gases de estufa</b>	67,86	61,66	-0,4	-83,15	13,11	15,12	81,56	16,49	27,22	3,09	-79,66	16,6	26,47	66,21

Urban delivery VECTO:

Tabela 53: Resultados BEV em ciclos Urban delivery VECTO, original

	<b>BEV</b>		
	533 kWh	800 kWh	1200 kWh
<b>Fabrico</b>	6,3	8,02	10,61
<b>Eletricidade</b>	41,89	33,11	33,95
Potência do motor	350	350	350
Peso do veículo sem carga e com atrelado	16221	17554	19554
Peso da carga	19000	19000	19000
Distância	185	351	514
Consumo	244,9	193,59	198,47
Tempo de vida do veículo	750000	750000	750000
<b>Emissões de gases de estufa</b>	48,19	41,14	44,56

Tabela 54: Resultados FCEV em ciclos Urban delivery VECTO, original

	<b>FCEV</b>	
	H2 – Verde Renovável	H2 - NG
<b>Fabrico</b>	5,56	5,56
<b>Combustível WTT</b>	6,98	64,52
Potência da Célula de Combustível	225	225
Potência do Motor	350	350
Peso do veículo sem carga e com atrelado	15449	15449
Peso da carga	19000	19000
Distância	691	691
Consumo	10,13	10,13
Tempo de vida do veículo	750000	750000

<b>Emissões de gases de estufa</b>	12,54	70,08
------------------------------------	-------	-------

*Tabela 55: Resultados ICE em ciclos Urban delivery VECTO, original*

	<b>ICE</b>													
	B7 - EU mix 2017	CNG - fossil EU mix 2017	Bio metano comprimid o - EU mix 2017	Bio metano comprimid o - resíduos agrícolas (estrume)	Bio metano comprimid o - resíduos municipais	e- Dieste l via FT	H2 - NG	H2 – Verde Renovável	HVO - EU mix 2017	Bio metan o líquido - EU mix 2017	Bio metano líquido - resíduos agrícolas (estrume )	Bio metano líquido - resíduos municipai s	Bio metano líquido - resíduo s de madeir a	LNG - fossil EU mix 2017
<b>Fabrico</b>	3,25	3,76	3,76	3,76	3,76	3,25	4,92	4,92	3,25	3,65	3,65	3,65	3,65	3,65
<b>Combustível TTW</b>	26,44	18,95	-9,94	-163,1	15,06	16,39	133,05	14,38	39,34	-3,2	-156,4	21,79	40,07	26,25
<b>Combustível TTW menos CO2 reciclar</b>	96,12	88,21	2,24	2,24	2,24	6,13	6,64	6,64	6,13	2,17	2,17	2,17	2,17	89,55

<b>CO2 Reciclado</b>	6,49	3,05	89,76	89,76	89,76	92,84	0	0	92,89	86,99	86,99	86,99	86,99	0
Potência	400	340	340	340	340	400	410	410	400	340	340	340	340	340
Peso do veículo sem carga e com atrelado	15000	15020	15020	15020	15020	15000	15889	15889	15000 0	15020	15020	15020	15020	15020
Peso da carga	19000	19000	19000	19000	19000	19000	19000	19000	19000 0	19000	19000	19000	19000	19000
Distância	716	774	774	774	774	689	335	335	689	816	816	816	816	816
Consumo	69,8	64,6	64,6	64,6	64,6	72,6	20,89	20,89	72,6	61,31	61,31	61,31	61,31	61,31

Tempo de vida do veículo	750000	750000	750000	750000	750000	8E+06	750000	750000	750000	750000	750000	750000	750000	750000
<b>Emissões de gases de estufa</b>	125,81	110,92	-3,93	-157,1	21,07	25,77	144,61	25,94	48,72	2,62	-150,6	27,62	45,9	119,45

## Cargas

Referência:

*Tabela 56: Resultados BEV carga de referência, original*

	<b>BEV</b>		
	533 kWh	800 kWh	1200 kWh
<b>Fabrico</b>	6,3	8,02	10,61
<b>Eletricidade</b>	26,5	24,57	25,17
Potência do motor	350	350	350
Peso do veículo sem carga e com atrelado	16221	17554	19554
Peso da carga	19000	19000	19000
Distância	292	473	693
Consumo	154,91	143,65	147,15
Tempo de vida do veículo	750000	750000	750000
<b>Emissões de gases de estufa</b>	32,8	32,6	35,78

*Tabela 57: Resultados FCEV carga de referência, original*

	<b>FCEV</b>	
	H2 – Verde Renovável	H2 - NG
<b>Fabrico</b>	5,56	5,56
<b>Combustível WTT</b>	6,76	51,03
Potência da Célula de Combustível	225	225
Potência do Motor	350	350
Peso do veículo sem carga e com atrelado	15449	15449
Peso da carga	19000	19000
Distância	873	873
Consumo	8,01	8,01

Tempo de vida do veículo	750000	750000
Emissões de gases de estufa	12,33	56,59

Tabela 58: Resultados ICE carga de referência, original

	ICE													
	B7 - EU mix 2017	CNG - fossil EU mix 2017	Bio metano comprimid o - EU mix 2017	Bio metano comprimid o - resíduos agrícolas (estrupe)	Bio metano comprimid o - resíduos municipais	e- Diesel via FT	H2 NG	H2 Verde Renováv el	HVO - EU mix 2017	Bio metan o líquido - EU mix 2017	Bio metano líquido - resíduos agrícola s (estrupe )	Bio metano líquido - resíduos municipai s	Bio metano líquido - resíduo s de madeira	LNG - fossil EU mix 2017
<b>Fabrico</b>	3,25	3,76	3,76	3,76	3,76	3,25	4,92	4,92	3,25	3,65	3,65	3,65	3,65	3,65
<b>Combustív el WTT</b>	11,63	8,62	-4,52	-74,23	6,85	7,21	61,31	7,31	17,3	-1,46	-71,17	9,92	18,24	11,94
<b>Combustív el TTW menos CO2 reciclar</b>	42,28	40,15	1,02	1,02	1,02	2,7	3,13	3,14	2,7	0,99	0,99	0,99	0,99	40,76
<b>CO2 Reciclado</b>	2,85	1,39	40,85	40,85	40,85	40,83	0	0	40,86	39,59	39,59	39,59	39,59	0
Potência	400	340	340	340	340	400	410	410	400	340	340	340	340	340
Peso do veículo sem carga e com atrelado	15000	15020	15020	15020	15020	15000	15889	15889	15000 0	15020	15020	15020	15020	15020
Peso da carga	19000	19000	19000	19000	19000	19000	19000	19000	19000 0	19000	19000	19000	19000	19000
Distância	1629	1701	1701	1701	1701	1566	727	727	1566	1792	1792	1792	1792	1792
Consumo	30,7	29,4	29,4	29,4	29,4	31,93	9,63	9,63	31,93	27,9	27,9	27,9	27,9	27,9

Tempo de vida do veículo	750000	750000	750000	750000	750000	750000	750000	750000	750000	750000	750000	750000	750000	750000
<b>Emissões de gases de estufa</b>	57,15	52,53	0,26	-69,45	11,64	13,15	69,36	15,38	23,25	3,18	-66,53	14,56	22,88	56,35

Baixas:

*Tabela 59: Resultados BEV carga baixa, original*

	BEV		
	533 kWh	800 kWh	1200 kWh
<b>Fabrico</b>	46,02	58,64	77,54
<b>Eletricidade</b>	142,06	138,46	142,59
Potência do motor	350	350	350
Peso do veículo sem carga e com atrelado	16221	17554	19554
Peso da carga	2600	2600	2600
Distância	399	614	894
Consumo	113,65	110,77	114,07
Tempo de vida do veículo	750000	750000	750000
<b>Emissões de gases de estufa</b>	188,09	197,1	220,13

*Tabela 60: Resultados FCEV carga baixa, original*

	FCEV	
	H2 – Verde Renovável	H2 - NG
<b>Fabrico</b>	40,66	40,66
<b>Combustível WTT</b>	28,6	264,55
Potência da Célula de Combustível	225	225

Potência do Motor	350	350
Peso do veículo sem carga e com atrelado	15449	15449
Peso da carga	2600	2600
Distância	1231	1231
Consumo	5,69	5,69
Tempo de vida do veículo	750000	750000
<b>Emissões de gases de estufa</b>	69,26	305,2

Tabela 61: Resultados ICE carga baixa, original

	ICE													
	B7 - EU mix 2017	CNG - fossil EU mix 2017	Bio metano comprimido - EU mix 2017	Bio metano comprimido - resíduos agrícolas (estrume)	Bio metano comprimido - resíduos municipais	e-Diesel via FT	H2 - NG	H2 – Verde Renovável	HVO - EU mix 2017	Bio metano líquido - EU mix 2017	Bio metano líquido - resíduos agrícolas (estrume)	Bio metano líquido - resíduos municipais	Bio metano líquido - resíduos de madeira	LNG - fossil EU mix 2017
<b>Fabrico</b>	23,72	27,49	27,49	27,49	27,49	23,72	35,98	35,98	23,72	26,66	26,66	26,66	26,66	26,66

<b>Combustív el WTT</b>	62,02	47,38	-24,84	-407,8	37,65	38,44	340,53	36,81	92,26	-8,01	-391	54,49	100,19	223,88
<b>Combustív el TTW menos CO2 reciclar</b>	225,42	220,53	5,61	5,61	5,61	14,37	16,14	16,14	14,38	5,44	5,44	5,44	5,44	223,88
<b>CO2 Reciclado</b>	15,22	7,62	224,4	224,4	224,4	217,7 3	0	0	217,84	217,47	217,47	217,47	217,47	0
Potência	400	340	340	340	340	400	410	410	400	340	340	340	340	340
Peso do veículo sem carga e com atrelado	15000	15020	15020	15020	15020	15000	15889	15889	15000 0	15020	15020	15020	15020	15020

Peso da carga	2600	2600	2600	2600	2600	2600	2600	2600	2600	2600	2600	2600	2600	2600
Distância	2232	2262	2262	2262	2262	2146	957	957	2146	2384	2384	2384	2384	2384
Consumo	22,4	22,1	22,1	22,1	22,1	23,3	7,32	7,32	23,3	20,97	20,97	20,97	20,97	20,97
Tempo de vida do veículo	75000 0	75000 0	750000	750000	750000	8E+06	75000 0	750000	75000 0	75000 0	750000	750000	750000	75000 0
<b>Emissões de gases de estufa</b>	311,15	295,4	8,25	-374,7	70,75	76,53	392,63	88,93	130,36	24,09	-358,9	86,59	132,28	316,16

Altas:

Tabela 62: Resultados BEV carga alta, original

	<b>BEV</b>		
	533 kWh	800 kWh	1200 kWh
<b>Fabrico</b>	4,3	5,78	8,3
<b>Eletricidade</b>	20,69	19,15	20,73
Potência do motor	350	350	350
Peso do veículo sem carga e com atrelado	16221	17554	19554
Peso da carga	27800	26400	24300
Distância	256	437	658
Consumo	176,97	155,55	155,55
Tempo de vida do veículo	750000	750000	750000
<b>Emissões de gases de estufa</b>	24,99	24,92	29,03

Tabela 63: Resultados FCEV carga alta, original

	<b>FCEV</b>	
	H2 – Verde Renovável	H2 -NG
<b>Fabrico</b>	3,64	3,64
<b>Combustível WTT</b>	4,31	39,84
Potência da Célula de Combustível	225	225
Potência do Motor	350	350
Peso do veículo sem carga e com atrelado	15449	15449
Peso da carga	29000	29000
Distância	9,55	9,55
Consumo	9,55	9,55
Tempo de vida do veículo	750000	750000

<b>Emissões de gases de estufa</b>	7,95	43,48
------------------------------------	------	-------

Tabela 64: Resultados ICE carga alta, original

	ICE													
	B7 - EU mix 2017	CNG - fossil EU mix 2017	Bio metano comprimido - EU mix 2017	Bio metano comprimido - resíduos agrícolas (estrume)	Bio metano comprimido - resíduos municipais	e-Diesel via FT	H2 - NG	H2 – Verde Renovável	HVO - EU mix 2017	Bio metano líquido - EU mix 2017	Bio metano líquido - resíduos agrícolas (estrume)	Bio metano líquido - resíduos municipais	Bio metano líquido - resíduos de madeira	LNG - fossil EU mix 2017
<b>Fabrico</b>	2,13	2,46	2,46	2,46	2,46	2,13	3,23	3,23	2,13	2,39	2,39	2,39	2,39	2,39
<b>Combustível WTT</b>	8,85	6,5	-3,41	-55,96	5,17	5,48	46,08	4,98	13,16	-1,1	-53,65	7,48	13,75	9

<b>Combustív el TTW menos CO2 reciclar</b>	32,16	30,26	0,77	0,77	0,77	2,05	2,39		2,05	0,75	0,75	0,75	0,75	30,72
								2,39						
<b>CO2 Reciclado</b>	2,17	1,05	30,8	30,8	30,8	31,06	0	0	31,08	29,84	29,84	29,84	29,84	0
Potência	400	340	340	340	340	400	410	410	400	340	340	340	340	340
Peso do veículo sem carga e com atrelado	15000	15020	15020	15020	15020	15000	15889	15889	15000 0	15020	15020	15020	15020	15020
Peso da carga	29000	29000	29000	29000	29000	29000	29000	29000	29000	29000	29000	29000	29000	29000

Distância	1403	1478	1478	1478	1478	1349	634	634	1349	1557	1557	1557	1557	1557
Consumo	35,65	33,83	33,83	33,83	33,83	37,08	11,05	11,05	37,08	32,11	32,11	32,11	32,11	32,11
Tempo de vida do veículo	750000	750000	750000	750000	750000	750000	750000	750000	750000	750000	750000	750000	750000	750000
<b>Emissões de gases de estufa</b>	43,14	39,23	-0,18	-53,73	8,4	9,66	51,7	10,6	17,34	2,04	-50,52	10,61	16,89	42,12





*Esta página foi intencionalmente deixada em branco*