



**Estudo sobre a utilização de combustíveis
avançados no rendimento e emissões de veículos
com motores de ignição por compressão**

Mestrado em Engenharia Automóvel

Diogo Ferreira Silva

Leiria, setembro de 2023



Estudo sobre a utilização de combustíveis avançados no rendimento e emissões de veículos com motores de ignição por compressão

Mestrado em Engenharia Automóvel

Diogo Ferreira Silva

Projeto Automóvel de Mestrado realizado sob a orientação do Professor Doutor Luís Manuel Ventura Serrano da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Politécnico de Leiria e coorientação Professor Doutor João Francisco Romeiro da Fonseca Pereira do da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Politécnico de Leiria.

Leiria, setembro de 2023

Originalidade e Direitos de Autor

O presente Projeto Automóvel é original, elaborado unicamente para este fim, tendo sido devidamente citados todos os autores cujos estudos e publicações contribuíram para o elaborar.

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição de que seja mencionado o Autor e feita referência ao ciclo de estudos no âmbito do qual o mesmo foi realizado, a saber, Curso de Mestrado em Engenharia Automóvel, no ano letivo 2022/2023, da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria, Portugal, e, bem assim, à data das provas públicas que visaram a avaliação destes trabalhos.

Resumo

A necessidade de encontrar alternativas que possibilitem a descarbonização do setor dos transportes tem promovido o desenvolvimento de outras soluções energeticamente sustentáveis, sendo os combustíveis alternativos uma dessas alternativas. O presente trabalho tem como objetivo a análise da utilização real de biodiesel em dois casos de estudos diferentes. No caso de estudo A, foi utilizado biodiesel puro (B100) em veículos e equipamentos presentes numa base aérea, tendo sido monitorizado o consumo de combustível com B7 e B100. Paralelamente, foram realizados teste às emissões de gases de escape de dois veículos e dois equipamentos e testes em laboratório a um veículo, com ambos os combustíveis. Na frota de veículos e equipamentos, foi obtido um aumento do consumo de cerca de 1% ao utilizar o biodiesel. Nos veículos e equipamentos em que foram analisados os gases de escape ocorreu um aumento médio da emissão de CO em 33% e uma diminuição do NO_x em 35%. As emissões de CO₂ provenientes do sistema de escape ficaram inalteradas após a utilização do biodiesel. Nos testes em laboratório, foi visível um ligeiro aumento da prestação do veículo, em regimes mais altos. O mesmo não seria expectável, sendo prevista uma ligeira diminuição. Considerando o teste de consumo, realizando de acordo com o ciclo WLTP, a utilização de B100 correspondeu a um aumento médio de 3,2% no consumo mássico de combustível. Analisando o consumo volumétrico por distância percorrida (l/100km) ocorreu uma ligeira diminuição na ordem de 2%. No caso de estudo B, ocorreu a utilização de B30 e B50 em três viaturas pesadas de mercadorias. Com estas, foi aferido o consumo de combustível, as emissões de gases de escape e análises ao óleo lubrificante. Ao utilizar o B30, comparativamente com a utilização de B7, o consumo de combustível aumentou cerca de 2%. Já com B50, ocorreu um aumento superior de cerca de 3,6%. Estes valores foram mais reduzidos que o expectável tendo em consideração o menor poder calorífico do biodiesel. Para as emissões de gases de escape, globalmente, não é possível correlacionar o que se sucedeu a cada composto químico com o aumento da incorporação de biodiesel. O O₂ é considerado com composto inalterado, independentemente do teor de biodiesel, uma vez que a sua variação foi muito reduzida. Já para o NO_x, ocorreu uma diminuição deste composto com a mesma magnitude em ambos os combustíveis de cerca de 13%. Os valores de emissões de CO₂ variaram ligeiramente. Se existiu uma ligeira diminuição de 3% a utilizar B30, a mesma não foi verificada ao utilizar B50, tendo a sua emissão aumentado 4%. Das análises às amostras de óleo conclui-se que nenhuma viatura

possuía contaminantes externos no óleo. Para os contaminantes metálicos, a viatura IX foi até excluída do estudo devido a elevada concentração de ferro e alumínio presentes, antes da inicialização da utilização de B30 e B50. Assim sendo, considera-se que a origem desta contaminação não estará relacionada com o biodiesel. Para a viatura SC não foi registado nenhum valor preocupante para os contaminantes metálicos. Por último, para a viatura TG, a presença de ferro e alumínio foi aumentando ao longo do tempo do estudo, ultrapassando mesmo os limites considerados críticos. No entanto, não é inequívoco que a origem desta subida estivesse relacionada com o biodiesel, já que a mesma foi alvo de uma intervenção mecânica antes do início do estudo, podendo estes contaminantes serem originados por este processo de reparação. Nos indicadores de estado, apenas a viatura SC apresentou um nível alarmante no TBN. Não é claro que o mesmo tenha sido decorrente do aumento do teor biodiesel, visto que ocorreu de uma descida abrupta no indicador. Adicionalmente, não é visível o mesmo comportamento noutros veículos. É assim concluído que a utilização de biodiesel não terá contribuído para a degradação do óleo lubrificante para o desgaste anormal dos componentes internos do motor.

Palavras-chave: biodiesel, análise de óleos lubrificantes dos motores, consumo de combustível, emissão de gases de escape.

Abstract

The need to find alternatives to decarbonize the transport sector has led to the development of other sustainable energy solutions, and alternative fuels are one of these alternatives. This work aims to analyse the actual use of biodiesel in two different case studies. In case study A, pure biodiesel (B100) was used in vehicles and equipment at an air base, and fuel consumption with B7 and B100 was monitored. At the same time, exhaust emissions tests were carried out on two vehicles and two pieces of equipment, and laboratory tests were executed on one vehicle using both fuels. In the fleet of vehicles and equipment, an increase in consumption of around 1% was obtained when using biodiesel. In the vehicles and equipment in which the exhaust gases were analysed, there was an average increase in CO emissions of 33% and a decrease in NO_x of 35%. CO₂ emissions from the exhaust system remained unchanged after using biodiesel. In laboratory tests, a slight increase in vehicle performance was visible at higher engine speeds. The same was not to be expected, with a slight decrease predicted. Considering the consumption test, carried out according to the WLTP cycle, the use of B100 corresponded to an average increase of 3.2% in mass fuel consumption. Looking at volumetric consumption per distance travelled (l/100km), there was a slight decrease of around 2%. In case study B, B30 and B50 were used in three heavy goods vehicles. Fuel consumption, exhaust emissions and lubricating oil analyses were executed on these vehicles. When using B30 compared to B7, fuel consumption increased by around 2%. With B50, there was a greater increase of around 3,6%. These figures were lower than expected given the lower calorific value of biodiesel. For exhaust gas emissions, it is not possible to correlate what happened to each chemical compound with the increase in the incorporation of biodiesel. O₂ is considered an unchanged compound, regardless of the biodiesel content, since its variation was very small. As for NO_x, there was a decrease in this compound of the same magnitude in both fuels of around 13%. CO₂ emissions varied slightly. While there was a slight decrease of 3% when using B30, this was not the case when using B50, with emissions increasing by 4%.

The analysis of the oil samples showed that none of the vehicles had any external contaminants in the oil. As far as metallic contaminants are concerned, vehicle IX was even excluded from the study due to the high concentration of iron and aluminium present before the use of B30 and B50 began. It is therefore considered that the origin of this contamination is not related to biodiesel. No worrying values for metallic contaminants were recorded for

the SC vehicle. Finally, for the TG vehicle, the presence of iron and aluminium increased over the time of the study, even exceeding the limits considered critical. However, it is not unequivocal that the origin of this increase was related to biodiesel, as it had undergone mechanical intervention before the start of the study, and these contaminants may have been caused by this repair process. In terms of condition indicators, only the SC car showed an alarming level of TBN. It is not clear that this was due to the increase in biodiesel content, as there was an abrupt drop in the indicator. In addition, the same behaviour is not visible in other vehicles. It can therefore be concluded that the use of biodiesel did not contribute to the degradation of the lubricating oil or the abnormal wear of the engine's internal components.

Keywords: biodiesel, analysis of engine lubricating oils, fuel consumption, exhaust gas emissions

Índice

Originalidade e Direitos de Autor	iii
Resumo	iv
Abstract	vi
Listas de Gráficos	xi
Lista de Figuras	xiv
Lista de tabelas	xvi
Lista de siglas e acrónimos.....	xviii
1. Introdução.....	1
1.1. Objetivos gerais	3
1.2. Organização do trabalho	4
2. Estado da arte	6
2.1. Licenças de emissão de gases com efeito de estufa nas empresas	6
2.2. Licenças de emissão de gases com efeito de estufa nos veículos pesados	7
2.2.1. Definição de objetivos e metodologia para a redução da emissão de CO ₂	8
2.2.2. Período de referência	9
2.2.3. Resultados obtidos para 2019-2020.....	12
2.3. Combustíveis alternativos ao diesel e gasolina	14
2.3.1. Gás natural (GNL e GNC).....	14
2.3.2. Hidrogénio	16
2.3.3. Biodiesel	20
3. Metodologia.....	36
3.1. Caso de estudo A	36
3.1.1. Monitorização do consumo de combustível	36
3.1.2. Medição das emissões de gases de escape.....	39
3.1.3. Teste de potência e consumo em laboratório.....	41

3.2. Caso de estudo B	44
3.2.1. Monitorização do consumo de combustível.....	47
3.2.2. Medição das emissões de gases de escape	48
3.2.3. Análise ao óleo lubrificante	48
4. Apresentação e Discussão dos resultados	52
4.1. Caso de estudo A	52
4.1.1. Monitorização do consumo de combustível.....	52
4.1.2. Medição das emissões de gases de escape	55
4.1.3. Teste laboratorial de potência	65
4.1.4. Teste laboratorial de consumo – Ciclo WLTP.....	69
4.2. Caso de estudo B	72
4.2.1. Monitorização do consumo de combustível.....	72
4.2.2. Medição das emissões de gases de escape	76
4.2.3. Análise ao óleo lubrificante	88
4.2.4. Utilização do B30 e B50	91
5. Conclusões	92
5.1. Caso de estudo A	92
5.1.1. Monitorização do consumo de combustível.....	92
5.1.2. Medição das emissões de gases de escape	92
5.1.3. Teste laboratorial de potência	93
5.1.4. Teste laboratorial de consumo	93
5.2. Caso de estudo B	93
5.2.1. Monitorização do consumo de combustível.....	94
5.2.2. Medição das emissões de gases de escape	94
5.2.3. Análise ao óleo lubrificante	94
5.2.4. Utilização do B30 e B50	95
5.3. Considerações finais	95
5.4. Sugestões de trabalho futuro	96
6. Referências	97

Anexos..... 102

Listas de Gráficos

Gráfico 1: Média do consumo dos equipamentos.....	53
Gráfico 2: Diferença percentual nos consumos dos equipamentos.	53
Gráfico 3: Média do consumo de combustível dos veículos (“*” o consumo destes veículos deve ser multiplicado por um fator de 10).....	54
Gráfico 4: Diferença percentual dos consumos médios por veículo.....	54
Gráfico 5: Emissões médias de O ₂ por veículo.	57
Gráfico 6: Emissões médias de CO por veículo.	57
Gráfico 7: Emissões médias de NO _x por veículo.....	58
Gráfico 8: Emissões médias de CO ₂ por veículo.....	58
Gráfico 9: Emissões médias de O ₂ por equipamento.....	59
Gráfico 10: Emissões médias de CO por equipamento.	59
Gráfico 11: Emissões médias de NO _x por equipamento. A emissão de NO _x nos regimes assinalados por “*” deve ser multiplicada por um fator de 10.....	59
Gráfico 12: Emissões médias de CO ₂ por equipamento.	59
Gráfico 13: Diferença percentual na emissão de O ₂ por veículo.	60
Gráfico 14: Diferença percentual na emissão de CO por veículo.....	60
Gráfico 15: Diferença percentual na emissão de NO _x por veículo.	61
Gráfico 16: Diferença percentual na emissão de CO ₂ por veículo.	61
Gráfico 17: Diferença percentual na emissão de O ₂ por equipamento.	62
Gráfico 18: Diferença percentual na emissão de CO por equipamento.	62
Gráfico 19: Diferença percentual na emissão de NO _x por equipamento.	62
Gráfico 20: Diferença percentual na emissão de CO ₂ por equipamento.....	62
Gráfico 21: Diferenças na média global, para ambos os combustíveis, por espécie química.....	63
Gráfico 22: Gráfico de potência e binário obtidos.....	65
Gráfico 23: Diferença percentual obtida para a potência, para ambos os combustíveis.	66
Gráfico 24: Diferenças percentuais na potência normalizada, em ambas tipologias de teste.	68
Gráfico 25: Fluxo mássico médio obtido, por perfil de velocidades, para ambos os combustíveis...	69
Gráfico 26: Diferença percentual do fluxo mássico entre combustíveis, por perfil de velocidades. .	70

Gráfico 27: Consumo médio volumétrico de combustível, no ciclo WLTP.	71
Gráfico 28: Diferenças percentuais no consumo médio volumétrico de combustível, no ciclo WLTP.	71
Gráfico 29: Consumo médio das viaturas, por combustível.....	74
Gráfico 30: Diferenças percentuais das viaturas, por veículo.	75
Gráfico 31: Emissão de O ₂ para a viatura TG.	78
Gráfico 32: Emissão de CO para a viatura TG.....	78
Gráfico 33: Emissão de NO _x para a viatura TG.	78
Gráfico 34: Emissão de CO ₂ para a viatura TG.	78
Gráfico 35: Emissão de O ₂ para a viatura IX.	79
Gráfico 36: Emissão de CO para a viatura IX.....	79
Gráfico 37: Emissão de NO _x para a viatura IX.	79
Gráfico 38: Emissão de CO ₂ para a viatura IX.	79
Gráfico 39: Emissão de O ₂ para a viatura SC.	80
Gráfico 40: Emissão de CO para a viatura SC.	80
Gráfico 41: Emissão de NO _x para a viatura SC.....	80
Gráfico 42: Emissão de CO ₂ para a viatura SC.....	80
Gráfico 43: Diferença percentual na emissão de O ₂ para a viatura TG.....	82
Gráfico 44: Diferença percentual na emissão de CO para a viatura TG.	82
Gráfico 45: Diferença percentual na emissão de NO _x para a viatura TG.....	82
Gráfico 46: Diferença percentual na emissão de CO ₂ para a viatura TG.....	82
Gráfico 47: Diferença percentual na emissão de O ₂ para a viatura IX.....	83
Gráfico 48: Diferença percentual na emissão de CO para a viatura IX.....	83
Gráfico 49: Diferença percentual na emissão de NO _x para a viatura IX.....	83
Gráfico 50: Diferença percentual na emissão de CO ₂ para a viatura IX.	83
Gráfico 51: Diferença percentual na emissão de O ₂ para a viatura SC.	84
Gráfico 52: Diferença percentual na emissão de CO para a viatura SC.....	84
Gráfico 53: Diferença percentual na emissão de NO _x para a viatura SC.....	84
Gráfico 54: Diferença percentual na emissão de CO ₂ para a viatura SC.....	84
Gráfico 55: Diferença percentual das emissões, na média global, por espécie química.	85

Lista de Figuras

Figura 1: Evolução das emissões de CO ₂ na UE por sector, entre 1990 e 2019, retirado de (Parlamento Europeu, 2019).....	1
Figura 2: Distribuição das emissões de CO ₂ na UE por meio de transporte, em 2019, retirado de (Parlamento Europeu, 2019).	2
Figura 3: Percentagem de veículos pesados novos vendidos por subgrupo, no período de referência, adaptado de (Ragon & Rodríguez, 2021).	9
Figura 4: Venda de veículos por subgrupo, de cada marca, adaptado de (Ragon & Rodríguez, 2021).	11
Figura 5: Emissão de CO ₂ , por subgrupo e marca, comparativamente com a <i>baseline</i> , adaptado de (Ragon & Rodríguez, 2021).	12
Figura 6: Trajetória de redução de emissão de CO ₂ por marca, adaptado de (Ragon & Rodríguez, 2021).	13
Figura 7: Esquema representativo de um veículo a hidrogénio, com célula de combustível, adaptado de (Santos, 2022).....	20
Figura 8: Representação do ciclo de vida circular do biodiesel. Adaptado de (Hosseinzadeh-Bandbafha, 2022).	21
Figura 9: Esquema simplificado de um sistema de tratamento de gases, adaptado de (Granstrand, París, Nilsson, Regali, & Pettersson, 2020).	34
Figura 10: Esquema da metodologia utilizada no caso de estudo A.	36
Figura 11: Viatura autotanque, em estudo, com a matrícula AM-11.	40
Figura 12: Autocarro, em estudo, com a matrícula AM-12.	40
Figura 13: Torre de iluminação, em estudo, com a matrícula EE-04.	40
Figura 14: Turbina de arranque, em estudo, com a matrícula EE-08.	40
Figura 15: Esquema da instrumentação do veículo em banco de potência, adaptado de (Bastos, 2019).	42
Figura 16: Veículo escolhido para realizar os ensaios em dinamómetro.	44
Figura 17: Viatura "TG", em estudo	44
Figura 18: Viatura "IX", em estudo.	44
Figura 19: Viatura "SC", em estudo.	45
Figura 20: Cronograma de trabalho simplificado.....	46
Figura 21: Esquema da metodologia utilizada no caso de estudo B.	47
Figura 22: Amostra de óleo recolhida.	51

Figura 23: Procedimento de recolha de amostras de óleo, retirado de (Almeida, 2022), Parte – 1 .	102
Figura 24:Procedimento de recolha de amostras de óleo, retirado de (Almeida, 2022), Parte – 2..	103
Figura 25: Procedimento de recolha de amostras de óleo, retirado de (Almeida, 2022), Parte – 3 .	104
Figura 26: Procedimento de recolha de amostras de óleo, retirado de (Almeida, 2022), Parte - 4..	105

Lista de tabelas

Tabela 1: Descrição de cada subgrupo de veículo pesado alvo da redução de emissão de CO ₂ , adaptado de (Ragon & Rodríguez, 2021).	9
Tabela 2: Média da emissão de CO ₂ e consumo de combustível por subgrupo, adaptado de (Ragon & Rodríguez, 2021).....	10
Tabela 3: Propriedades do gás natural, gasolina e diesel, adaptado de (Tavares, 2019).	14
Tabela 4: Propriedades do hidrogénio, gasolina e diesel, adaptado de (Costa, 2019).....	17
Tabela 5: Comparação das propriedades entre o biodiesel (B100) e diesel rodoviário (B7).	25
Tabela 6: Viaturas selecionadas para o estudo.....	37
Tabela 7: Equipamentos selecionados para o estudo.	38
Tabela 8: Características da medição do analisador de gases, adaptado de (testo, s.d).....	41
Tabela 9: Características técnicas dos veículos em estudo.	45
Tabela 10: Origem das substâncias presentes na análise do óleo, adaptado de (Adam, 2018).	49
Tabela 11: Limites dos contaminantes e indicadores de estado de um óleo lubrificante, adaptado de (Oil Analysis Laboratories, s.d.).	50
Tabela 12: Consumo médio dos equipamentos.....	52
Tabela 13: Consumo médio dos veículos.....	53
Tabela 14: Emissões médias dos veículos a operar B7.	56
Tabela 15: Emissões médias dos equipamentos a operar B7.	56
Tabela 16: Emissões médias dos veículos a operar B100.	56
Tabela 17: Emissões médias dos equipamentos a operar com B100.	57
Tabela 18: Diferença percentual das emissões médias dos veículos.....	60
Tabela 19: Diferença percentual das emissões médias dos equipamentos.	61
Tabela 20: Diferenças na média global, para ambos os combustíveis, por espécie química.....	63
Tabela 21: Potência e binário máximo obtidos.	67
Tabela 22: Diferença percentual obtida para a potência e binário máximo.	67
Tabela 23: Potência obtida nos ensaios discretos, ao operar com B7 e com B100.	68
Tabela 24: Diferenças percentuais entre combustíveis na potência obtida (normalizada), nos dois testes realizados.	68
Tabela 25: Fluxos mássicos e diferenças percentuais obtidas no ciclo WLTP, para B7 e B100.....	69

Tabela 26: Consumos e diferenças percentuais obtidas no ciclo WLTP, para B7 e B100.	70
Tabela 27: Média do consumo para a viatura TG.....	73
Tabela 28: Média do consumo para a viatura IX.....	73
Tabela 29: Média do consumo para a viatura SC.	73
Tabela 30: Emissões médias dos veículos a operar com B7.....	76
Tabela 31: Emissões médias dos veículos a operar com B30.....	77
Tabela 32: Emissões médias dos veículos a operar com B50.....	77
Tabela 33: Diferenças percentuais das espécies químicas, por viatura e por combustível.	81
Tabela 34: Contaminantes metálicos presentes no óleo, por veículo e por combustível.	88
Tabela 35: Contaminantes presentes no óleo, por veículo e por combustível.	89
Tabela 36: Indicadores de estado do óleo, por veículo e por combustível.	90

Lista de siglas e acrónimos

CELE	Comércio Europeu de Licenças de Emissão
CEN	Comité Europeu de Normalização
CFPP	<i>Cold Filter Plugging Point</i>
DOC	<i>Diesel Oxidation Catalyst</i>
DPF	<i>Diesel Particulate Filter</i>
EGR	Recirculação de gases de exaustão
FAME	<i>Fatty Acid Methyl Esters</i>
GEE	Gases com Efeito de Estufa
GNC	Gás Natural Comprimido
GNL	Gás Natural Liquefeito
HVO	<i>Hydrotreated Vegetable Oil</i>
PEMS	<i>Portable Emission Measurement System</i>
SCR	<i>Selective Catalytic Reduction</i>
SOF	<i>Soluble Organic Fraction</i>
TBN	<i>Total Base Number</i>
UE	União Europeia
VECTO	<i>Vehicle Energy Consumption calculation TOol</i>
WLTP	<i>Worldwide harmonized Light-duty vehicles Test Procedure</i>
ZLEV	<i>Zero and Low Emission Vehicles</i>

1. Introdução

Atualmente, existe uma grande pressão por parte dos grandes líderes de todo o mundo, para diminuir a emissão de gases nocivos e de efeito de estufa, especialmente o CO₂. Já é conhecida a influência que estes gases têm no clima, aumentando a temperatura global do planeta, causando o degelo dos polos, aumentando a frequência com que existem fenómenos meteorológicos graves, secas, entre outros. Assim sendo, todos os setores têm feito esforços para reduzir a emissão de CO₂, com resultados positivos em todos estes, à exceção dos transportes. O mesmo pode ser comprovado na seguinte Figura 1, onde apenas o setor do transporte não sofreu um decréscimo na emissão de CO₂, na união europeia (UE), desde 1990.

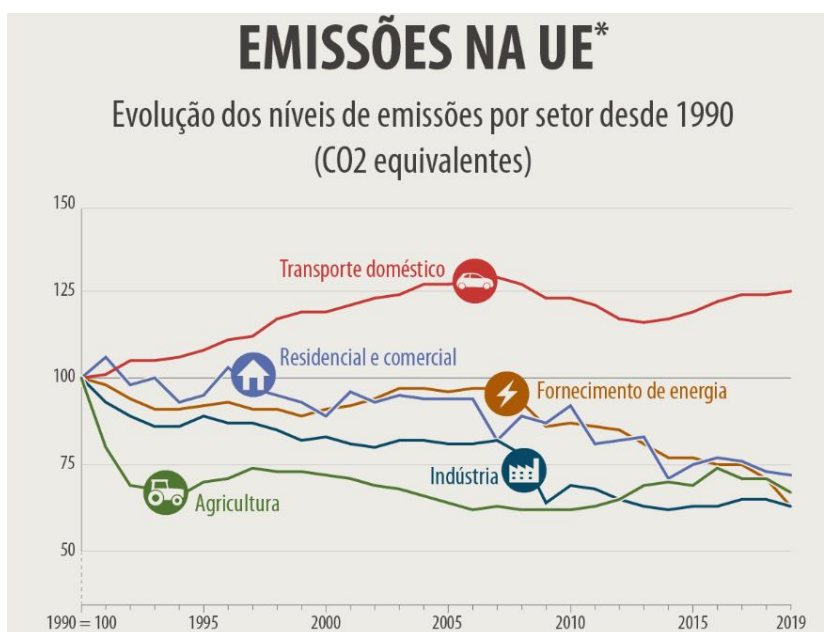


Figura 1: Evolução das emissões de CO₂ na UE por sector, entre 1990 e 2019, retirado de (Parlamento Europeu, 2019).

Considerando agora apenas o setor dos transportes, a emissão de CO₂ não é repartida de igual forma por todos os modos de transporte. Globalmente, no ano de 2019 na União Europeia, esta diferença encontra-se representada na Figura 2.

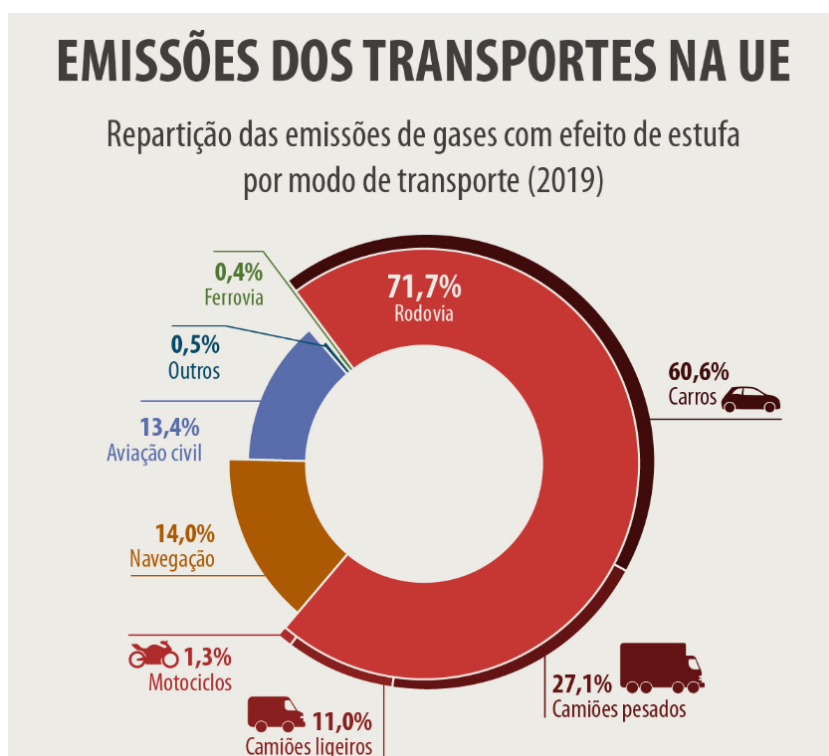


Figura 2: Distribuição das emissões de CO₂ na UE por meio de transporte, em 2019, retirado de (Parlamento Europeu, 2019).

Analisando o gráfico da Figura 2, é visível que a esmagadora maioria da emissão de CO₂ encontra-se no setor rodoviário. Apesar de não ser o setor mais preponderante, o setor dos camiões pesados ocupa ainda assim uma parte ainda notória. Nesta tipologia, para diminuir estes números, a união europeia, em 2019, decretou dois objetivos principais a curto prazo, diminuir o número de emissões nos pesados novos em 15% até 2025, e 30% até 2030. Neste sentido, existem uma série de alterações que têm sido implementadas nos veículos para reduzir a emissão destes gases. Mais recentemente, e após o forte desenvolvimento de sistemas de tratamento de gases e de injeção de combustível nos motores de Diesel, surgem tecnologias alternativas a estas que visam esta redução, como a utilização de combustíveis alternativos, de origem natural renovável e veículos elétricos. Uma destas alternativas é a utilização do biodiesel, como combustível, que contém propriedades idênticas ao diesel petrolífero, com algumas diferenças. No sentido da avaliação à sua utilização numa condição real de funcionamento surge a elaboração deste trabalho. O mesmo assenta em dois casos de estudo díspares, mas com um mesmo objetivo, analisar as consequências da utilização de um combustível alternativo e renovável ao diesel petrolífero. De seguida estão apresentados os objetivos gerais do trabalho e como os mesmos serão atingidos, e a sua organização.

1.1.Objetivos gerais

No sentido de avaliar a utilização de um combustível com uma maior composição de biodiesel num ambiente real, neste trabalho, são apresentados dois casos de estudo em que o mesmo se sucedeu. No primeiro, ocorreu a sua utilização num estado puro (apenas biodiesel) em veículos e equipamentos estacionários presentes em uma base aérea. Inicialmente foram aferidos o conjunto de veículos e equipamentos possíveis de utilizar o biodiesel, sem o prejuízo do normal funcionamento da base aérea. Posto isto, o estudo foi dividido em 3 partes, avaliação do efeito do biodiesel no consumo de combustível, na emissão de gases de escape e, em banco de potência no laboratório, avaliação da performance (potência e consumo de combustível), segundo testes normalizados. A avaliação do consumo de combustível iniciou-se ainda com os veículos e equipamentos a operar com diesel rodoviário (B7) que incorpora até 7% de biodiesel, como base de comparação para os resultados obtidos a operar com biodiesel puro. A avaliação dos gases de escape ocorreu com recurso a um analisador para o propósito, onde foram analisados dois veículos e dois equipamentos representativos dos restantes, quando operavam com cada combustível. Já em laboratório, foi escolhido um veículo representativo da frota para a execução de testes de potência e de consumo, considerando os parâmetros definidos através de testes normalizados. Todos estes permitiriam perceber qual a influência provocada pela utilização de biodiesel tendo em consideração três diferentes análises (consumo de combustível, emissões gases de escape e desempenho do motor).

No segundo caso estudo, utilizou-se o biodiesel numa frota de três veículos pesados, combinado com diesel petrolífero, com objetivo de culminar na utilização de B100 (apenas biodiesel). Numa primeira fase, seria utilizado B30, (correspondendo a uma proporção de 30% biodiesel - 70% diesel petrolífero), seguido de B50 e seria finalizado com a utilização de B100. Em cada um dos períodos considerados seriam monitorizados os consumos de combustível, e, analisados os gases de escape. Além disso, será aferida qual a influência que o biodiesel poderia ter nos componentes internos no motor. Neste sentido, seriam realizadas análises ao óleo lubrificante do motor, obtendo dados sobre contaminantes e indicadores de estado deste. Assim sendo, serão retiradas conclusões relativamente ao efeito do biodiesel no consumo de combustível, na emissão de gases de escape e dos eventuais efeitos nos componentes internos do motor.

1.2. Organização do trabalho

O presente trabalho encontra-se dividido nos seguintes capítulos:

Capítulo 1 (Introdução) – são apresentados o tema, os objetivos e a pertinência da realização do trabalho, com referência ao trabalho realizado em cada um dos casos de estudo.

Capítulo 2 (Estado da Arte) – neste capítulo, é efetuada uma abordagem ao estado da arte, iniciando na necessidade e no esforço realizado para a diminuição dos gases com efeito de estufa, mais concretamente no dióxido de carbono, sendo apresentadas as medidas a vigorar para a sua redução tanto nas construtoras de veículos pesados, como nas empresas que os utilizam. Posto isto, são apresentados combustíveis alternativos ao diesel petrolífero, como o gás natural, hidrogénio e biodiesel. Em todos estes são apresentadas as suas propriedades e a sua utilização. Esta análise será mais incisiva no biodiesel, uma vez que será este o alvo do estudo.

Capítulo 3 (Metodologia) – aqui será abordada a metodologia adotada em cada caso de estudo. No caso de estudo A, a mesma encontra-se dividida em 4 partes, consoante a tipologia de teste. Inicialmente são apresentados os veículos e equipamentos presentes no estudo para a análise de consumo de combustível. Do modo idêntico, são expostos os dois veículos e os dois equipamentos representativos, alvo de análise aos gases de escape, tal como o aparelho de medição utilizado e o procedimento realizado. De seguida são referidos os testes efetuados em laboratório, tanto o de potência como o de consumo normalizado e o banco de potência utilizado para o efeito. Para o caso de estudo B, é apresentada a frota utilizada para a monitorização do consumo e medição das emissões de gases de escape. Posto isto, é referenciado o procedimento associado a cada uma das ações anteriormente referidas. Por último, é demonstrada a metodologia referente à análise ao óleo lubrificante. Nesta, é introduzida quais os contaminantes e indicadores de estado considerados, tal como os seus níveis aceitáveis.

Capítulo 4 (Discussão dos resultados) – Neste capítulo, para ambos os casos de estudo, são apresentados os resultados obtidos para cada uma das tipologias de teste anteriormente referenciadas. Os mesmos são discutidos, com o intuito de apurar possíveis explicações das diferenças obtidas. Por último, para o caso de estudo B, são expostas as dificuldades experienciadas da utilização de um combustível com uma maior percentagem de biodiesel incorporada.

Estudo sobre a utilização de combustíveis avançados no rendimento e emissões de veículos com motores de ignição por compressão

Capítulo 5 (Conclusões) – apresentam-se as conclusões do estudo, identificando os aspetos mais relevantes retirados do uso do biodiesel, tal como as perspetivas de trabalho futuro.

2. Estado da arte

Neste capítulo será feita, inicialmente, referência ao sistema de emissão de licenças na emissão com efeito de estufa (GEE) nas empresas. De seguida, são apresentados os objetivos e o método de aplicação da redução de CO₂ para os construtores de veículos pesados. Seguidamente, será feita referência a possíveis combustíveis alternativos que permitam esta redução, como a utilização de gás natural, hidrogénio e biodiesel, explicitando as suas propriedades principais. Este último será alvo de uma análise mais detalhada, visto ser o principal foco de estudo neste trabalho.

2.1. Licenças de emissão de gases com efeito de estufa nas empresas

Das medidas existentes para a redução da emissão de GEE para as empresas, a UE ingressou num sistema de licença de emissão de carbono (CO₂), denominado de CELE (Comércio Europeu de Licenças de Emissão).

Resumidamente, o sistema é responsável pela alocação de um número determinado e limitado de quotas de emissão por país e indústria que não pode ser ultrapassado (*cap*), permitindo que os operadores económicos poluentes superavitários (titulares de licenças de emissão excedentárias ou não utilizadas) possam negociá-las ou vendê-las em mercado aos operadores subavitários (que delas necessitem para cobrir as respetivas emissões poluentes) ou aos demais investidores em geral (*trade*). Desta forma, nasceu assim um novo mercado – o mercado de licenças de emissão, ou “mercado do carbono”, cuja unidade equivale a uma tonelada de CO₂ emitida, cabendo aos próprios operadores económicos e demais agentes do mercado eleger qual a estratégia mais eficiente, seja para reduzir as suas emissões poluentes e incrementar os respetivos lucros vendendo as quotas excedentárias, seja para reduzir os seus custos de produção mediante a aquisição de novas quotas (Antunes, 2019).

A origem deste sistema remonta ao cumprimento das metas estabelecidas no protocolo de Quioto, tendo como objetivo a redução dos GEE, perspetivando uma diminuição da temperatura global do planeta. Foi posteriormente estendido, para atingir os objetivos do acordo de Paris de 2015, e da própria UE ao querer atingir a neutralidade carbónica em 2050. Para isso, criou um sistema de comércio de emissões, assente num princípio geral de limite e troca (*cap and trade*). O mesmo desenrolou-se em 4 fases. Na fase I, período entre 2005 e 2007, tratou-se de um processo de aprendizagem, através da prática, para preparar a fase seguinte. Nesta, apenas produtores de eletricidade e indústrias de

utilização intensiva de energia foram abrangidas. Consequentemente, grande parte das licenças foram atribuídas gratuitamente. Na fase II, entre 2008 e 2012, foi diminuído o número de licenças emitidas, das quais 90% eram a título gratuito. A sanção por incumprimento aumentou de 40 € para 100 € por tonelada de CO₂ emitida pelas empresas e foi permitida a compra de créditos internacionais em 1,4 mil milhões de toneladas de CO₂. Com a fase III, compreendida entre 2013 e 2020, o método de atribuição das licenças preferencial passou a ser o leilão, apesar da ainda existente entrega de títulos gratuitos. Adicionalmente, foram incrementados o número de setores e de gases com efeito de estufa abrangidos. Nesta fase estabeleceu-se uma redução anual linear de 1,74% sobre as emissões médias de cada ano da fase II (2008-2012), ou seja, a partir de 2013, o número total de licenças de emissão diminuiu a cada ano cerca de 38,26 milhões (passando de 2.084 milhões de licenças em 2013 para 1.816 milhões em 2020). Na fase IV, a decorrer entre 2021 e 2030 o percentual linear de redução anual previsto será de 2,2%. Mais ainda, prevê-se que a atribuição de licenças de emissão a título gratuito seja gradualmente suprimida para um máximo de 30% até 2026 e para 0% no final da fase 4, em 2030 (Conselho de Reguladores do MIBEL, 2020).

A emergência deste “mercado de carbono” cedo tornou as licenças de emissão num dos mais importantes ativos transacionáveis no contexto do comércio mundial: em 2018, o valor total do mercado de licenças de emissão atingiu 82 biliões de dólares. Embora originariamente concebidas para os operadores económicos poluentes, as licenças de emissão podem, na verdade, ser adquiridas, detidas e vendidas por qualquer pessoa singular ou coletiva: sucede, aliás que, a maioria dos agentes do mercado de carbono não são empresas industriais responsáveis por atividades poluentes, mas sim investidores singulares, coletivos, ou institucionais, intermediários financeiros, empresas de investimento, e até intermediários comerciais especializados (grandes empresas do setor elétrico) (Antunes, 2019).

2.2. Licenças de emissão de gases com efeito de estufa nos veículos pesados

Dada a importância deste tópico, o mesmo será subdividido para uma mais fácil compreensão, sendo definidos os objetivos e a metodologia utilizada, referindo a tipologia de veículos alvo de redução, a definição do período de referência e seus resultados por marca e tipologia de veículo e serão apresentados os resultados no primeiro período (2019-2020).

2.2.1. Definição de objetivos e metodologia para a redução da emissão de CO₂

Os objetivos de redução de emissões de CO₂ apenas estão definidos para 2025 e 2030, dando liberdade aos construtores sobre o desenvolvimento da tecnologia para atingir estes objetivos. Mesmo assim, é introduzido um sistema de crédito e débito para incentivar uma redução precoce das emissões de CO₂. Por cada fabricante, é definida uma trajetória de redução linear até atingir os objetivos de 2025 e 2030. Até 2025, tem em base os valores de referência e o objetivo de 2025, já até 2030, tem em conta a redução pretendida em 2025. São atribuídos créditos se os fabricantes ultrapassarem os objetivos de redução pretendidos num período anual considerado. Estes poderão ser utilizados mais tarde para cumprir com os objetivos estabelecidos. Os créditos acumulados entre 2020 e 2024 não poderão ser utilizados após 2025. Nesse ano, a conformidade é determinada avaliando a diferença entre a dívida e os créditos acumulados desde 2020. Ao iniciar 2026, caso exista dívida por parte de um fabricante, será aplicada uma penalidade financeira. Em 2030, a conformidade é determinada de modo idêntico a 2025. Paralelamente, são dados incentivos aos fabricantes para introduzirem veículos emissão “zero” (veículos elétricos), ou de baixas emissões (veículos que emitem menos metade das emissões iniciais consideradas) entre 2020-2024. A penalidade financeira será proporcional à média de CO₂ emitida em excesso por veículo, acumulando por cada veículo vendido. Cada grama de CO₂ por tonelada transportada e km realizado (gCO₂/t-km) será valorizada em 4250€ em 2025, sendo que este valor aumenta para 6800€ em 2030 (Jornal Oficial da União Europeia, 2019).

O cálculo das emissões de cada veículo é obtido utilizando uma ferramenta de simulação denominada *Vehicle Energy Consumption calculation TOol* (VECTO). Nesta, são introduzidas várias características do veículo, com o seu coeficiente aerodinâmico, massa, disposição de eixos, resistência ao rolamento e características técnicas do próprio motor e transmissão, como cilindrada, mapa de potência, relações de transmissão entre outros aspetos. Posto isto, é definido o trajeto e carga que o veículo irá percorrer, obtendo-se então a emissão de CO₂, por unidade de distância e carga transportada. (Jornal Oficial da União Europeia, 2019).

Como existe várias tipologias de veículos pesados justifica-se a sua distinção em subgrupos que reflitam o padrão de utilização mais habitual e as suas características técnicas específicas. Nesse sentido, são considerados 4 grandes grupos que serão alvo da aplicação dos objetivos de redução de emissões anteriormente referidas. Estes, são então subdivididos consoante o tipo de cabina (curta ou com cama) e potência. Adicionalmente, a cada subgrupo

Estudo sobre a utilização de combustíveis avançados no rendimento e emissões de veículos com motores de ignição por compressão

de veículo, são atribuídas uma referência de distância anual percorrida e uma carga média transportada representativas da sua normal utilização. Globalmente, todos os parâmetros anteriormente enumerados, encontram-se apresentados na seguinte Tabela 1, para cada subgrupo (Jornal Oficial da União Europeia, 2019).

Tabela 1: Descrição de cada subgrupo de veículo pesado alvo da redução de emissão de CO₂, adaptado de (Ragon & Rodríguez, 2021).

Descrição do grupo	Grupo	Subgrupo	Tipo de cabine	Potência do motor	Distância de referência anual (km)	Carga média transportada (toneladas)
Rígido, 4x2, > 16 t	4	4-UD	Todas	< 170 kW	60 000	2,65
		4-RD	Curta	≥ 170 kW	78 000	3,18
			Cama	≥ 170 kW, < 265 kW		
4-LH	Cama	≥ 265 kW	98 000	7,42		
Trator, 4x2, > 16 t	5	5-RD	Curta	Todas	78 000	10,26
			Cama	< 265 kW		
		5-LH	Cama	≥ 265 kW	116 000	13,84
Rígido, 6x2	9	9-RD	Curta	Todas	73 000	6,28
		9-LH	Cama		108 000	13,4
Trator, 6x2	10	10-RD	Curta	Todas	68 000	10,26
		10-LH	Cama		107 000	13,84

2.2.2. Período de referência

Para que exista uma diminuição percentual das emissões de CO₂ é necessário definir um período de referência. Este iniciou em 1 de julho de 2019 até 30 de junho de 2020. Neste período, a venda de veículos pesados novos não é uniforme por cada subclasse, assim sendo, no período de referência, foram vendidos 170365 veículos, distribuídos de acordo com a Figura 3:

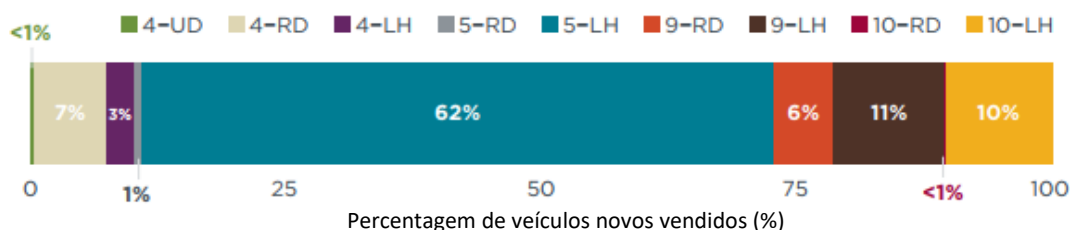


Figura 3: Percentagem de veículos pesados novos vendidos por subgrupo, no período de referência, adaptado de (Ragon & Rodríguez, 2021).

Analisando a Figura 3 conclui-se que o subgrupo 5-LH destaca-se dos restantes com uma predominância de vendas de 62%. Adicionalmente, é visível que os veículos de longa distância (apresentados com a denominação de LH) possuem uma grande conta de mercado de 86%.

A redução das emissões de CO₂ é realizada, para cada construtor, tendo por base valores comuns para todos, definidos em cada subgrupo. Nestes, a base é então considerada

como sendo a média dos veículos registados, de todos os fabricantes, à exceção dos veículos especializados (carros-grua, veículos de recolha de resíduos, entre outros). A contabilização de CO₂ é realizada tendo por base a quilometragem média anual percorrida a carga útil média transportada e o perfil de condução presumidas, para cada subgrupo. Assim sendo, a emissão de CO₂ é apresentada, em gramas, por tonelada transportada e km percorrido (gCO₂/t-km). Por consequência, genericamente, os veículos que carregam uma maior carga possuem uma menor emissão de CO₂. De igual modo, também o tipo de condução atribuída influencia as emissões. Estas encontram-se sumariadas na Tabela 2, por subgrupo, em gCO₂/t-km como em gCO₂/km e é também apresentado o consumo médio de combustível em l/100km (Ragon & Rodríguez, 2021).

Tabela 2: Média da emissão de CO₂ e consumo de combustível por subgrupo, adaptado de (Ragon & Rodríguez, 2021).

Subgrupo	Emissões de CO ₂ (gCO ₂ /t-km)	Emissões de CO ₂ (gCO ₂ /km)	Consumo de combustível (l/100km)
4-UD	307,2	814,1	31,1
4-RD	197,2	627,0	23,9
4-LH	106,0	786,4	30,0
5-RD	84,0	861,7	33,2
5-LH	56,6	783,5	30,0
9-RD	11,0	696,9	26,6
9-LH	65,2	873,3	33,4
10-RD	83,3	854,1	32,7
10-LH	58,3	806,5	30,8

Analisando estes resultados, é visível que as emissões emitidas variam entre 627 gCO₂/km, para a categoria 4-RD, até 873,3 gCO₂/km, para a categoria 9-LH. De igual modo, os consumos mínimo e máximo são obtidos nestes subgrupos, com 23,9 l/100km para a categoria 4-RD e 33,4 l/100km para a categoria 9-LH. Esta variação deve-se à diferente tipologia de veículo, diferente motorização, e, adicionalmente, diferentes cargas e perfis de condução associados.

No período de referência, a quota de pesados no mercado europeu era dominado por 7 marcas, sendo a que possui maior quota de mercado é a DAF (com 18,2%), seguida da Scania (com 17,9%), Mercedes-Benz (com 17,6%), Volvo (com 16,1%), MAN (com 14,8%), Renault (com 8,8%) e IVECO (com 6,2%). Estas marcas, totalizam 99,6% das vendas de veículos pesados na europa. No entanto, cada fabricante possui uma maior especificidade em segmentos específicos. Essa especificidade encontra-se demonstrada na

Estudo sobre a utilização de combustíveis avançados no rendimento e emissões de veículos com motores de ignição por compressão

seguinte Figura 4, onde é apresentada, para cada marca, a percentagem do número de vendas por subgrupo (Ragon & Rodríguez, 2021).

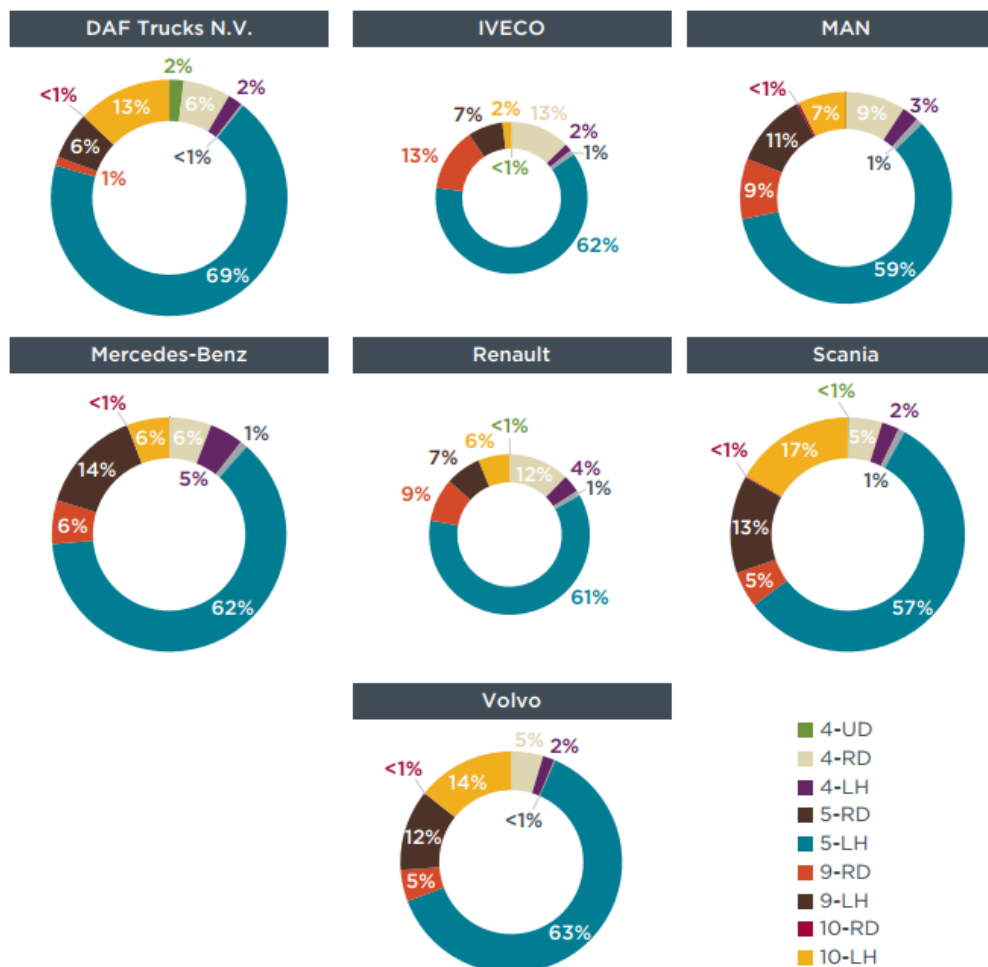


Figura 4: Venda de veículos por subgrupo, de cada marca, adaptado de (Ragon & Rodríguez, 2021).

Na generalidade, os subgrupos com maior predominância em todas as marcas são o 5-LH e o 10-LH. A DAF é a marca com maior quota nos veículos trator-reboque (82%), seguido da Volvo (77%) e da Scania (73%). Por outro lado, a IVECO, Renault e a MAN possuem maior relevância nas entregas regionais, com os subgrupos 4-RD, 5-RD e 9-RD, com uma quota total de 27%, 22% e 19%, respetivamente.

Num próximo passo, é necessário obter as emissões médias por subgrupo considerado para cada marca, no período de referência, visto que a redução imposta para 2025 e 2030 será realizada tendo em base estes valores iniciais. As médias das emissões encontram-se apresentadas na seguinte Figura 5, assim como o resultado de cada marca e o seu desfasamento com a média de cada subgrupo, em gráficos de barras. Neste, quando as barras possuem a cor laranja, o mesmo é indicativo que essa marca obteve o pior resultado entre as restantes, ou seja, uma maior emissão de CO₂ comparativamente com as restantes

Estudo sobre a utilização de combustíveis avançados no rendimento e emissões de veículos com motores de ignição por compressão

marcas. No sentido oposto, caso a barra seja de cor verde, o mesmo é indicativo que essa marca obteve o melhor resultado, ou seja, a menor emissão de CO₂ nesse subgrupo.

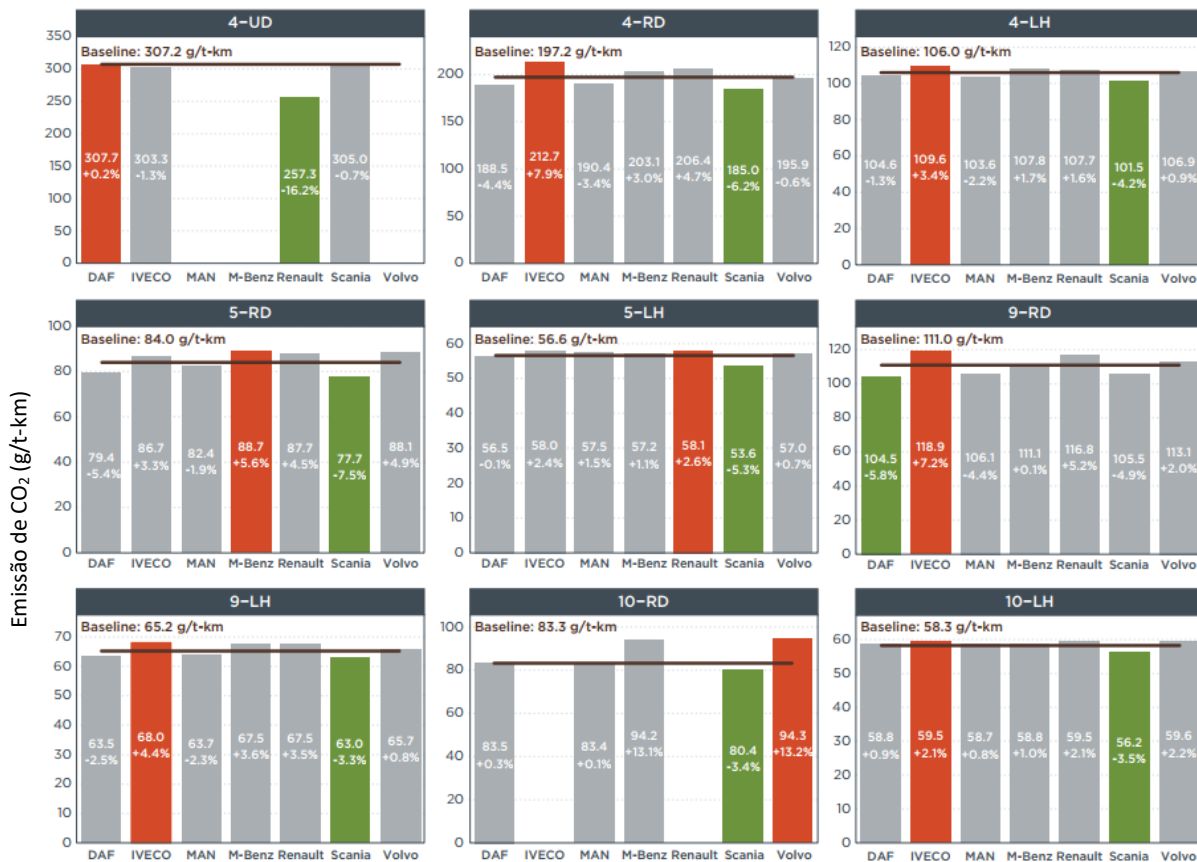


Figura 5: Emissão de CO₂, por subgrupo e marca, comparativamente com a *baseline*, adaptado de (Ragon & Rodríguez, 2021).

Analisando os resultados da Figura 5 é visível que as emissões dos veículos da Scania são notoriamente inferiores à média dos respetivos subgrupos (entre 0,7% no 4-UD e 7,5 no 5-RD). No sentido oposto, encontra-se a Renault e a IVECO que possuem resultados negativos em todas os subgrupos em que participam, à exceção do menos significativo da quota de mercado europeia, o 4-UD. Apesar da MAN apesentar resultados positivos na maioria dos subgrupos, no 5-LH e 10-LH apresenta resultados negativos, sendo que estes representam 66,3% da sua venda total de veículos. A redução de emissões proposta deve ser realizada como sendo uma média ponderada de todos subgrupos, consoante as vendas de cada fabricante, onde estes ficam em condições de compensar eventuais subdesempenhos em determinados subgrupos com sobredeempenhos noutros (Ragon & Rodríguez, 2021).

2.2.3. Resultados obtidos para 2019-2020

Na seguinte Figura 6 é mostrada a média específica de CO₂ emitido no primeiro período de reporte, assim como os objetivos de diminuição, considerando que a venda por subgrupo se mantém constante. Estas trajetórias de redução variam consoante a composição

Estudo sobre a utilização de combustíveis avançados no rendimento e emissões de veículos com motores de ignição por compressão

da frota de cada fabricante nos subgrupos anteriormente demonstrados. Também são apresentados os créditos acumulados no primeiro período.

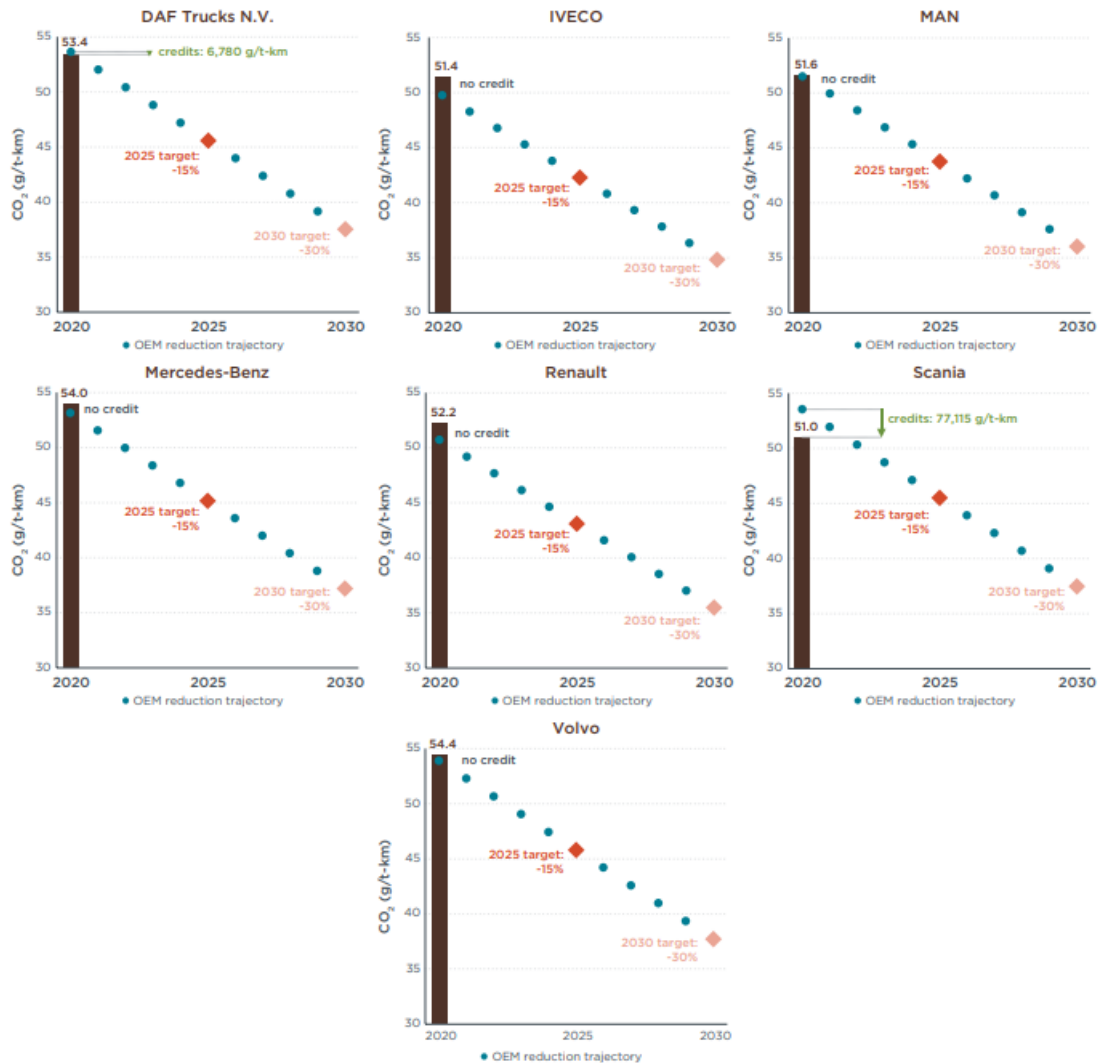


Figura 6: Trajetória de redução de emissão de CO₂ por marca, adaptado de (Ragon & Rodríguez, 2021).

Como o valor de CO₂ emitido, por fabricante, depende das suas vendas por subgrupos, a sua performance não deve ser comparada com a das restantes marcas, em vez disso, apenas deve ser comparada, individualmente, a redução de cada fabricante. Só a DAF e a Scania possuem créditos que poderão ser utilizados até 2025. O resultado da DAF deve-se à baixa emissão nos subgrupos urbanos e regionais, uma vez que, falhou nos subgrupos de grandes viagens (trator-reboque). A Scania obteve um resultado médio de 4,7% inferior ao objetivo no período de 2019-2020 acumulando 77 115 g/t-km. Assim sendo, e tendo em conta um custo de 4250 € por gCO₂/t-km, acumulou à data de 2020, 328 milhões de euros. Já a DAF, com uma redução de 0,4% face à média, acumulou 6 780 g/t-km, sendo estes avaliados em 29 milhões de euros (Ragon & Rodríguez, 2021).

2.3. Combustíveis alternativos ao diesel e gasolina

Com o intuito de diminuir as emissões de poluentes, outras alternativas surgiram ao uso dos motores diesel, a operar com diesel petrolífero. Nesse sentido, nos próximos subcapítulos, serão apresentadas a utilização de gás natural, tanto na sua forma líquida (GNL) como gasosa comprimida (GNC), do hidrogénio, e do biodiesel. Para cada uma das alternativas, serão referidas as suas características genéricas, as vantagens da sua utilização e os seus desafios, entre outros aspetos. Esta análise será mais pormenorizada para o biodiesel, já que foi este o alvo de estudo deste trabalho.

2.3.1. Gás natural (GNL e GNC)

A principal diferença entre o GNL e o GNC é o estado físico a que o combustível se encontra, visto que ambos derivam de gás natural. O GNL encontra-se num estado líquido, e o GNC num estado gasoso. Para liquefazer o gás natural, o mesmo terá de ser arrefecido até -162°C , à pressão atmosférica, sendo que, para se manter neste estado, terá de ser armazenado em tanques criogénicos. Já para o GNC, o mesmo encontra-se na fase gasosa, porém, encontra-se pressurizado a 250 bar, à temperatura ambiente (Smajla, Sedlar, Drljača, & Jukić, 2019). De modo a comparar este combustível com os convencionais petrolíferos, de seguida serão apresentadas algumas das suas propriedades.

Propriedades do combustível

Existe uma série de propriedades críticas no combustível que limitam, ou potenciam a sua utilização num motor de combustão interna. Neste sentido, serão apresentadas as seguintes propriedades na Tabela 3, limite de inflamabilidade, temperatura de autoignição, energia de ignição mínima, poder calorífico inferior e massa volúmica para o gás natural, gasolina e diesel.

Tabela 3: Propriedades do gás natural, gasolina e diesel, adaptado de (Tavares, 2019).

Propriedades	Gás natural	Gasolina	Diesel
Limite de inflamabilidade (% volúmica de ar)	5 – 15	1,4 – 7,6	0,6 – 5,5
Temperatura de autoignição ($^{\circ}\text{C}$)	450	300	230
Energia de ignição mínima (mJ)	0,26	0,22	0,22
Poder calorífico inferior (MJ/kg)	45	44 – 45	42,3 – 43,3
Massa volúmica (kg/m^3)	GNL – 466 GNC – 215	750	832

O limite de inflamabilidade indica a concentração de combustível necessária para que ocorra a combustão. Visto que este valor é superior no gás natural face aos restantes combustíveis analisados, será necessária uma maior concentração de combustível no ar para que ocorra a ignição. Adicionalmente, o gás natural possui uma maior temperatura de autoignição e uma maior energia de ignição mínima. Consequentemente, serão necessárias condições mais específicas tanto para o combustível autoinflamar-se, como para o processo de combustão despontar. O poder calorífico inferior define a quantidade de calor libertado quando um combustível entra em combustão, encontrando-se toda a água resultante do processo no estado gasoso. O gás natural possui um poder calorífico inferior equiparado aos combustíveis convencionais. A maior diferença apresentada para os restantes combustíveis é a massa volúmica. Esta propriedade, reflete a massa de combustível por unidade de volume. Mesmo que o gás natural se encontre no estado líquido, a sua massa volúmica é cerca de metade em comparação com os restantes. Consequentemente, e partindo do pressuposto que o rendimento do motor não seria alterado, para transportar a mesma massa de combustível, e, consequentemente, a mesma quantidade de energia (permitindo assim manter a autonomia do veículo) seria necessário, pelo menos, duplicar o volume do tanque de combustível. Este fator é crítico, especialmente em veículos pesados, uma vez que já possuem um volume elevado despendido no tanque de combustível. Adicionalmente, existir um problema no processo de injeção, dado que, caso o gás natural seja injetado no seu estado gasoso, serão necessários injetores com uma maior dimensão, quando comparado com os que operam com diesel, para injetar a mesma massa de combustível. Esta diferença dificulta a rápida atuação dos injetores impossibilitando múltiplas injeções, e um *spray* de injeção otimizado (Boretti, 2020).

Utilização do combustível

O gás natural é utilizado em motores de combustão interna que operam no ciclo Diesel (com ignição com compressão) e no ciclo Otto (ignição comandada por faísca). A aplicação de gás natural em motores de ignição por compressão torna-se bastante atrativa consequente do seu fator económico e da diminuição de emissões, mais concretamente CO₂ e partículas dada a sua baixa relação Carbono-Hidrogénio, e do facto de, à temperatura e pressão atmosférica, se encontrar em fase gasosa. Dado o elevado número de octano, e, consequentemente, baixo número de cetano, a utilização de gás natural como único combustível no ciclo Diesel é, praticamente, impossível. Assim sendo, uma pequena porção de diesel é injetado que despoletará o processo de combustão do gás natural. Este, pode ser

injetado antes ou após o diesel. Mesmo que seja injetado na sua fase líquida, o gás natural rapidamente vaporiza e mistura-se facilmente com o ar. A produção de partículas é assim praticamente anulada, existindo apenas decorrentes da combustão do diesel como chama piloto. Como a produção do *spray* de injeção não tem de minimizar tanto a produção de partículas como de NO_x, o injetor pode ser otimizado apenas para reduzir a produção de NO_x. O gás natural também possui um ligeiro maior poder calorífico inferior em termos mássicos, quando comparado com o diesel. Deste modo, é assegurada uma menor emissão de CO₂ para produzir a mesma energia mecânica comparativamente com motor a operar apenas com diesel, considerando que o rendimento não é alterado (Boretti, 2020). Construtores como a Scania, Volvo e Iveco afirmam que a utilização de LNG permite reduzir as emissões entre 15 e 20%, num veículo Euro VI. Adicionalmente, ocorre uma diminuição de 95% na emissão de partículas e uma redução entre 25 e 70% na emissão de NO_x. Os valores apresentados são apenas durante a utilização do veículo, ou seja, referentes à análise tanque-roda (Gnap & Dočkalik, 2021).

Na aplicação de um motor Otto, pelos motivos já anteriormente mencionados, também ocorrerá uma diminuição da emissão de CO₂ e de NO_x. Caso o veículo tenha sido projetado para a utilização deste combustível, não será expectável uma perda de potência, comparativamente com o mesmo modelo a gasolina, uma vez que este foi otimizado pelo fabricante para operar com o gás natural. Utilizando este combustível, o fabricante pode aumentar a sua taxa de compressão, devido ao maior índice de octano do gás natural, e otimizar o mapa de injeção e ignição para a sua utilização, por exemplo. O combustível ainda pode advir da decomposição de matéria orgânica proveniente de plantas e animais, sendo assim de origem renovável, reduzindo ainda mais a pegada carbónica. Uma das grandes desvantagens da sua utilização, em Portugal, é a falta de postos de abastecimento, existindo apenas 19 em todo o país, em 2019 (Tavares, 2019).

2.3.2. Hidrogénio

Uma outra tecnologia emergente no setor automóvel é a utilização de hidrogénio como fonte de energia. Este pode ser utilizado de dois modos distintos: numa célula de combustível e num motor de combustão interna. No entanto, as suas propriedades, a sua origem e outros fatores são algo a ter em atenção.

Propriedades:

De modo idêntico ao sucedido no gás natural, serão apresentadas as mesmas propriedades para o hidrogénio, comparativamente com a gasolina e diesel petrolífero na Tabela 4.

Tabela 4: Propriedades do hidrogénio, gasolina e diesel, adaptado de (Costa, 2019).

Propriedades	Hidrogénio	Gasolina	Diesel
Limite de inflamabilidade (% volúmica de ar)	4 – 75	1,4 – 7,6	0,6 – 5,5
Temperatura de autoignição (°C)	500	300	230
Energia de ignição mínima (mJ)	0,04	0,22	0,22
Poder calorífico inferior (MJ/kg)	120	44 – 45	42,3 – 43,3
Massa volúmica (kg/m ³)	Liquefeito – 70,8 Gasoso, a 700 bar – 30	750	832

O hidrogénio é um gás inodoro, incolor e insípido, não sendo conhecido nenhum odorante (como o que é introduzido no gás natural) possível de utilizar, sem danificar as pilhas de combustível. Dada à sua baixa emissividade, a chama do hidrogénio não é visível à luz do dia, sendo emitida uma luz pouco radiante na faixa do espectro visível, ao contrário de grande parte dos combustíveis fósseis utilizados. Esta característica torna o hidrogénio menos perigoso em caso de acidente, uma vez que a radiação transmitida é menor, mas torna-se mais difícil a sua deteção numa fase inicial. O hidrogénio apresenta um poder calorífico inferior de cerca de 120 MJ/kg, sendo este valor, praticamente, três vezes superior ao apresentado pela gasolina (44 MJ/kg), libertando assim muito mais energia por unidade de massa. Outra grande preocupação com o hidrogénio é a sua baixa energia de ignição de 0,04 mJ. Esta característica induz cuidados superiores sendo que, num motor de combustão interna, é um aspeto a ter atenção, uma vez que um ponto quente existente na câmara de combustão pode causar a ignição prematura do combustível. Outro aspeto que favorece este acontecimento é a larga amplitude de inflamabilidade numa grande variedade de misturas ar-combustível (4-75%). Por outro lado, este aspeto favorece a utilização de misturas pobres de combustível, originando uma reação de combustão mais completa, reduzindo assim a emissão de poluentes. O facto de possuir uma elevada temperatura de autoignição, permite o aumento da razão de compressão do motor, aumentando assim o rendimento do mesmo. Outro aspeto em consideração deste combustível é o seu elevado grau de difusão, ou seja, facilmente se dispersa pelos materiais ou sistemas presentes no ar. Se por um lado facilita a dispersão do combustível no ar, auxiliando a formação da mistura ar-combustível, por outro lado rapidamente se alastra em caso de fuga (Estêvão, 2008).

Por último, o fator mais preponderante na utilização do hidrogénio é a sua baixa massa volúmica que se traduz em problemas no seu armazenamento, uma vez que são necessários reservatórios com grandes volumes. De modo a aumentar esta, tipicamente, o hidrogénio pode ser comprimido ou liquefeito. Outras soluções existem, mas não serão abordadas, pelo facto de não serem utilizadas em veículos. Ambas as soluções levam a um gasto de energia para comprimir ao liquefazer o gás. Este gasto é bastante elevado, atingido valores que rondam os 25 a 30% do conteúdo energético do combustível, neste último caso, uma vez que é necessário arrefecer o combustível até uma temperatura de -253°C , à pressão atmosférica. Mesmo para uma compressão no estado gasoso a 350 bar, é consumida uma quantidade de energia de cerca de 5% do valor energético do combustível (Costa, 2019).

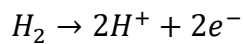
Origem

Dependendo da sua origem, o hidrogénio encontra-se dividido por cores. O hidrogénio cinzento deriva do processo de reformação por vapor. Para a sua formação, um combustível fóssil, como o gás natural, diesel ou carvão, é aquecido a alta temperatura para reagir com o vapor de água, produzindo o hidrogénio. Este processo é o mais poluente, libertando grandes quantidades de CO_2 para a atmosfera. O hidrogénio azul é formado de modo idêntico ao hidrogénio cinzento. No entanto, parte do CO_2 não é libertado para a atmosfera, é sim capturado e armazenado no solo. O hidrogénio verde é produzido através da eletrólise da água em equipamentos denominados de eletrolisadores. Neste processo, apenas é utilizada água e energia elétrica para dissociar a molécula de água, obtendo assim hidrogénio e oxigénio. Para que ocorra uma descarbonização total, a energia elétrica tem de provir de fontes puramente renováveis, como a eólica, solar e hídrica. O custo do hidrogénio aumenta desde o cinzento até ao verde (Iberdrola, 2023). Existem ainda outros processos de produção de hidrogénio, sem tanta relevância, como o hidrogénio turquesa (onde é utilizada a pirólise do metano e carbono sólido), hidrogénio amarelo (o processo de produção de hidrogénio é idêntico ao do verde, todavia, a energia elétrica utilizada deriva da existente da rede, possuindo fontes renováveis e não renováveis) e hidrogénio rosa (onde hidrogénio é produzido com recurso a energia nuclear, que, apesar de não existir libertação de CO_2 , é uma fonte energética não renovável) (axpo, 2023).

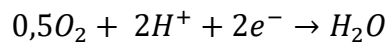
Utilização do combustível

A célula de combustível, de modo idêntica a uma bateria, possui um cátodo, um ânodo e um eletrólito. Consequentemente, existirá um agente oxidante (elemento químico

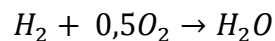
que aceita os elétrons resultantes da reação química) e um agente redutor (elemento químico que cede os elétrons) tal como aniões (iões carregados negativamente) e catiões (iões carregados positivamente). Para seu normal funcionamento, tipicamente, o hidrogénio é alimentado pelo ânodo enquanto o oxigénio é alimentado pelo cátodo. No ânodo, com recurso a um catalisador, ocorre a dissociação do hidrogénio molecular em dois catiões e dois elétrons, ocorrendo uma reação de oxidação, funcionando o hidrogénio como agente redutor. Resumidamente, a equação da reação química pode ser demonstrada do seguinte modo:



Os catiões formados vão então fluir pelo eletrólito até chegar ao cátodo. Já os elétrons, irão alimentar a carga (no caso automóvel, o motor elétrico ou a bateria do veículo). No cátodo ocorre a associação do hidrogénio iónico, do oxigénio e dos elétrons, formando água. Esta é então a reação de redução, sendo que, o agente oxidante é o oxigénio. A mesma encontra-se apresentada de seguida:



Globalmente, a reação final que ocorre é a seguinte:



De ressaltar que, da reação química apresentada, resulta também a libertação de energia térmica. Assim sendo, consoante a tecnologia utilizada pela célula de combustível, a transformação da energia química em energia elétrica tem um rendimento de 40 a 55%. Este rendimento pode ser aumentado caso seja aproveitada a porção de energia térmica libertada. As células de combustível diferem consoante a temperatura a que operam e o material que forma o eletrólito. Deste modo, poderão existir diferentes reações químicas. A utilização de células de combustível possui uma série de vantagens como a não emissão de CO₂ e emissões poluentes, o seu alto rendimento, a não emissão de ruído e a inexistência de partes móveis (Santos, 2022). Num veículo automóvel, esta tecnologia surge associada com um motor elétrico, que gerará a propulsão do veículo, uma bateria, que receberá energia proveniente das travagens generativas e, eventualmente, energia da rede pública, e um tanque de combustível. Adicionalmente, terá uma série de conversores elétricos para a utilização da energia. Resumidamente, um veículo com célula de combustível terá a seguinte configuração, representada na Figura 7.

Estudo sobre a utilização de combustíveis avançados no rendimento e emissões de veículos com motores de ignição por compressão

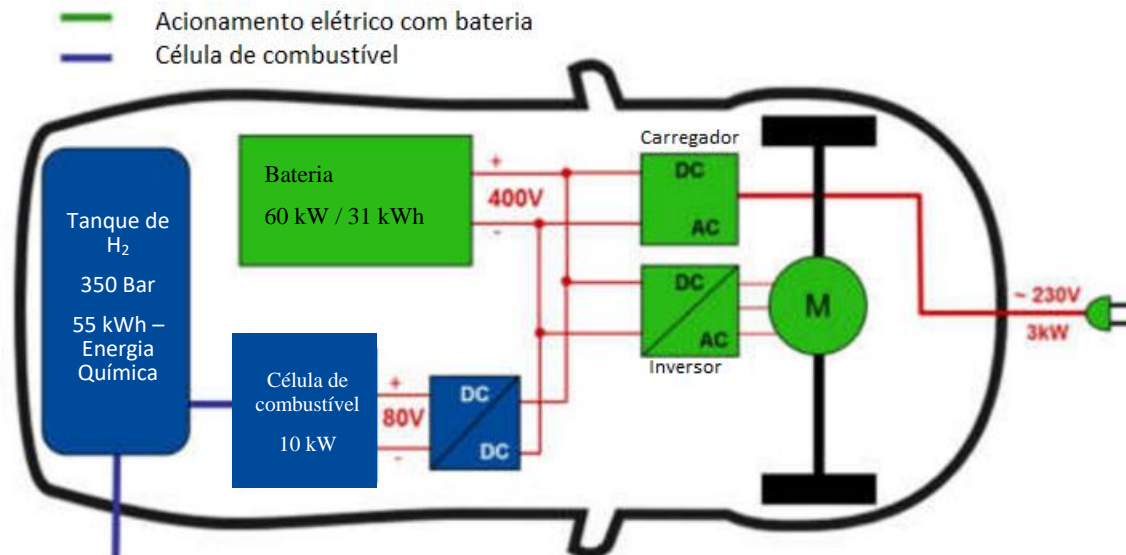
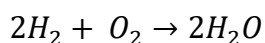


Figura 7: Esquema representativo de um veículo a hidrogénio, com célula de combustível, adaptado de (Santos, 2022).

Comparativamente com um veículo unicamente elétrico, e para a mesma autonomia, este sistema tem a vantagem de não possuir uma bateria com uma elevada massa visto que a densidade energética do hidrogénio é muito superior à das baterias existentes no mercado atual.

Um modo distinto de utilizar o hidrogénio como combustível é num motor de combustão interna. A ignição deste combustível pode ser comandada por uma vela de ignição (como no ciclo Otto) ou por compressão (como no ciclo Diesel). Teoricamente, a combustão do hidrogénio resultaria apenas em vapor de água, uma vez que, o combustível não possui qualquer carbono adicionado. A equação química geral da combustão do hidrogénio é a seguinte:



Assim sendo, emissão de CO₂ e HC é praticamente nula, resultando apenas da combustão de óleo lubrificante presente nas paredes do cilindro, por exemplo. Comparativamente com um motor a combustão interna a gasolina e a diesel, a emissão de NO_x também será inferior. A utilização generalizada deste combustível é possível num futuro próximo, existindo ainda problemas na sua aplicação num motor de combustão interna, no seu abastecimento nos veículos, na sua produção, entre outros (Costa, 2019).

2.3.3. Biodiesel

O biodiesel é um biocombustível produzido a partir de matéria orgânica de origem vegetal, como os óleos de sementes e grãos, ou animal, como a gordura. O mesmo deriva de fontes renováveis, ou seja, fontes consideradas inesgotáveis pela sua fácil reposição natural.

A grande vantagem da utilização deste tipo de combustível é alteração do ciclo de vida do combustível, passando este de linear (no caso do combustível fóssil) para circular (no caso do biocombustível). Ou seja, o combustível fóssil consumido não se transforma em novo combustível em tempo de vida útil, já o consumo de biocombustível, gerará a emissão de CO₂, que será utilizado pelas plantas no seu processo natural de fotossíntese. Na seguinte Figura 8 encontra-se representado o ciclo de vida do biodiesel, desde a produção do cereal e utilização do biocombustível, à produção do óleo vegetal, à formação do resíduo, ao seu transporte e à sua produção (ETIP Bioenergy, s.d.).



Figura 8: Representação do ciclo de vida circular do biodiesel. Adaptado de (Hosseinzadeh-Bandbafha, 2022).

Os vários tipos de matérias-primas utilizadas para a produção de bioenergia que se englobam no conceito de biomassa podem ser, segmentadas em dois grandes grupos, mediante a sua origem: culturas dedicadas e desperdícios ou resíduos. Esta distinção primordial permite identificar os biocombustíveis convencionais, intitulados de primeira geração, onde o biodiesel predominante na comercialização atual se insere, e os biocombustíveis avançados, também apelidados de segunda e terceira geração, onde se enquadra o HVO (*Hydrotreated Vegetable Oil*). Deste modo, biocombustíveis convencionais têm origem em culturas alimentares, como plantações de palma, colza, soja, beterraba e cereais, dedicadas para posterior transformação em óleos e amidos. Por sua vez, biocombustíveis avançados derivam de matérias-primas lignocelulósicas, ou seja, matérias-primas sem qualquer índole alimentar digerível pelo ser humano. Tal engloba resíduos, sejam eles urbanos, agrícolas, alimentares ou orgânicos, novas matérias-primas não alimentares, como plantas aquáticas, macroalgas e microalgas e matérias-primas oriundas

de terras marginais, por forma a não competir diretamente com culturas alimentares pelo usufruto de terras saudáveis e não causar as indesejadas mudanças indiretas do uso de solo (ETIP Bioenergy, s.d.).

Propriedades do combustível

O funcionamento do motor é dependente de propriedades presentes no combustível. Certas propriedades estão relacionadas com o desempenho do motor enquanto outras estão interligadas com o funcionamento mecânico de vários componentes associados a todo o sistema de injeção, sistema de escape e componentes internos no motor.

A norma EN 14214, emitida pelo CEN (Comité Europeu de Normalização), é uma norma estabelecida pela União Europeia e, conseqüentemente, adotada por Portugal, que estabelece as especificações exigidas para o combustível do tipo FAME (*Fatty Acid Methyl Esters*) aplicado a motores de ignição por compressão. Nesta norma a mistura entre biodiesel e diesel é denominada pela letra B. Associado à letra existe um número (por exemplo, B7). Este número indica a percentagem de biodiesel diluído no diesel petrolífero. Caso a mistura de combustível possua uma maior percentagem de biodiesel o número aumentará. Se for 100, como no presente estudo, apenas é utilizado biodiesel como combustível. Já o diesel petrolífero está abrangido pela norma EN590, norma esta que regulamenta os critérios de qualidade para combustíveis de motores de ignição por compressão. Assim sendo, uma mistura de combustível comercializável deve conter um biodiesel aprovado segundo a norma EN14214 e deve, por si, cumprir os parâmetros definidos na norma EN590 (Matias, 2015).

Das várias propriedades existentes do combustível destacou-se a massa volúmica, o poder calorífico, a viscosidade, a tensão superficial, o número de cetano, o teor máximo de água, a volatilidade, o índice de iodo, o teor de oxigénio e a lubricidade. As propriedades anteriormente referidas serão base para a comparação entre o biodiesel e diesel.

- A **massa volúmica** relaciona a massa do combustível com o volume que este ocupa, deste modo, quanto maior for este fator, maior a massa existente no mesmo volume e, conseqüentemente, maior a energia por litro. Assim sendo, e visto que o combustível é quantificado em volume, uma maior densidade origina uma maior economia de combustível. O biodiesel possui uma massa volúmica compreendida entre 873 e 883 kg/m³, enquanto o diesel petrolífero possui uma massa volúmica entre 820-845 kg/m³. Os valores apresentados são referentes a uma temperatura de 15 °C (Serrano L. M., 2012), (Prio, 2017).

- O **poder calorífico** relaciona a quantidade de energia libertada no processo de combustão por unidade de massa de combustível. O poder calorífico do diesel é cerca de 10 a 14% superior ao poder calórico do biodiesel (Lapuerta, Armas, & Rodríguez-Fernández, 2008).
- A **viscosidade** é a medida de resistência ao escoamento que um fluido oferece. Caso esta seja elevada, o cone de injeção diminui e converge num jato mais estreito e concentrado, originando assim uma pior atomização. Uma pior atomização leva a pior funcionamento do motor. Além disso, a maior resistência ao movimento do fluido gera uma maior dificuldade de operação da bomba de combustível. Segundo a aprovação europeia EN14214:2008, a viscosidade do diesel a 40°C tem de estar compreendida entre 3,5 e 5 mm²/s. A viscosidade do biodiesel é de aproximadamente, 4 a 5 mm²/s, nas mesmas condições. Em situações de temperaturas muito baixas, derivado do aumento da viscosidade, a circulação correta do combustível é comprometida, implicando problemas no arranque e funcionamento inicial do motor (Serrano L. M., 2012).
- A **tensão superficial** do combustível reflete a interação da fronteira do combustível com outra substância, essencialmente o ar (na câmara de explosão) e componentes metálicos (no sistema de injeção). Deste modo, esta propriedade toma extrema importância no *spray* da injeção do combustível. Uma tensão superficial elevada dificulta o processo de atomização, uma vez que, as gotas de combustível pulverizadas, serão maiores. O biodiesel possui uma tensão superficial superior ao diesel petrolífero e, conseqüentemente, uma pior atomização (Serrano L. M., 2012).
- O **número de cetano** indica a facilidade com que o combustível entra em auto inflamação. Quanto maior for este valor, mais fácil e rapidamente o combustível entrará em ignição quando injetado. Esta característica é crítica nos motores por compressão, uma vez que, é imprescindível que o combustível rapidamente se autoinflame logo após a injeção. Na norma anteriormente referida (EN14214:2008) é definido um valor mínimo para o número de cetano de 51. O número de cetano do biodiesel depende da matéria-prima base de formação do combustível, no entanto, uma grande percentagem destes ficam acima deste limite referido (Serrano L. M., 2012).
- Segunda a norma EN 14214:2008+A1:2009, o **teor máximo de água** existente no combustível é de 500 mg por kg de combustível. Quando dissolvida, esta água não

apresenta prejuízos para o motor e seus constituintes. No entanto, especialmente quando armazenada, a água tende-se a acumular nas paredes e no fundo do reservatório. Esta água, denominada de *free water*, causa problemas no sistema de injeção e em componentes internos no motor. O biodiesel é especialmente vulnerável a este aspeto dado o seu carácter higroscópico, incorporando água que se encontra ao seu redor (Pinto, 2016).

- A **volatilidade** do combustível indica a que temperatura este, quando sujeito a um aquecimento, vaporiza. Este é um parâmetro importante no combustível, uma vez que, antes da sua explosão, este necessita de transitar do estado líquido para o estado gasoso. A volatilidade do combustível é avaliada a partir da sua curva de destilação. O diesel petrolífero possui uma maior volatilidade que o biocombustível, ou seja, inicia a sua vaporização a uma temperatura inferior (Serrano L. M., 2012).
- O **índice de iodo** indica o grau de insaturação do combustível. O combustível petrolífero, como apenas apresenta na sua constituição ligações covalentes simples, é um combustível totalmente saturado, apresentando assim um índice de iodo de 0. O biocombustível, dependente, da sua origem, pode possuir ligações duplas ou mesmo triplas. Deste modo, o grau de insaturação aumenta. Consequentemente, o combustível possui uma maior tendência de reagir, polimerizar e oxidar, aumentando a tendência para a degradação dos componentes internos do motor (Pinto, 2016)
- O **teor em oxigénio** indica a quantidade equivalente deste composto presente no combustível. No combustível petrolífero, este teor é nulo, já no biocombustível, este pode ter um valor compreendido entre 10 e 12% de oxigénio (Ozsezen & Canakci, 2011)
- A **lubricidade** do combustível representa a capacidade de este conseguir lubrificar componentes mecânicos. Esta propriedade é importante, dado que, existem componentes do sistema de injeção lubrificados pelo combustível. O biodiesel apresenta uma maior lubricidade que o diesel petrolífero. Deste modo, componentes críticos como a agulha dos injetores terão uma melhor lubrificação (Serrano L. M., 2012).
- O **ponto limite de filtrabilidade**, muitas vezes identificada pela sigla CFPP, revela a temperatura mínima à qual a formação de cristais não induz uma colmatção do filtro, ou seja, a temperatura mínima à qual o combustível se encontra líquido o suficiente para ser filtrável, sob determinadas condições. Para definir o valor de

CFPP, um determinado volume de combustível é sujeito a um processo de arrefecimento rápido e constante e, por ação de vácuo, forçado a passar por um filtro. O valor fixa-se no valor mínimo de temperatura onde ainda é possível permitir fazer esta filtragem num intervalo de tempo estipulado. Naturalmente, todos estes parâmetros e equipamentos são padronizados e normalizados, por forma a desenvolver um teste universal e possibilitar a comparação entre combustíveis. Os valores CFPP exigidos variam mediante as condições climáticas do país ou região onde o combustível opera. O biodiesel revela uma tendência notoriamente superior ao diesel para a formação de cristais a baixas temperaturas, adquirindo valores de CFPP também superiores. Tal poderá ser problemático em climas mais frios, como já referenciado, uma vez que a presença de cristais no combustível provoca o entupimento dos filtros, do sistema de injeção e, conseqüentemente, afeta o próprio desempenho do motor. A solução poderá passar por incluir aditivos no combustível que contrariem esta tendência ou reduzir a percentagem de biodiesel na mistura de combustível (Santana, 2020).

Resumidamente, as diferenças entre o biodiesel e o diesel rodoviário encontram apresentadas na seguinte tabela.

Tabela 5: Comparação das propriedades entre o biodiesel (B100) e diesel rodoviário (B7).

Propriedade	B7	B100
Massa volúmica (kg/m³, a 15°C)	832	881,7
Viscosidade (mm²/s, a 40°C)	3	4,6
Poder calorífico (MJ/kg)	42	37
Índice de cetano	52,5	56,2
Teor de oxigénio (%)	0	10-12
CFPP (°C)	-15	-1

Com estas diferenças nas propriedades, surgem novos aspetos a serem considerados na utilização de biodiesel num motor, como no armazenamento do combustível, no *spray* de injeção e na sua combustão. As diferenças no desempenho, emissões e consumo de biodiesel serão alvo de avaliação detalhada de seguida.

Devido à sua maior tendência a oxidar, quando armazenado, e comparado com o diesel, o biodiesel sofre alterações das suas propriedades físicas e químicas, mais especificamente ao nível da sua viscosidade e da sua acidez. Esta oxidação está relacionada

com o contacto do combustível com oxigénio. Adicionalmente, desta interação é promovida a criação de sedimentos. Estes são críticos em todo o sistema de injeção, uma vez que estas substâncias são obstrutivas para filtros e injetores. A acidificação, anteriormente referida, danifica elastómetros e plásticos, e corrói os metais existentes no sistema de injeção. Este é um novo desafio a ultrapassar inerente à utilização do biodiesel, uma vez que, não era um aspeto crítico no diesel (Serrano L. M., 2012).

As diferenças com a injeção são principalmente relacionadas com a viscosidade, tensão superficial e incorporação de oxigénio no combustível. A razão da mistura ar-combustível (fator λ) é limitada, especialmente em zonas ricas, devido à incorporação de oxigénio no próprio combustível. O diâmetro de gota médio também será superior, quando comparado com o diesel petrolífero, levando a uma maior penetração da injeção. No entanto, este aumento não é tão grande quanto expectável, uma vez que, derivado das propriedades anteriormente referidas, a pressão de injeção também irá aumentar, o que favorece a atomização (Serrano L. M., 2012).

A combustão num motor de ignição por compressão é algo difícil de avaliar atendendo à complexidade deste processo, que depende de muitos fatores, não só do próprio combustível, como da geometria dos componentes internos do motor (câmara de combustão, por exemplo). Tipicamente, é subdividida em 3 partes, uma inicial onde ainda não se iniciou a combustão, o combustível está-se a misturar com o ar e ocorre a evaporação do mesmo (designado de atraso de ignição), numa segunda fase ocorre uma combustão rápida e violenta, designada de combustão de pré-mistura, que apresenta o maior incremento de pressão e uma maior taxa de libertação de energia e, por último, encontra-se a fase difusiva, onde o combustível injetado reage mais facilmente com ar, derivado da presença da chama, da elevada pressão e temperatura, provocando uma combustão mais controlada. Esta última fase depende, essencialmente, do caudal de combustível injetado. As diferenças na combustão provenientes da utilização do biocombustível são fundamentalmente a redução do atraso de ignição e o aumento da temperatura máxima obtida. A diminuição do atraso de ignição está relacionada com o número de cetano superior no biodiesel e com a própria estrutura molecular deste, que, em temperatura elevadas, mais facilmente quebra as suas ligações levando a que ocorra uma volatilização mais rápida. Para avaliação da temperatura máxima obtida, foi avaliada a combustão do biodiesel em ambiente aberto. De ressaltar que não é o mesmo ambiente que é encontrado num motor de combustão interna. Nesse estudo foi concluído que, apesar do menor poder calorífico do biodiesel, derivado do seu teor de

oxigénio e do seu grau de saturação, a temperatura máxima atingida foi superior (Serrano L. M., 2012).

Consequências no funcionamento do veículo, aquando da utilização de biodiesel

Todas as diferenças nas propriedades do biodiesel anteriormente referidas provocam consequências díspares no funcionamento do motor. No entanto, não tendo sido desenvolvido para trabalhar com uma maior percentagem de biocombustível, não será expectável o aumento da eficiência, comparativamente quando opera com diesel petrolífero. As emissões de poluentes são alvo de grande importância pelas consequências que produzem no planeta Terra, como o aquecimento global. Os poluentes mais preponderantes emitidos pelos motores de ignição por compressão são a fuligem e os óxidos de azoto (NO_x). Porém, devido aos seus efeitos no planeta, também será avaliada a influência na emissão de monóxido de carbono (CO) e de hidrocarbonetos (HC). Num posto de vista mais operacional, será analisada as diferenças no consumo, o efeito no sistema de tratamento de gases e na performance do motor tal como possíveis avarias e alterações necessárias de realizar para que um veículo possa utilizar biodiesel.

Emissões de monóxido de Carbono (CO)

O monóxido de carbono é um gás inodoro e incolor que é extremamente tóxico quando inalado, uma vez que, já na corrente sanguínea, combina-se com a hemoglobina evitando a absorção de oxigénio. Consequentemente, o ser vivo acaba por falecer por asfixia. Apenas uma percentagem de 0,25% por volume de ar pode causar a morte em apenas 30 minutos (Atkins, 2009)

A emissão de CO num motor de ignição por compressão resulta de uma combustão incompleta. Esta deriva da falta de oxigénio na câmara de combustão ou com a falta de tempo para que a reação de combustão seja concluída. Assim sendo, a sua formação ocorre em misturas ricas e/ou rotações elevadas. A produção deste poluente não é uma preocupação maior nos motores de ignição por compressão porque estes operam sempre em mistura pobre. Caso exista nestes motores pode derivar da dissociação do CO_2 , na combustão de pré-mistura, ou na fase de difusão pela existência de zonas locais de misturas ricas, especialmente em tempos de permanência na câmara de combustão muito curtos. Já em cargas baixas, a produção de CO poderá ocorrer uma vez que, a injeção de combustível não potencia a sua mistura com o ar, não se obtendo reações de combustão completas. Além

disso a baixa temperatura existente não favorece a oxidação do CO em CO₂ (Coelho & Costa, 2007).

Utilizando o biocombustível e, especialmente graças à incorporação do oxigênio, ocorrem reações de combustão mais completas. Deste modo, a emissão de CO pode ser reduzida em 30%, dependendo da tecnologia do motor, das condições atmosféricas e do sistema de controlo de emissões instalado. Outro fator que pode levar à diminuição da emissão de CO é o maior número de cetano do biodiesel, que diminui a possibilidade de existência de mistura rica (Aggarwal, 2007). Dependendo do autor, esta diferença não é consensual, existindo investigadores que indiquem uma maior diminuição na emissão de CO, outros que não existiu qualquer diminuição, existindo até um aumento da emissão deste poluente. As diferenças existentes podem estar relacionadas com os tipos de ensaio realizado, dependendo da carga aplicada ao motor (Serrano L. M., 2012).

Emissões de hidrocarbonetos (HC)

Os hidrocarbonetos abrangem uma grande quantidade de compostos orgânicos existentes nos gases de escape, desde cadeia linear saturados (alcanos) ou insaturados (alcenos e alcinos) a compostos aromáticos. A emissão destes compostos é um problema ambiental pela toxicidade apresentada, contribuindo para o efeito de estufa. Possuem um odor desagradável, provocando irritação, problemas respiratórios e podem apresentar efeitos cancerígenos (Dietsche & Klingebiel, 2007).

À semelhança da emissão de CO, a sua origem pode derivar de uma reação de combustão incompleta, sendo o combustível não queimado, ou parcialmente queimado, responsável por uma grande parte da emissão dos hidrocarbonetos. No entanto, a emissão destes pode derivar do óleo lubrificante, caso este chegue à câmara de explosão. Tipicamente, é relacionado com a má vedação dos segmentos no cilindro do motor, sendo representativo de alguma deficiência neste sistema. Nos motores diesel, a emissão de HC está relacionada com a mistura rica encontrada na ponta do injetor sendo mais crítica a cargas reduzidas ou ao ralenti (Martins, 2006).

A utilização de biodiesel promove uma diminuição na emissão de HC dada a existência de oxigênio no combustível e do elevado número de cetano que possui, originando uma combustão mais rápida, dissociando os hidrocarbonetos. Além disso, apesar de ser menos volátil que o diesel, o biodiesel possui uma temperatura final de destilação menor, conseqüentemente, mais facilmente vaporiza os compostos mais pesados. No entanto, consoante o ensaio realizado e o equipamento de medição utilizado, os resultados obtidos,

utilizando o biodiesel, podem apresentar um aumento das emissões de hidrocarbonetos (Serrano L. M., 2012).

Emissão de partículas

As partículas são especialmente perigosas para os seres vivos, dado que, sendo facilmente inaladas, estão associadas a um aumento do risco de existência de tumores e a ocorrência de doenças cardíacas e respiratórias (Atkins, 2009).

A emissão de partículas no motor Diesel deriva, maioritariamente, da combustão incompleta do combustível, apesar disso, outra fonte de uma pequena percentagem de partículas pode ser o óleo lubrificante. As partículas são tipicamente constituídas por elementos sólidos, sendo estes aglomerados de carbono seco (identificados por fuligem), SOF (*Soluble Organic Fraction*), sendo estes hidrocarbonetos pesados absorvidos ou condensados pelas partículas de carbono e ácido sulfúrico hidratado (SO_4). A quantidade de sulfatos presentes está associada à quantidade de enxofre contida no combustível utilizado (Martins, 2006). São normalmente associadas a chamas de difusão, onde estes compostos são formados nas zonas de mistura rica nas quais se registam elevadas temperaturas e escassez de oxigénio. Assim sendo, a fuligem vem interligada a motores de explosão por compressão, onde este tipo chama é utilizada (Coelho & Costa, 2007).

Usualmente, a utilização de biodiesel traduz-se numa diminuição do número de partículas emitida. Este facto está relacionado com a existência de oxigénio no combustível que, vai limitar a mistura nas zonas ricas, onde a formação de partículas é crítica, diminuindo o número de total de partículas produzidas. No entanto, esta diminuição não é consensual, existindo estudos em que, utilizando o biocombustível, existiu um aumento do número de partículas emitido. O que pode explicar este aumento é o pior funcionamento do injetor e, conseqüentemente, da atomização do combustível, derivado da elevada viscosidade do biodiesel (Ng, Ng, & Gan, 2009)

Emissão de óxidos de azoto (NO_x)

A produção de óxidos de azoto (NO_x) é obtida a partir da dissociação de azoto e posterior reação deste com o oxigénio. Este composto, facilmente reage com a água, formando ácidos nítricos e nitrosos que provocam chuvas ácidas, e diminuem a camada de ozono, contribuindo para o aquecimento global. Adicionalmente, são gases que provocam efeito de estufas e o *smog*. A diminuição da camada de ozono é provocada, principalmente, pela reação de oxidação do NO que, reagindo com o O_3 presente na estratosfera, formará

NO₂. Quando contacta com o ser humano, este composto é irritante e extremamente tóxico (Atkins, 2009).

Para a sua formação, nos motores de ignição por compressão, existem três mecanismos precursores, o mecanismo térmico, o mecanismo imediato e o mecanismo que utiliza o N₂O como intermédio. Para a formação do NO_x a partir do mecanismo térmico, como o nome sugere, são necessárias temperaturas elevadas, superiores a 1800K. Para além da forte dependência da temperatura, também o tempo de permanência nesta e a concentração local de oxigénio, são críticos para a formação dos óxidos de azoto. Este é o processo mais crítico na formação destes óxidos. No mecanismo imediato, o azoto molecular reage com radicais de hidrocarbonetos, formando NO nos gases de escape. Na última hipótese, ocorre a associação de um átomo de oxigénio à molécula de azoto (formado N₂O), recorrendo a outro elemento, normalmente o carbono ou um hidrocarboneto. Posto isto, ocorre a dissociação do composto anterior, na presença de oxigénio e hidrogénio, formando NO (Coelho & Costa, 2007).

Com o intuito de diminuir a emissão de NO_x emitido pelo motor de combustão foram introduzidos sistemas de recirculação de gases de escape na admissão (EGR) que diminuem a temperatura máxima atingida na câmara de combustão, reduzindo a emissão de NO_x, assim como sistemas de redução catalítica seletiva (SCR) que, com recurso ao *adblue* reduzem o NO_x em N₂ e H₂O.

Não é consensual, segundo vários autores, se a utilização do biodiesel se traduz num aumento ou numa diminuição das emissões de NO_x. A possível diminuição da emissão deste composto poderá estar relacionada com a diminuição da emissão de compostos aromáticos pela utilização do biodiesel, que se traduz numa diminuição das emissões de NO_x (Robert L. McCormick, 2002). No entanto, derivado do aumento da temperatura máxima atingida, utilizando o biodiesel e do próprio oxigénio introduzido pelo combustível, a produção de NO_x pode aumentar. A mudança do *spray*, pelas diferenças nas propriedades do combustível, também interfere com a emissão deste poluente. Todavia, a produção deste composto difere muito consoante o sistema de injeção, sobrealimentação e EGR utilizada, sendo bastante variável com a carga e rotação a que o motor está sujeito (Tat, 2003). Segundo a coletânea de bibliográfica de (O'Malley & Searle, 2021) sobre o efeito do biodiesel na emissão de HC, NO_x e partículas, será expectável um aumento médio da emissão de NO_x de 9%, ao utilizar B100.

Emissão de dióxido de carbono (CO₂)

A emissão de CO₂ está inerente à combustão de qualquer combustível que possua carbono na sua constituição, conseqüentemente, irá ocorrer tanto ao utilizar biodiesel como diesel petrolífero. Caso a combustão do combustível fosse completa e estequiométrica, os produtos de reação seriam apenas CO₂ e H₂O. Estaria também presente o N₂, no entanto, este não teria reagido com nenhum composto presente no momento do processo de combustão. A formação de CO₂ e H₂O apenas então da relação carbono-hidrogénio do combustível. Deste modo, como a estrutura química do biodiesel é diferente que a do diesel petrolífero, a relação anteriormente pode ser diferente, alterando a emissão de CO₂ (Gumus, Sayin, & Canakci, 2011).

No entanto, ao utilizar biodiesel, ocorre um aumento de oxigénio na combustão, oriundo da constituição molecular deste. Conseqüentemente, uma maior quantidade de oxigénio irá reagir com o carbono, no processo de combustão, sendo assim expectável uma formação mais elevada de CO₂. (Channapattana, Pawar, & Kamble, 2015)

Consumo e Desempenho do motor

Numa primeira análise, tendo em conta a menor quantidade de energia disponível por massa do biodiesel, comparativamente com o diesel, seria de esperar que o consumo aumentasse para fornecer a mesma quantidade de energia requerida pelo motor. Contudo, existem outras variáveis a ter em conta como a maior densidade do biodiesel que, sendo o consumo feito numa base volúmica, transporta assim uma maior massa; a existência de oxigénio no biodiesel, que afeta o rendimento térmico; a viscosidade, o índice cetano, entre outros fatores que influenciam o processo de libertação da energia no interior do cilindro (Serrano, 2012). O que é reportado em vários ensaios é o aumento do consumo de combustível, o que pode ser explicado principalmente pelo menor poder calorífico do biodiesel. Visto que, o poder calorífico deste é inferior ao do diesel petrolífero 10 a 14%, é expectável que o consumo de combustível, em massa, suba numa proporção idêntica [g/kWh] (Aggarwal, 2007). Se o consumo for feito numa base volúmica [l/km], e atendendo ao facto de o biodiesel ser mais denso 3 a 4% comparativamente com o diesel (Aggarwal, 2007), este apenas terá um aumento entre 5 a 10% no consumo específico. No entanto, existem estudos em que é referenciado uma manutenção do consumo, chegando até a existir uma diminuição deste (Serrano L. M., 2012).

Em estudos de natureza idêntica ao aqui apresentada, de utilização de uma maior percentagem de biodiesel numa condição real de funcionamento, nem sempre é encontrado um aumento de combustível ao utilizar uma maior percentagem de biodiesel neste. O estudo conduzido por (Shen, et al., 2018) utilizou quatro veículos de mercadorias, dois pesados e dois ligeiros. Estes, foram conduzidos em estrada, num percurso definido, onde foram medidas as emissões dos gases de escape com recurso a um sistema portátil de medição de emissões (PEMS- *Portable Emission Measurement System*), utilizando 5 misturas de diesel petrolífero e biodiesel, B0, B5, B20, B50 e B100. O consumo de combustível foi calculado, tendo por base as emissões de CO₂. Deste estudo conclui-se que, consoante o veículo, a utilização de B100 levou a um aumento entre 3% a 16%, para três viaturas. Numa, porém, ocorreu uma diminuição do consumo em 6%. Globalmente, com o aumento do teor de biodiesel, ocorreu também uma diminuição generalizada de todas as substâncias de gases de escape medidas no estudo (CO, HC, NO_x e partículas). Noutro estudo conduzido por (Serrano, Santana, Carvalho, & Correia, 2023) foi comparada a utilização de diesel rodoviário (B7) que fora substituído por B15. Para isso foram utilizadas duas frotas de veículos, uma composta por viaturas ligeiras, outra composta por viaturas pesadas. Em ambas as frotas, as diferenças obtidas para o consumo são insignificantes, sendo explicadas por outras variáveis externas. Não foi comprovado que o aumento do teor de biodiesel provocasse um aumento do consumo de combustível. Por último, em outro estudo (Serrano, Pereira, & Carvalho, 2021) foram examinadas várias misturas de biodiesel em um veículo pesado EURO VI de ciclo Diesel. Com o objetivo de preparar uma medição de consumo de combustível e uma análise de desempenho, foi desenvolvido um procedimento experimental baseado nos ciclos e processos de homologação de veículos pesados, em bancada de chassis, testando as seguintes amostras: B7, B15, B100 e HVO15. Os resultados de desempenho revelam que o combustível que apresentou maiores valores de potência foi o HVO15, seguido do B7, B15 e B100. Com o B100, a potência máxima diminuiu 4,5%, em comparação com o B7. No consumo de combustível, os valores mais baixos foram obtidos para B7 e B15, sem diferenças razoáveis, seguidos de B100 e depois o HVO15. Com o B100, o consumo de combustível aumenta 9%, comparado ao B7. Para avaliar o desempenho no consumo de combustível do biodiesel puro em comparação com o diesel fóssil, numa situação rodoviária real, foram analisados seis autocarros em sua utilização diária, três a operar com B7 e outros três a operar com B100, todas a realizar a mesma rota. Neste caso, os autocarros a biodiesel tiveram um aumento no consumo de combustível de cerca de 4,5%, não tendo sido registado um aumento do número de avarias decorrente desta utilização.

Possíveis avarias e alterações na manutenção do motor ao operar com biodiesel

Pelas diferenças nas propriedades do combustível, e de, tipicamente, os motores não estarem otimizados para utilizar misturas com grande percentagem de biodiesel, avarias poderão surgir e alterações no motor ou na manutenção deste devem ser implementadas.

Tal como anteriormente referido, a utilização do biodiesel num ambiente frio é crítica, uma vez que ocorre a formação de depósitos nos componentes de injeção, como linhas de combustível, bomba de combustível, nos bicos de injetores e nos filtros de combustível. Caso aconteça, será necessário desobstruir os componentes em causa. Este mesmo efeito pode ser limitado pela utilização de anticoagulantes no combustível. Em adição, a formação de depósitos pode ter origem na transformação incompleta do óleo vegetal em biodiesel e em demasiado tempo de armazenamento, levando à oxidação ou contaminação por bio organismos deste. Outro motivo que leva o entupimento do filtro de combustível, pode resultar da propriedade detergente do biocombustível. Este aspeto é especialmente crítico em veículos que começaram a operar com diesel rodoviário e passaram a utilizar biodiesel, uma vez que todos os sedimentos acumulados durante essa utilização, serão transportados pelo biodiesel, ficando assim retidos nos filtros de combustível. Todos estas avarias levam a dificuldades a iniciar o funcionamento do motor, diminuição da potência, falha na injeção e, conseqüentemente, falta de ignição (Ciolkosz, 2016).

Outro aspeto crítico que pode ocorrer ao utilizar o biodiesel é a diluição do óleo lubrificante pelo combustível, aumentando o nível do mesmo. Conseqüentemente, ocorre perda de pressão no sistema de lubrificação, causando desgaste excessivo numa série de componentes lubrificados como rolamentos, cilindros, pistões, entre outros. Este acontecimento, ao utilizar biodiesel, é explicado pela passagem de combustível entre as paredes do cilindro e o pistão, dada a má atomização no *spray* de injeção. A incorporação de combustível no óleo lubrificante leva a uma perda de lubricidade deste, aumentando o desgaste dos componentes internos do motor (Ciolkosz, 2016).

Já como supramencionado, a acidificação do combustível leva este a reagir com os materiais, chegando a corroer, por exemplo, os elastómetros. Antes da utilização do biodiesel é necessário perceber se os materiais presentes no motor já estão aptos a utilizar este combustível. Se não os possuir, terão de ser alvo de substituição já que o biodiesel irá degradar estes componentes (Ciolkosz, 2016).

Tipicamente, as marcas de veículos pesados lançam uma série de mudanças que deverão ser realizadas nos veículos para que possa ser utilizado biodiesel, em substituição

do diesel rodoviário. Pode estar incluído a reprogramação da unidade de comando, alterações no sistema de tratamento de gases, substituição de respiros do motor, entre outras. Praticamente, em todas elas, é mantido o procedimento de manutenção, porém num intervalo que diminui para a metade. (Scania, 2021) Existem até motores em que não pode ser adicionado uma maior percentagem de biodiesel que a existente no rodoviário (B7). Assim sendo, antes de utilizar o biodiesel é sempre necessário recolher informação sobre o motor para comprovar se o mesmo está apto a utilizar este tipo de combustível, e quais as alterações a realizar para que o possa utilizar.

Implicações do biodiesel no sistema de tratamento de gases de escape

Todo o veículo, atualmente, para cumprir as normas europeias necessita de possuir um sistema de tratamento de gases. Este é composto por vários tipos de catalisadores, com o intuito de tratar cada um dos poluentes. Resumidamente, um sistema mais atualizado deste tipo possui um DOC (*Diesel Oxidation Catalyst*) para tratamento dos CO e HC, um DPF (*Diesel Particulate Filter*) para tratamento das partículas e um SCR (*Selective Catalytic Reduction*) que, com auxílio do *Adblue*, reduz o NO e o NO₂. O intuito seria então, à saída do tubo de escape de um motor Diesel, apenas existir N₂, O₂, CO₂ e H₂O. Todos os sistemas apresentados não são perfeitos existindo sempre quantidades residuais de cada uma das substâncias químicas anteriormente mencionadas (Granstrand, París, Nilsson, Regali, & Pettersson, 2020). Esquemáticamente, um sistema de tratamento de gases encontra-se apresentado na seguinte Figura 9.

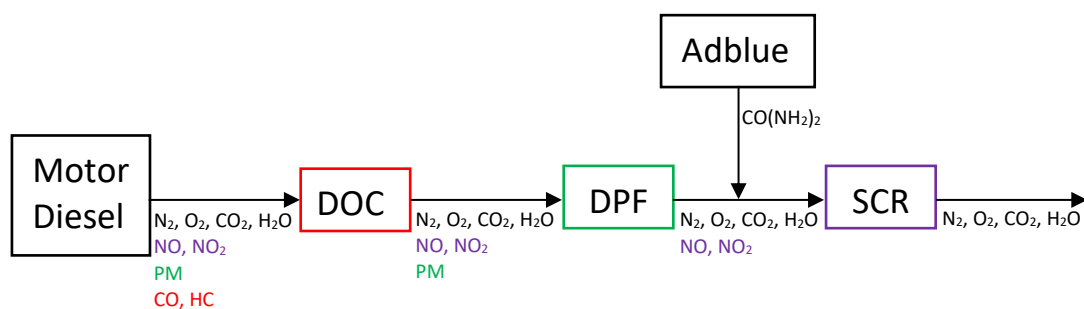


Figura 9: Esquema simplificado de um sistema de tratamento de gases, adaptado de (Granstrand, París, Nilsson, Regali, & Pettersson, 2020).

O biodiesel provoca, tipicamente, um efeito negativo nestes sistemas, dado este poder conter níveis elevados de Na, K, P, Ca, Mg e Zn, originários na matéria-prima ou no processo de obtenção do combustível. Estas impurezas contaminam todo o sistema de tratamento de gases, provocando a sua desativação gradual ao longo do tempo (Granstrand, París, Nilsson, Regali, & Pettersson, 2020). No caso do DPF, este necessita que ocorram regenerações

periódicas para realizar a limpeza interna do mesmo. Para isso, o motor promove injeções de combustível com a válvula de escape aberta, de modo a aumentar a energia interna do filtro para que estas ocorram. Como o biodiesel possui um poder calorífico inferior ao do diesel petrolífero, ocorre a necessidade de existir um maior número de regenerações e com maior duração dada a menor temperatura atingida. Neste tempo existe combustível que, ao invés de ser injetado para o sistema de escape, passa entre as paredes do cilindro e do pistão, chegando ao óleo lubrificante, diluindo-o. Dada a sua menor volatilidade face ao diesel petrolífero, o biodiesel permanecerá mais tempo no óleo lubrificante, alterando as suas propriedades, danificando os componentes internos do motor (McCabe & Jones, 2012). No caso de SCR, a incorporação do biodiesel leva a um aumento da emissão de NO_x pelo motor, existindo assim uma maior quantidade desta espécie química para posterior tratamento. Paralelamente, com o biodiesel, ocorre uma diminuição da proporção NO_2/NO_x na entrada do SCR, diminuindo o seu rendimento (Mizushima, et al., 2010).

3. Metodologia

Neste capítulo, será apresentada a metodologia aplicada em cada um dos dois casos de estudo que dão corpo a este trabalho, denominados de caso de estudo A e caso de estudo B. Surge esta necessidade dadas as diferenças e particularidades de ambos.

3.1.Caso de estudo A

O caso A decorreu de um protocolo entre uma empresa de combustíveis e um ramo das forças armadas portuguesas. Assim sendo, ocorreu a utilização de biodiesel numa série de viaturas e máquinas estacionárias seleccionadas para o estudo, onde foi realizada a monitorizado o consumo de combustível, análise às emissões de gases de escape e ensaios em banco de potência. Globalmente, a metodologia aplicada está demonstrada na seguinte Figura 10. Para mais fácil detalhar cada tipologia de teste, os mesmos serão apresentados, por subcapítulo, de seguida.

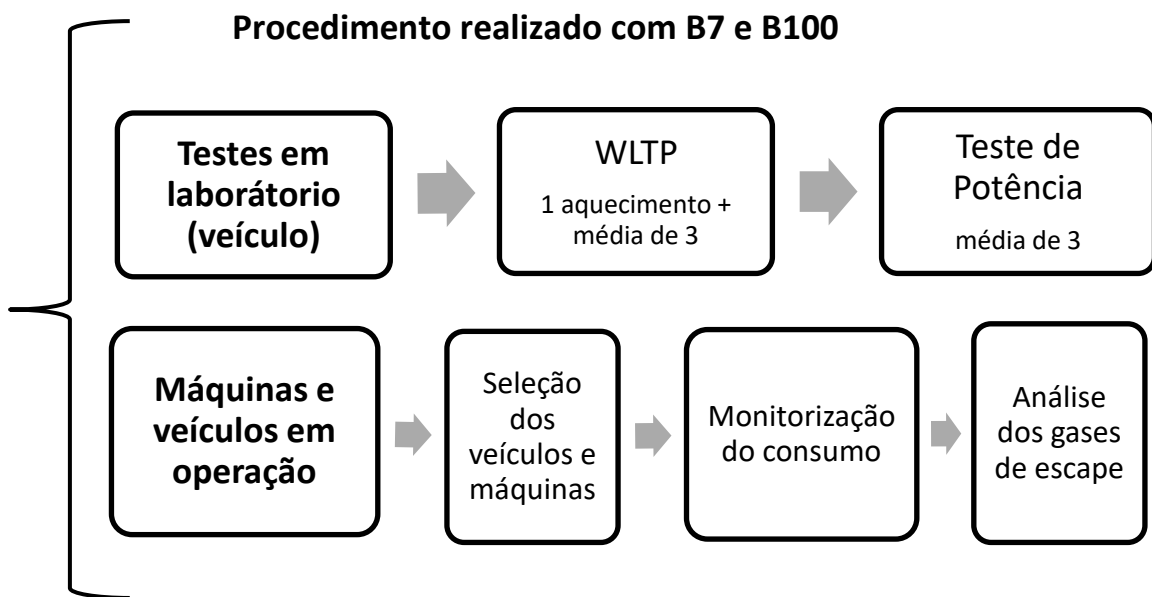


Figura 10: Esquema da metodologia utilizada no caso de estudo A.

3.1.1. Monitorização do consumo de combustível

Para a realização desta monitorização, inicialmente, foram seleccionados equipamentos e veículos que seriam alvo do estudo, tendo como objetivo primário evitar qualquer situação que pudesse comprometer o normal funcionamento da base aérea. Na seguinte Tabela 6, encontram-se identificadas as viaturas seleccionadas, com referência à sua

Estudo sobre a utilização de combustíveis avançados no rendimento e emissões de veículos com motores de ignição por compressão

tipologia, ao seu ano de fabrico, à tipologia do motor e cilindrada. Por questões de confidencialidade, as viaturas serão identificadas com a denominação “AM” e um número.

Tabela 6: Viaturas seleccionadas para o estudo.

	Matrícula	Tipologia do veículo	Ano de fabrico	Tipologia de motor	Cilindrada total [cm³]
VIATURAS	AM-01	VIATURA LIGEIRA / PASSAGEIROS	1996	4 cilindros em linha	1900
	AM-02	VIATURA LIGEIRA / PASSAGEIROS	2005	4 cilindros em linha	1868
	AM-03	VIATURA LIGEIRA / PASSAGEIROS	2005	4 cilindros em linha	1868
	AM-04	VIATURA LIGEIRA / PASSAGEIROS	2000	4 cilindros em linha	1868
	AM-05	VIATURA LIGEIRA / MISTO	1995	4 cilindros em linha	2446
	AM-06	VIATURA LIGEIRA / MISTO	1995	4 cilindros em linha	2446
	AM-07	VIATURA LIGEIRA / MERCADORIAS	1999	4 cilindros em linha	2494
	AM-08	VIATURA LIGEIRA / MISTO	1999	4 cilindros em linha	2446
	AM-09	VIATURA PESADA / MERCADORIAS	2001	4 cilindros em linha	4104
	AM-10	VIATURA PESADA AUTO-TANQUE COMBUSTÍVEL	1981	6 cilindros em linha	12760
	AM-11	VIATURA PESADA AUTO-TANQUE COMBUSTÍVEL	1993	8 cilindros em V	6600
	AM-12	VIATURA PESADA / PASSAGEIROS	1997	6 cilindros em linha	4104
	AM-13	VIATURA PESADA / PASSAGEIROS	2001	4 cilindros em linha	4104
	AM-14	VIATURA LIGEIRA / PASSAGEIROS	1999	4 cilindros em linha	2446

Analisando a série de veículos em estudo, é visível que existe uma grande variedade de tipologias, desde ligeiros a pesados, tanto de mercadorias como de passageiros, existindo até veículos autotanques. A grande variedade anteriormente referida é também visível na cilindrada dos motores em estudo onde, o mais reduzido possui uma cilindrada total de 1868 cm³, e o maior possui uma cilindrada total de 12760 cm³. Esta variedade de veículos é também ela representativa da frota de veículos a operar na base aérea. Todos os veículos são de ciclo Diesel, e operam a 4 tempos, alternando entre 4, 6 e 8 cilindros. A grande variabilidade de características poderá ser vista como uma mais-valia na realização deste

Estudo sobre a utilização de combustíveis avançados no rendimento e emissões de veículos com motores de ignição por compressão

estudo. Apesar disso, as viaturas não possuem os sistemas de injeção e de tratamentos de gases de escape mais atuais, uma vez que, a mais recente possui 18 anos de idade, e a mais antiga 42 anos de idade. Em resumo, foi analisada a influência no consumo ao utilizar biodiesel em 14 viaturas. Focando agora nos equipamentos para o estudo, os mesmos possuem as seguintes características e tipologias, representadas na Tabela 7. Por questões de confidencialidade, os equipamentos serão identificados com a denominação “EE” e um número.

Tabela 7: Equipamentos selecionados para o estudo.

	Matrícula	Tipologia do equipamento	Tipo de motor	Cilindrada total [cm³]
Equipamentos estacionários	EE-01	Auto municador Modelo: VAP-60	4 Cilindros em linha - 4 tempos	2732
	EE-02			
	EE-03	Compressor de ar Modelo: DLT0703	4 Cilindros em linha - 4 tempos	3108
	EE-04	Torre de iluminação Modelo: GX-4000	3 Cilindros em linha - 4 tempos	916
	EE-05	Gerador de corrente Modelo 60T400TR1	4 Cilindros em linha - 4 tempos	3900
	EE-06	Trator de reboque Modelo:02-2TD20	4 Cilindros em linha - 4 tempos	3469
	EE-07	Trator de reboque Modelo: F59	4 Cilindros em linha - 4 tempos	3108
	EE-08	Turbina de arranque Modelo: ACE600	6 Cilindros em V - 2 tempos	9050

Focando agora na série de equipamentos estacionários utilizada em estudo, é visível que existe também uma grande variedade de motores com cilindrada entre 916 cm³ e 9050 cm³. Todos são de ciclo Diesel sendo que apenas um opera em 2 tempos com 6 cilindros, numa disposição em V, os restantes operam em 4 tempos, alternando entre 3, 4 e 6 cilindros, apenas com disposição em linha. Mais uma vez, a variedade destas características poderá ser vista como uma mais-valia na realização deste estudo. Não é referenciado qual a data de fabrico de cada um dos equipamentos em estudo, no entanto, não possuem sistemas de tratamento de gases e de injeção atuais. Todos os dados anteriormente demonstrados, tanto para os equipamentos como para os veículos, foram fornecidos pela base aérea. Deste modo, foi analisada a influência no consumo ao utilizar biodiesel em 8 equipamentos.

Após a escolha dos veículos e equipamentos, ocorreu um período de monitorização de quilómetros ou horas de funcionamento e volume de diesel rodoviário (B7) consumido por estes. Inicialmente estava prevista a monitorização iniciar-se a 31 de janeiro de 2022

Estudo sobre a utilização de combustíveis avançados no rendimento e emissões de veículos com motores de ignição por compressão

com conclusão a 21 de março de 2022. Na prática, este período foi estendido até dia 28 de abril. Após este, ocorreu a mesma monitorização, mas com o biodiesel. Seria previsto esta iniciar-se a 28 de março e estender-se até 4 de julho. Na prática, iniciou após o término da utilização de B7 e estendeu-se até 8 de agosto. A contabilização das horas ou quilómetros percorridos tal como a do consumo de combustível, ficou totalmente a cargo da base aérea.

Para obtenção dos valores médios de consumo, considerou-se a contabilização das médias de consumo por cada abastecimento (l/100km para os veículos e l/h para os equipamentos), partindo do pressuposto de que todos os quilómetros percorridos (ou horas de funcionamento) foram realizadas com aquele combustível correspondente ao referido abastecimento. Esta consideração não será totalmente válida, no entanto, as oscilações nas médias obtidas são compensadas pelos vários abastecimentos existentes em cada equipamento ou veículo, uma vez que, a média final, foi considerada como sendo a média de cada abastecimento. Numa análise criteriosa às médias de cada abastecimento, caso estas apresentassem valores muito discrepantes do esperado, não seriam consideradas para análise. Estas discrepâncias estariam relacionadas com abastecimentos não contabilizados, ou enganos no registo do abastecimento.

3.1.2. Medição das emissões de gases de escape

O principal objetivo deste tipo de medição seria avaliar a influência da tipologia dos combustíveis (B7 e B100) na emissão de poluentes e de CO₂. Para isso, foram selecionados 2 veículos e 2 equipamentos de apoio terrestre representativos da frota analisada. Os regimes de funcionamento escolhidos para a medição dos gases de escape foram representativos da normal operação de cada veículo e equipamento, existindo testes com o motor frio (logo após arranque) e à temperatura normal de funcionamento. Todavia, nos testes realizados aos veículos, não foi imposta qualquer carga no motor, desviando-se assim de uma normal operação. Nas imagens seguintes encontram-se apresentados os veículos (Figura 11 e Figura 12) e equipamentos (Figura 13 e Figura 14) alvo de estudo.

Estudo sobre a utilização de combustíveis avançados no rendimento e emissões de veículos com motores de ignição por compressão



Figura 11: Viatura autotanque, em estudo, com a matrícula AM-11.



Figura 12: Autocarro, em estudo, com a matrícula AM-12.



Figura 13: Torre de iluminação, em estudo, com a matrícula EE-04.



Figura 14: Turbina de arranque, em estudo, com a matrícula EE-08.

A medição dos gases emitidos foi realizada com o equipamento da marca TESTO, modelo 350 XL. A unidade do analisador inclui vários sensores de gases, permitindo efetuar a medição da concentração de CO, CO₂, NO, NO₂, SO₂, H₂S ou C_xH_y, entre outras substâncias e uma ponta de prova que é introduzida do sistema de escape. Para proteger cada sensor, a extensão da faixa de medição (diluição) é ativada automaticamente quando há concentrações de gás inesperadamente altas, permitindo assim a realização de medições sem restrições. De todas as substâncias possíveis de medir, considerou-se mais importante a aquisição dos dados relativos aos valores de concentração de O₂, CO, NO_x, CO₂, C_xH_y, e λ (razão ar/combustível) e da temperatura dos gases escape. Estes dois últimos apenas serviram para garantir que os regimes considerados com B7 e B100 seriam idênticos. Os valores das emissões de hidrocarbonetos não puderam ser considerados para estudo, uma vez que o equipamento de medição possuía uma anomalia, impossibilitando a apresentação deste parâmetro, o que promoveu também a impossibilidade de determinar o fator de lambda.

Estudo sobre a utilização de combustíveis avançados no rendimento e emissões de veículos com motores de ignição por compressão

Cada medição era iniciada ao ar atmosférico, para não ser influenciada pela medição anterior, posto isto, a ponta de prova era introduzida no tubo de escape do veículo ou equipamento, sendo adquiridos dados durante, pelo menos 1 minuto, respeitando o tempo de resposta dos sensores, a regime estabilizado. No mesmo sentido, entre medições, eram adquiridos valores do ar atmosférico, de modo a limpar todo o sistema, para os resultados anteriores não terem quaisquer efeitos nos seguintes. O analisador de gases estava então conectado via RS232 a um computador portátil, com uma taxa de aquisição de 1 Hz, onde os dados eram guardados, em ficheiro .csv e, posteriormente, tratados em *excel*. O tratamento de dados consistia, numa zona já estabilizada, realizar a média aritmética de cada substância durante 5 segundos, de modo a neutralizar eventuais variações. Na seguinte Tabela 8 encontra-se apresentado o alcance de medição, a exatidão, a resolução e o tempo de reação do analisador de gases, para cada substância química anteriormente apresentada.

Tabela 8: Características da medição do analisador de gases, adaptado de (testo, s.d).

Substância química	O ₂	CO	CO ₂ i (medido)	NO	NO ₂
Alcance da medição	0 – 25 % O ₂	0 – 10000 ppm CO	0 – 50 % CO ₂	0 – 3000 ppm NO	0 – 500 ppm NO ₂
Exatidão	± 0,8 %	±10 ppm (0 – 99 ppm CO) ± 5% (100 – 2000 ppm CO) ± 10% (2001 - 10000 ppm CO)	± 0,3 % (0 – 25 % CO ₂) ± 0,5 % (> 25 – 50 % CO ₂)	± 5 ppm (5 – 99 ppm NO) ± 5 % (100 – 1999,9 ppm NO) ± 10 % (2000 – 3000 ppm NO)	± 5 ppm (5 – 99,9 ppm NO) ± 5 % (100 – 500 ppm NO ₂)
Resolução	0,1 %	1 ppm	0,01 % (0 – 25% CO ₂) 0,1 % (>25 – 50 % CO ₂)	1 ppm	0,1 ppm
Tempo de reação (segundos)	20	40	< 10	30	40

Ficou assim previsto ocorrer duas recolhas aos veículos e equipamentos selecionados, quando estes já vinham, à mais de um mês, a operar com cada combustível. Assim sendo é garantido, especialmente na utilização do B100, que o combustível anterior (B7), não influenciou qualquer resultado medição realizada.

3.1.3. Teste de potência e consumo em laboratório

O principal objetivo dos testes em laboratório seria permitir a repetibilidade de vários ensaios mantendo, praticamente, as mesmas condições, sendo os resultados independentes

Estudo sobre a utilização de combustíveis avançados no rendimento e emissões de veículos com motores de ignição por compressão

de fatores externos. Assim sendo, seria possível avaliar o consumo de ambos os combustíveis num procedimento padronizado. Neste caso optou-se pela escolha do ciclo WLTP (*Worldwide harmonized Light-duty vehicles Test Procedure*) realizado em banco de potência de rolos. O ciclo divide-se em 4 fases, uma denominada de “baixa” com uma velocidade média de 18,9 km/h e uma duração de 9 minutos e 50 segundos, uma “média” com uma velocidade média de 39,8 km/h e uma duração de 7 minutos e 10 segundos, uma “elevada” com uma velocidade média de 56 km/h e uma duração de 7 minutos e 40 segundos e uma “extra elevada” com uma velocidade média de 92,9 km/h e uma duração de 5 minutos e 20 segundos, totalizando assim 30 minutos de teste (António, 2022). Para este teste, foram adicionados uma série de sensores para monitorizar o consumo de combustível do motor, como um caudalímetro (para obtenção de fluxo volúmico) e uma balança, para obtenção do fluxo mássico. Esta metodologia ajuda a perceber se ocorreram erros na medição do consumo de combustível, visto que os resultados obtidos de ambos os métodos são comparados. As características técnicas do veículo, como o coeficiente de arrasto aerodinâmico, a massa do veículo, a sua potência, as relações de transmissão entre outras, são tidas em conta na realização deste teste, visto que o banco de ensaio reproduz o ciclo realizado em estrada, num normal funcionamento do veículo, impondo uma carga aos rolos variante com este. Antes da realização destes ensaios, é efetuado um ciclo WLTP para aquecimento de todos os componentes do veículo, garantido que o mesmo se encontra à temperatura normal de funcionamento. A instrumentação presente no veículo encontra-se esquematizada na seguinte Figura 15.

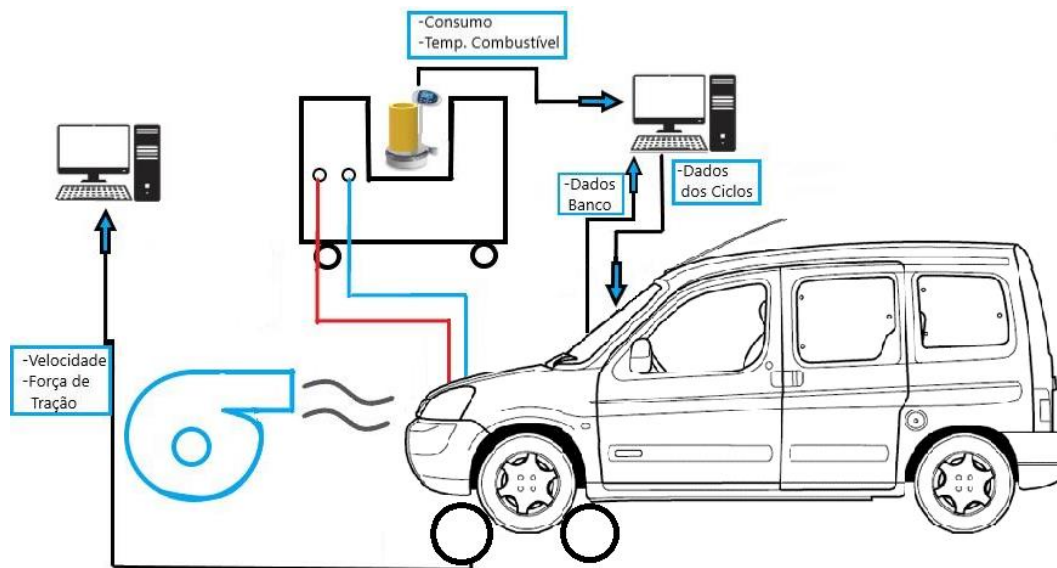


Figura 15: Esquema da instrumentação do veículo em banco de potência, adaptado de (Bastos, 2019).

A aquisição de dados foi realizada a uma frequência de 5 Hz. De modo a garantir a sua sincronização, foi feito um tratamento de dados que tinha como base a definição do ponto inicial do teste, para isso, considerou-se a massa média do combustível presente na balança num período de 2 segundos, 5 segundos antes de se iniciar o movimento do veículo. De igual modo, considerou-se o ponto de transição entre cada etapa a ser a média da massa medida na balança durante um período de 2 segundos, 5 segundos após a cessão do movimento das rodas do veículo.

Com recurso ao mesmo banco de ensaio de rolos obteve-se a curva de binário e potência máxima ao utilizar cada um dos combustíveis. Para efetuar a avaliação da potência do veículo, este é acelerado até próximo da sua rotação máxima, percorrendo a gama de velocidades de rotação do motor de forma controlada pelo dinamómetro, aplicando este um binário resistivo nos rolos. Este controlo é efetuado de forma contínua ao longo da gama de rotação do motor (teste contínuo). Posto isto, o carro é desembreado, sendo que o banco mede o binário existente nos rolos, até que as rodas parem. Este é então o binário despendido no sistema de transmissão. Após isso, e conhecendo a rotação do motor em cada momento, é então possível obter a potência desenvolvida pelo motor. Esta será a soma da obtida no momento de aceleração com a perdida no momento de desaceleração. O valor obtido por ser normalizado em função das condições ambientais, assume assim a designação de “potência da norma”. Em alternativa pode ser realizado de forma discreta, em pontos de rotação pré-definidos que são estabelecidos de modo a permitir uma comparação mais efetiva entre os diferentes ensaios. No caso dos testes discretos, o veículo foi mantido a 1250 RPM, 2000 RPM, 2750 RPM, 3500 RPM e 4250 RPM, onde foi adquirido os parâmetros anteriormente referidos, durante 3 segundos. Em todos os casos, tanto nos testes contínuos como nos discretos e no de consumo de combustível, são sempre realizados 3 ensaios onde os resultados apresentados são uma média aritmética destes. Consequentemente, a incerteza no resultado final obtido é reduzida.

O dinamómetro utilizado neste estudo é o MAHA LPS 3000, um banco de ensaio de rolos de tipo freio magnético, baseado no princípio das correntes de *Eddy*. Com este equipamento, é possível testar várias situações, como potência máxima instantânea, potência a regimes de rotação pré-definidos e simulação de carga. Além disso, é possível medir veículos com tração em 1 ou 2 eixos, com uma potência máxima admissível, por eixo, de 257 kW e 522 kW respetivamente, para uma velocidade máxima de 260 km/h.

Todo o procedimento foi realizado com B7, tendo sido repetido com o B100, para se efetuar uma posterior análise comparativa entre combustíveis. O veículo escolhido para o

Estudo sobre a utilização de combustíveis avançados no rendimento e emissões de veículos com motores de ignição por compressão

estudo foi um ligeiro de passageiros da marca e modelo Citroën Berlingo equipado com um motor de injeção direta com cilindrada 1900 cm³ e 52 kW de potência máxima encontrando-se apresentado, na Figura 16, no banco de ensaio de rolos.



Figura 16: Veículo escolhido para realizar os ensaios em dinamómetro.

3.2.Caso de estudo B

Idêntico ao caso A, o caso B decorreu de um protocolo entre uma empresa de combustíveis e uma empresa de serviços de logística. O intuito inicial seria então utilizar o biodiesel (B100) numa série de viaturas de distribuição. Numa fase inicial, das viaturas existentes, foram seleccionadas para estudo as que se encontravam mais próximo da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Politécnico de Leiria, uma vez que seriam necessárias visitas regulares à empresa e as que, à partida, poderiam levar uma maior incorporação de biodiesel no combustível. As viaturas escolhidas estão apresentadas nas seguintes Figura 17, Figura 18, e Figura 19.



Figura 17: Viatura "TG", em estudo



Figura 18: Viatura "IX", em estudo.



Figura 19: Viatura "SC", em estudo.

Cada um dos veículos possui as seguintes características técnicas (Tabela 9):

Tabela 9: Características técnicas dos veículos em estudo.

Matrícula	Marca	Modelo	Tipologia	Ano de fabrico	Cilindrada [cm ³]	Sistema de injeção	Sistema de tratamento de gases
TG	Scania	R 360	Camião 4X2	2010	13 000	Common - rail	DOC e EGR
IX	Scania	R 400	Trator 4X2		13 000	Common - rail	DOC e EGR
SC	Scania	R 420	Camião 6X2		12 000	Injetor - bomba	DOC e SCR

Por uma questão de confidencialidade, as viaturas serão apenas identificadas pelas letras presentes nas suas matrículas. A potência de cada um dos veículos, encontra-se apresentada no número do modelo destes (360, 400 e 420), em cavalos. Resumidamente, as viaturas TG e IX possuem o mesmo tratamento de gases, ou seja, DOC e EGR, a mesma cilindrada (13 000 cm³) e sistema de injeção (*common-rail*). Por último, a viatura SC possui uma cilindrada de 12 000 cm³, o sistema anterior de injeção, injetor-bomba, e, no sistema de tratamento de gases, esta contém um DOC e um SCR, com injeção de *adblue*. Assim sendo, existem duas viaturas similares, em termos de motor e sistema de tratamento de gases e uma díspar. O mesmo pode ser visto como uma mais-valia, visto que pode ser analisada a influência do biodiesel em sistemas diferentes e comparada a sua ação em sistemas idênticos.

Com o intuito de minimizar os problemas de uma transição direta de B7 para B100, como entupimentos de filtros, bombas de combustível, injetores, entre outros, visto que todas as viaturas já apresentavam um número considerável de quilómetros percorridos, a transição de B7 não seria direta para B100. Inicialmente ocorreria a passagem para B30, seguida de B50 até chegar ao B100, com a duração de utilização de 1 mês para o B30 e B50 e 2 meses

Estudo sobre a utilização de combustíveis avançados no rendimento e emissões de veículos com motores de ignição por compressão

para o B100. Em cada mudança de combustível estaria associada uma substituição de filtro de combustível. De modo a aferir a influência do biodiesel no motor e na emissão de gases, seriam feitas recolhas de óleo e análises aos gases de escape com o veículo a operar com cada combustível. A substituição de filtros de combustível seria realizada por uma empresa especializada em mecânica automóvel de veículos pesados, a recolha de óleo e das emissões dos gases de escape seriam realizadas pelo autor do estudo, já a análise do óleo ficaria a cargo de um laboratório acreditado para o efeito. O cronograma simplificado dos trabalhos anteriormente referidos encontra-se apresentado na seguinte Figura 20 tal como da metodologia, na Figura 21.

Semana	Viatura TG		Viatura IX e SC		
	Ação	Combustível	Ação	Combustível	
7	Medição das emissões, Recolha de óleo	B7	X		
8	Troca de filtros de combustível, 1º Abastecimento com B30	B30			
9					
10					
11					
12	Medição das emissões, Recolha de óleo				B7
3		B30		Troca de filtros de combustível, 1º Abastecimento com B30	B30
14 (abril)					
15					
16					
17	Medição das emissões, Recolha de óleo				
18	Troca de filtros de combustível, 1º Abastecimento com B50	B50	Troca de filtros de combustível, 1º Abastecimento com B50	B50	
19					
20					
21					
22	Medição das emissões, Recolha de óleo				
23	Troca de filtro de combustível, 1º Abastecimento com B100	B100	Troca de filtro de combustível, 1º Abastecimento com B100	B100	
24					
25					
26					
27	Medição das emissões, Recolha de óleo				
28	Troca de filtro de combustível				
29					
30					
31					
32	Medição das emissões, Recolha de óleo, Troca de filtro de combustível		Medição das emissões, Recolha de óleo, Troca de filtro de combustível		

Figura 20: Cronograma de trabalho simplificado.

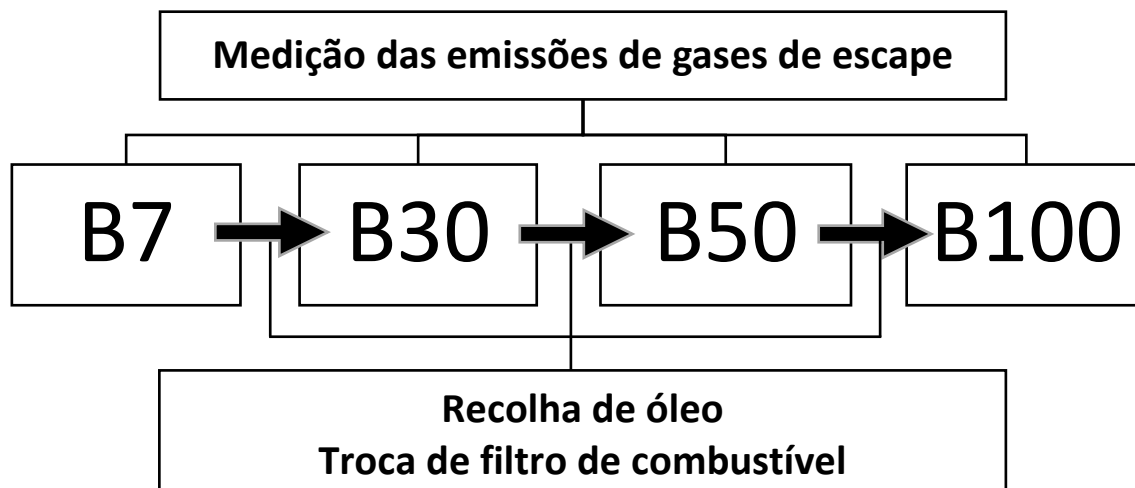


Figura 21: Esquema da metodologia utilizada no caso de estudo B.

O abastecimento das viaturas seria realizado com um camião-cisterna que se encontraria nas instalações da empresa. Visto que o mesmo só se tornou possível um mês após início do estudo, duas das viaturas apenas iniciaram a utilização de biodiesel após essa data. A viatura TG conseguiu iniciar o estudo antecipadamente visto que a sua rota de funcionamento passava junto às instalações da empresa de combustíveis. Em paralelo, seriam analisados os dados do consumo de combustível, fornecidos pela empresa de logística e pela plataforma online de gestão de frotas, denominada de *Cartrack*.

Para um maior detalhe na metodologia de cada uma desta tipologia de ações, as mesmas serão divididas, de seguida, em subcapítulos denominados de monitorização do consumo de combustível, medição das emissões de gases de escape e análise ao óleo lubrificante.

3.2.1. Monitorização do consumo de combustível

Para a monitorização do consumo de combustível, a empresa registou a quantidade de combustível abastecido e o número de quilómetros presentes no odómetro em cada veículo, por abastecimento. O consumo médio de combustível foi calculado tendo por base os quilómetros percorridos e os litros abastecidos durante a utilização de cada combustível. Entre troca destes (B7 para B30, por exemplo), foi tentado garantir que o depósito continha o mínimo de combustível possível, com o intuito de não adulterar o próximo abastecimento, com um novo combustível. Consequentemente, irá sempre existir uma incerteza associada à quantidade de combustível remanescente na altura do primeiro abastecimento do B30, B50 e B100.

Estudo sobre a utilização de combustíveis avançados no rendimento e emissões de veículos com motores de ignição por compressão

Numa das viaturas, estava instalado um sistema de acompanhamento de monitorização de frota onde é possível reconhecer a localização da mesma e acompanhar uma série de parâmetros de funcionamento do motor e veículo, desde velocidade do veículo e rotação do motor, consumo de combustível, entre outros. Assim sendo, esta plataforma será também utilizada para comprovar a veracidade dos resultados obtidos nos períodos considerados. Como base de comparação, foram requeridos os dados de abastecimento anteriores ao estudo, onde os veículos utilizavam diesel rodoviário, sendo o consumo apresentado a média deste nos últimos dois meses que antecederam a realização do estudo (dezembro e janeiro), para cada um dos veículos, seguindo o mesmo método de contabilização.

3.2.2. Medição das emissões de gases de escape

À semelhança do realizado com o caso de estudo anteriormente apresentado, o analisador de gases utilizado foi o mesmo, TESTO 350 XL. Consequentemente, o procedimento foi idêntico, onde foram medidos os gases emitidos pelos veículos com cada combustível (B7, B30, B50 e B100). De igual modo, foram adquiridas medições com os veículos com o motor “frio”, ou seja, logo após arranque, e de seguida a decorrer um trajeto fixo para todas as viaturas, e para todos os combustíveis, garantido assim que o motor se encontrava à temperatura normal de funcionamento, assim como todo o sistema de tratamento de gases. O percurso escolhido tinha cerca de vinte quilómetros de distância, maioritariamente percorridos em estrada nacional, com um desnível positivo acumulado próximo de 230 metros. Mais uma vez, para as duas condições de funcionamento referidas, foram selecionados dois regimes de operação do veículo, ao ralenti e a 1500 RPM, no entanto, sem aplicação de qualquer carga no motor. Este tipo de análise é importante realizar de modo a perceber qual a influência do biodiesel na emissão de poluentes para a atmosfera e o efeito que este possa ter nos sistemas de tratamento de gases apesar da condição de funcionamento não ser próxima a um normal funcionamento do veículo.

3.2.3. Análise ao óleo lubrificante

O óleo lubrificante tem como funções minimizar a fricção do motor, permitindo controlar o desgaste interno dos componentes, dissipar calor, promover a atuação de componentes entre outras. O mesmo é composto por um fluido base (biológico, mineral ou sintético) e aditivos (compostos que proporcionam propriedades específicas ao lubrificante).

Das propriedades existentes no óleo lubrificante, destaca-se o seu número de neutralização (denominado de *Total Base Number* - TBN, permitindo aferir a alcalinidade do lubrificante) e a sua viscosidade (resistência oferecida pelo lubrificante ao movimento), sendo estes os indicadores de estado do óleo considerados. O aumento da acidez do óleo, traduzindo-se numa diminuição do TBN, resulta da oxidação do óleo e dos produtos ácidos provenientes do processo de combustão. O aumento da viscosidade do óleo está relacionado com o seu envelhecimento ou oxidação e com a elevada concentração de fuligem. Caso diminua o mesmo é indicativo de diluição pelo combustível ou da degradação normal do lubrificante pela sua utilização. Em condições de utilização, o óleo pode ser contaminado por material de desgaste internos do motor como alumínio, cobre e ferro. Outras substâncias não metálicas que podem contaminar o óleo são a água, o combustível, material carbonoso e silício. A origem de cada um destes compostos encontra-se apresentada nas seguinte Tabela 10. Mais substâncias contaminantes existem (tanto metálicas como não metálicas), todavia, serão estas as que serão alvo de análise neste trabalho, visto que são estas as apresentadas nos resultados das análises ao óleo. Como aditivos, tipicamente, o óleo possui modificadores de fricção, depressores do ponto do escorrimento, melhoradores do índice de viscosidade, inibidores de espuma, inibidores de oxidação, inibidores de corrosão, detergentes, dispersores e anti desgaste, melhorando assim as propriedades do óleo (Almeida, 2022).

Tabela 10: Origem das substâncias presentes na análise do óleo, adaptado de (Adam, 2018).

CONTAMINANTES METÁLICOS (MATERIAL DE DESGASTE)

Elemento	Origem
Alumínio (Al)	<ul style="list-style-type: none">• Saias dos pistões• Meias-luas da cambota• Rolamentos do turbocompressor• Bronzes de biela/cambota• Poeira (se se verificar a presença de silício)• Arrefecedor de óleo
Cobre (Cu)	<ul style="list-style-type: none">• Bronzes de biela/cambota (verificar a presença de chumbo e estanho)• Casquilhos da árvore de cames de latão (se se verificar a presença de zinco) ou bronze (se se verificar a presença de estanho)• Arrefecedor de óleo (primeiras 2000 horas de funcionamento)• Superfície de rolamento do cavilhão• Meias-luas da cambota
Ferro (Fe)	<ul style="list-style-type: none">• Camisas• Árvore de cames• Cambota• Bielas• Bomba de óleo• Cavilhão• Coroa do pistão

CONTAMINANTES	
Água	<ul style="list-style-type: none"> • Sistema de refrigeração • Junta da cabeça danificada
Combustível	<ul style="list-style-type: none"> • Tempo excessivo ao ralenti • Injetores defeituosos • Combustão incompleta • Mistura ar-combustível incorreta
Fuligem (Material carbonoso)	<ul style="list-style-type: none"> • Combustível de fraca qualidade • Segmentos do pistão com elevado desgaste • Pulverização incorreta do injetor • Mistura ar-combustível incorreta
Silício	<ul style="list-style-type: none"> • Poeira • Colas/Mastiques • Aditivos anti espuma

Consoante o grau de contaminação ou o estado de cada propriedade são apresentadas três denominações, “Preocupante”, “Alarmante” e “Crítico”. O grau “Preocupante” indica a necessidade de acompanhamento do estado do lubrificante, o grau de contaminação “Alarmante” indica a necessidade de reduzir o período até à recolha seguinte e o grau “Crítico” indica a necessidade da paragem imediata do motor. A paragem do motor deve ser seguida da substituição do lubrificante, no caso de valores críticos de TBN e viscosidade, e de avaliação do desgaste dos componentes do motor, caso se verifiquem concentrações críticas dos indicadores de desgaste. A alteração da composição do lubrificante influencia diretamente o valor dos indicadores de estado, pelo que é necessário verificar a sua evolução ao longo da vida útil do mesmo, face aos valores de referência para um óleo novo. Os limites dos indicadores de estado do óleo, da concentração de contaminantes metálicos e não metálicos encontram-se na seguinte Tabela 11 (Almeida, 2022).

Tabela 11: Limites dos contaminantes e indicadores de estado de um óleo lubrificante, adaptado de (Oil Analysis Laboratories, s.d.).

CONTAMINANTES METÁLICOS (MATERIAL DE DESGASTE)				
Elemento	Unidades	Preocupante	Alarmante	Crítico
Alumínio (Al)	mg/kg	12	19	24
Cobre (Cu)	mg/kg	35	45	60
Ferro (Fe)	mg/kg	75	86	100
CONTAMINANTES NÃO METÁLICOS				
Água	%	0,1	0,2	0,5
Combustível	%	2	4	5
Fuligem (Material carbonoso)	%	2,5	3,5	5
Silício (Si)	mg/kg	20	40	40
INDICADORES DE ESTADO				
Viscosidade	% (diferença face ao óleo novo)	15	20	25
TBN	mg KOH/g	Diminuição de 50% face ao valor original	3	2,5

A recolha do óleo segue um processo cuidado de modo a garantir a viabilidade dos resultados obtidos. Para isso, é necessário utilizar um tubo de extração próprio para o efeito, uma bomba de vácuo para efetuar a sucção do óleo, e um frasco de recolha para armazenamento do óleo recolhido. Tipicamente o ponto de recolha do motor será numa linha de retorno ou num ponto drenagem do sistema. No caso deste trabalho, utilizou-se este último, tendo acesso pela vareta indicadora do nível de óleo. O tubo de extração é de utilização única, sendo apenas utilizado para realizar uma recolha. O óleo deve ser retirado do circuito de lubrificação do motor após um período de funcionamento do mesmo, enquanto este se encontrar a uma temperatura elevada. Depois da sua paragem, as recolhas de óleo devem de ser realizadas o mais rapidamente possível de modo a representar o estado do lubrificante em condições normais de funcionamento do motor (Almeida, 2022). Cada amostra de óleo é identificada com os quilómetros presentes no odómetro, matrícula do veículo, tipo de combustível que utilizava e a data em que foi realizada a recolha. A título de exemplo, encontra-se apresentada na seguinte Figura 22, uma amostra de óleo recolhida. Posto isto, e antes de ser enviada para o laboratório, é perfeitamente identificada com um código fornecido por este. O procedimento detalhado realizado encontra-se no anexo A do presente trabalho. Neste caso de estudo realizou-se uma recolha de óleo antes do início (com o veículo a operar com B7). Posto isto, seria previsto realizar uma recolha de óleo antes da troca de tipologia de combustível e no final, já a utilizar apenas biodiesel.



Figura 22: Amostra de óleo recolhida.

4. Apresentação e Discussão dos resultados

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados obtidos. Mais uma vez, ocorrerá uma divisão por caso de estudo. De modo idêntico ao efetuado no capítulo da metodologia, cada caso de estudo estará subdividido nas respectivas tipologias em análise.

4.1. Caso de estudo A

Neste caso de estudo, serão apresentados os resultados para o consumo médio de combustível para os veículos e equipamentos, para as emissões de gases de escape e, por último, os resultados obtidos em banco de potência.

4.1.1. Monitorização do consumo de combustível

Os resultados obtidos para o consumo médio com cada combustível e respetiva diferença percentual encontram-se apresentados na seguinte Tabela 12, para os equipamentos, e na Tabela 13, para os veículos. Os mesmos resultados estão também apresentados nos seguintes Gráfico 1, Gráfico 2, Gráfico 3 e Gráfico 4, para o consumo e diferença percentual para os equipamentos e veículos, respetivamente. A diferença percentual vai refletir o aumento, caso o valor apresentado seja positivo, ou diminuição no consumo ao utilizar B100 face à utilização com B7.

Tabela 12: Consumo médio dos equipamentos.

Equipamento	Consumo B7 (l/h)	Consumo B100 (l/h)	Diferença
EE-03	4,62	4,28	-7,25%
EE-04	1,18	0,98	-16,95%

Estudo sobre a utilização de combustíveis avançados no rendimento e emissões de veículos com motores de ignição por compressão

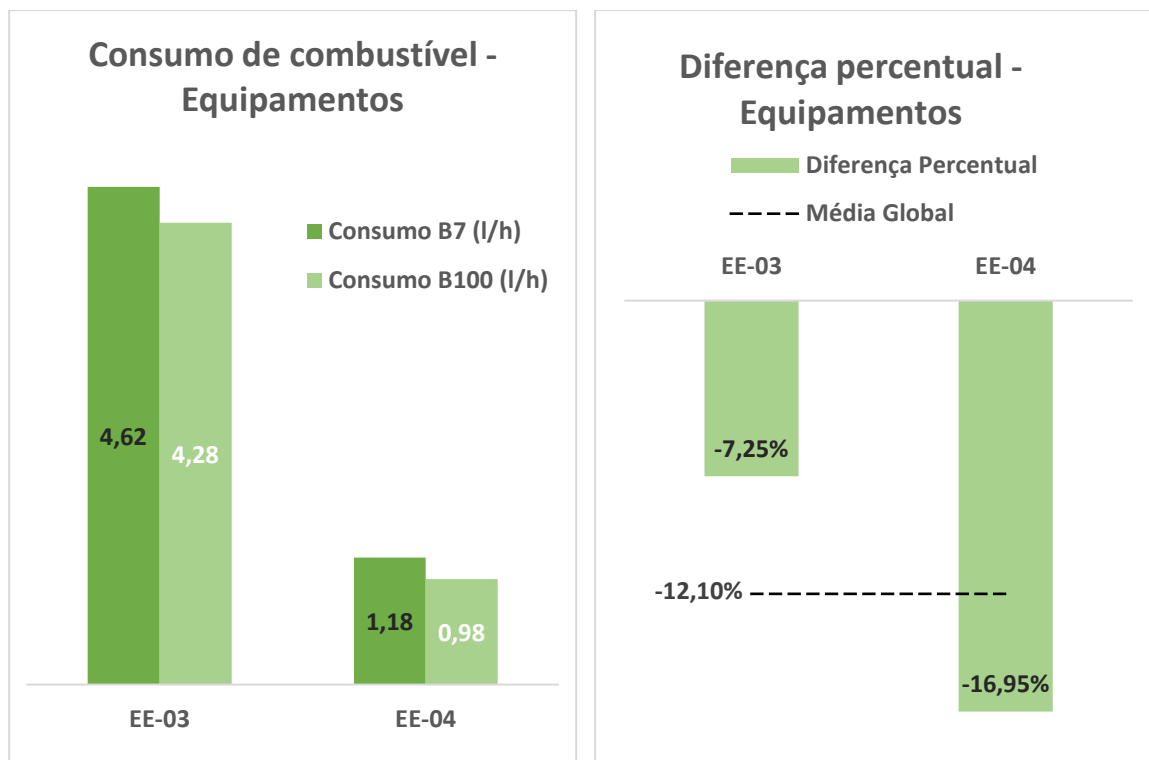


Gráfico 1: Média do consumo dos equipamentos.

Gráfico 2: Diferença percentual nos consumos dos equipamentos.

Tabela 13: Consumo médio dos veículos.

Viatura	Consumo B7 (l/h)	Consumo B100 (l/h)	Diferença
AM-01	4,94	5,30	7,24%
AM-02	7,37	8,04	9,10%
AM-03	6,33	7,27	14,91%
AM-04	8,31	7,84	-5,69%
AM-05	10,89	10,64	-2,28%
AM-06	10,27	10,94	6,54%
AM-07	13,37	12,59	-5,78%
AM-08	8,74	8,98	2,77%
AM-10	83,41	86,07	3,19%
AM-11	75,62	80,48	6,42%
AM-12	17,65	17,64	-0,02%
AM-13	17,41	15,20	-12,69%
AM-14	10,90	10,24	-6,08%

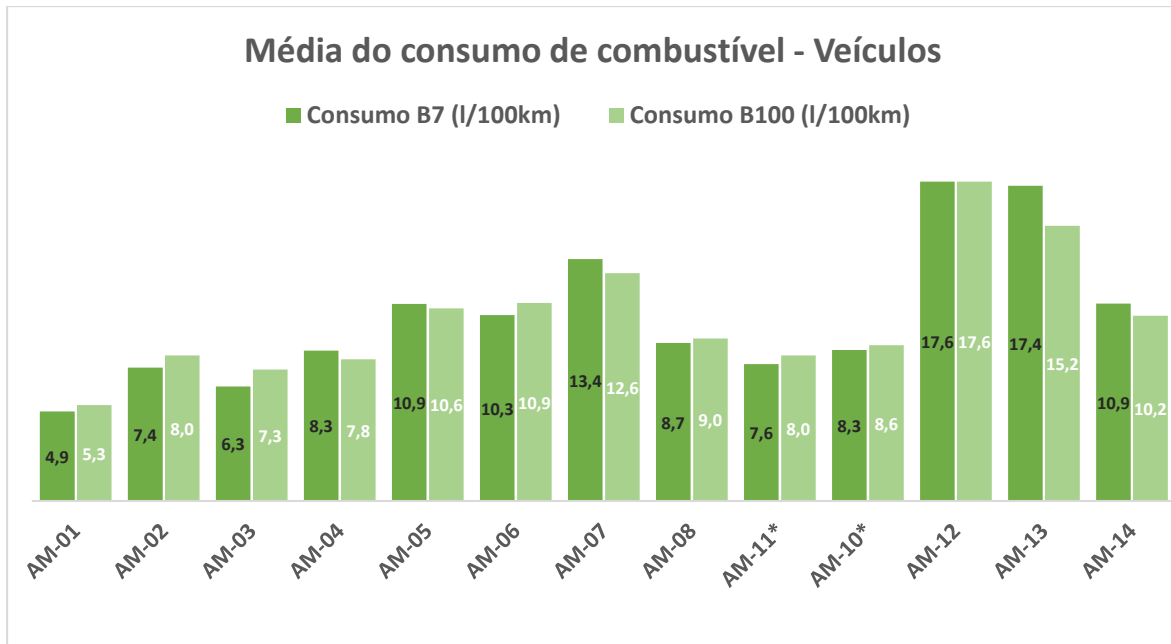


Gráfico 3: Média do consumo de combustível dos veículos (“*” o consumo destes veículos deve ser multiplicado por um fator de 10).

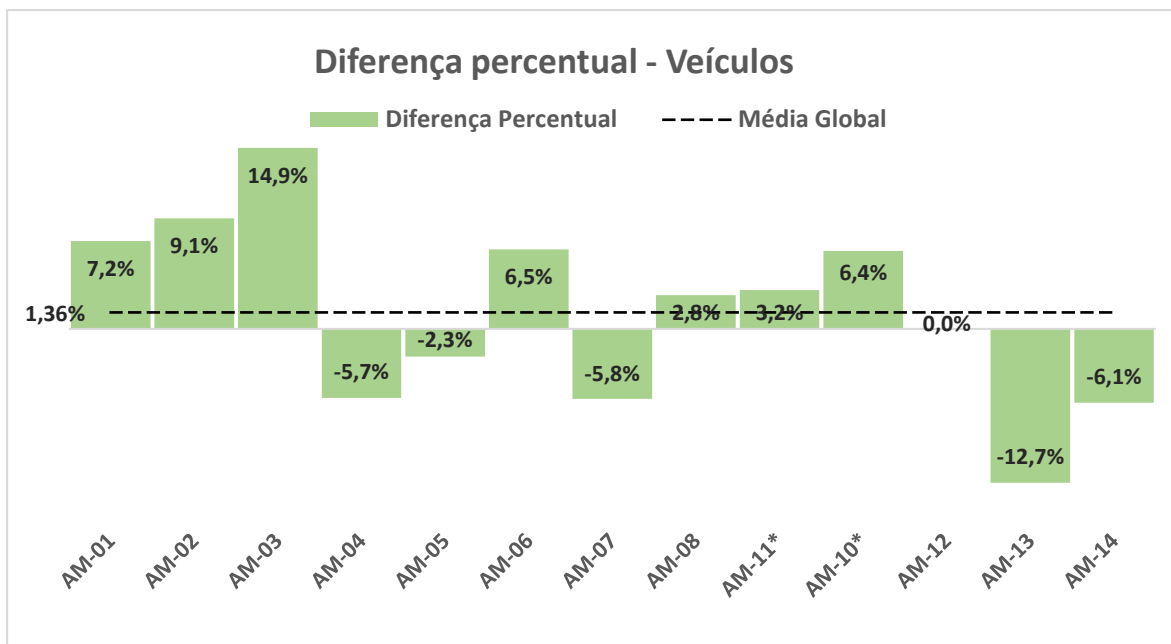


Gráfico 4: Diferença percentual dos consumos médios por veículo.

Inicialmente, é notório que não estão apresentados resultados de todos os veículos e equipamentos em estudo. O mesmo justifica-se pela falta de dados de abastecimentos numa em um dos combustíveis em estudo (B7 ou B100). De referir que para o equipamento EE-03 não existe certeza nos resultados apresentados, uma vez que, apenas eram apresentados dados de um único abastecimento em ambos os combustíveis. De igual modo, para as viaturas AM-05 e AM-14, a média de consumo apresentada para o combustível B7 é baseada em apenas um abastecimento.

Da análise dos resultados obtidos não é possível comprovar um aumento ou uma diminuição do consumo ao utilizar o biodiesel, existindo, por exemplo, um aumento do consumo da viatura AM-03 na ordem dos 15% (correspondente a 1l/100km) e uma diminuição do consumo da viatura AM-13 de cerca de 13% (correspondente a 2l/100km). Esta diferença dos consumos pode ser justificada, não apenas como consequência das diferenças nas propriedades químicas do combustível, mas sim da variabilidade de utilização dos veículos. Mesmo a operar com o mesmo combustível, existem variações no consumo consoante uma série de variáveis externas, como diferentes trajetos e condutores, alterações meteorológicas entre outros fatores que proporcionam diferentes consumos. Adicionalmente, como o consumo dos veículos é realizado tendo por base a distância percorrida, não é possível perceber se os mesmos estiveram a funcionar em modo estacionário, consumindo combustível sem percorrer qualquer distância. Este aspeto é especialmente crítico, por exemplo, em veículos autotanques, em que as bombas que transferem o fluido são atuadas pelo motor do veículo. Assim sendo, não é possível correlacionar um aumento direto do consumo de combustível ao utilizar o B100, na ordem de grandeza da diferença do poder calorífico entre este e o B7, como poderia ser expectável. Globalmente, nos veículos, a utilização de biodiesel aumentou o consumo em 1,36%, todavia, nos equipamentos, ocorreu uma diminuição média de 12,10%. No decorrer do estudo foram assim consumidos cerca de 12000 litros de combustível, entre B7 e B100.

4.1.2. Medição das emissões de gases de escape

Na Tabela 14 estão apresentados os resultados médios obtidos das emissões de O₂, CO, NO_x e CO₂ para as 2 viaturas, com os regimes representativos da sua normal operação para cada uma ao utilizar B7. Além disso, é apresentada a média global para cada substância química. Na Tabela 15, estão apresentados os mesmos parâmetros para os 2 equipamentos em estudo, também com a sua média global, ao operar com B7. De referir que, nos equipamentos, todos os ensaios foram realizados considerando a sua temperatura normal de funcionamento.

Estudo sobre a utilização de combustíveis avançados no rendimento e emissões de veículos com motores de ignição por compressão

Tabela 14: Emissões médias dos veículos a operar B7.

Viatura	Regime	% O ₂	ppm CO	ppm NO _x	% CO ₂
AM-11	Ralenti (Quente)	19,29	241,17	125,67	1,26
	1300 RPM (Quente)	18,99	318,50	115,67	1,49
	1800 RPM (Quente)	18,57	366,33	119,00	1,80
AM-12	Ralenti (Frio)	17,28	120,67	280,83	2,75
	Ralenti (Quente)	18,29	49,00	180,50	2,00
	2000 RPM (Quente)	18,07	81,33	120,00	2,16
	3000 RPM (Quente)	17,44	98,33	132,00	2,63
Média Global		18,27	165,04	157,42	2,01

Tabela 15: Emissões médias dos equipamentos a operar B7.

Equipamento	Regime	% O ₂	ppm CO	ppm NO _x	% CO ₂
EE-04	Ralenti	17,23	139,00	139,67	2,79
	Em Carga	15,57	149,33	199,00	4,01
EE-08	Ralenti	17,19	74,00	380,50	2,82
	1700 RPM	13,62	57,00	1133,00	5,44
	2400 RPM	12,88	58,00	1184,00	6,00
Média Global		15,30	95,47	607,23	4,21

Já quando considerada a utilização de B100, os resultados das emissões médias para os veículos e para os equipamentos encontram-se disponíveis nas seguintes Tabela 16 e Tabela 17, respetivamente.

Tabela 16: Emissões médias dos veículos a operar B100.

Viatura	Regime	% O ₂	ppm CO	ppm NO _x	% CO ₂
AM-11	Ralenti (Quente)	19,34	343,17	112,50	1,22
	1300 RPM (Quente)	19,14	366,00	106,17	1,37
	1800 RPM (Quente)	18,71	379,33	112,00	1,69
AM-12	Ralenti (Frio)	17,55	192,83	103,00	2,55
	Ralenti (Quente)	18,26	147,50	92,00	2,02
	2000 RPM (Quente)	17,87	91,67	86,00	2,31
	3000 RPM (Quente)	16,94	99,67	110,67	3,00
Média Global		18,26	219,27	102,63	2,02

Tabela 17: Emissões médias dos equipamentos a operar com B100.

Equipamento	Regime	% O ₂	ppm CO	ppm NO _x	% CO ₂
EE-04	Ralenti	17,18	210,83	134,00	2,82
	Em Carga	15,40	203,33	200,33	4,14
EE-08	Ralenti	17,16	62,00	409,00	2,84
	1700 RPM	13,50	57,00	1269,33	5,53
	2400 RPM	12,39	71,00	1199,00	6,36
Média Global		15,12	120,83	642,33	4,34

Nos seguintes Gráfico 5, Gráfico 6, Gráfico 7 e Gráfico 8 encontram-se representados as emissões com ambos os combustíveis, para os veículos, de O₂, CO, NO_x e CO₂, respetivamente, com a variabilidade de cada substância química, num período de 20 segundos.

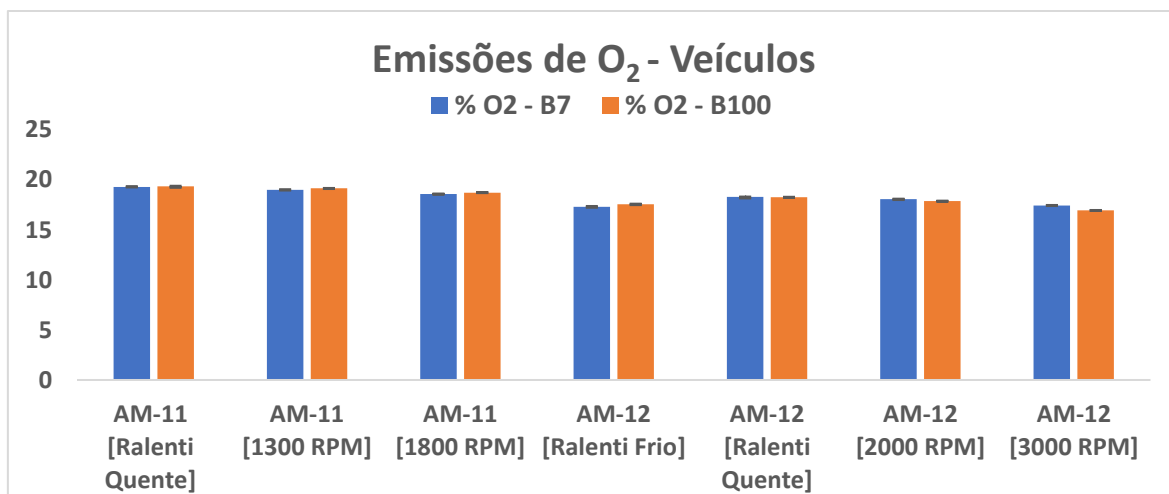


Gráfico 5: Emissões médias de O₂ por veículo.

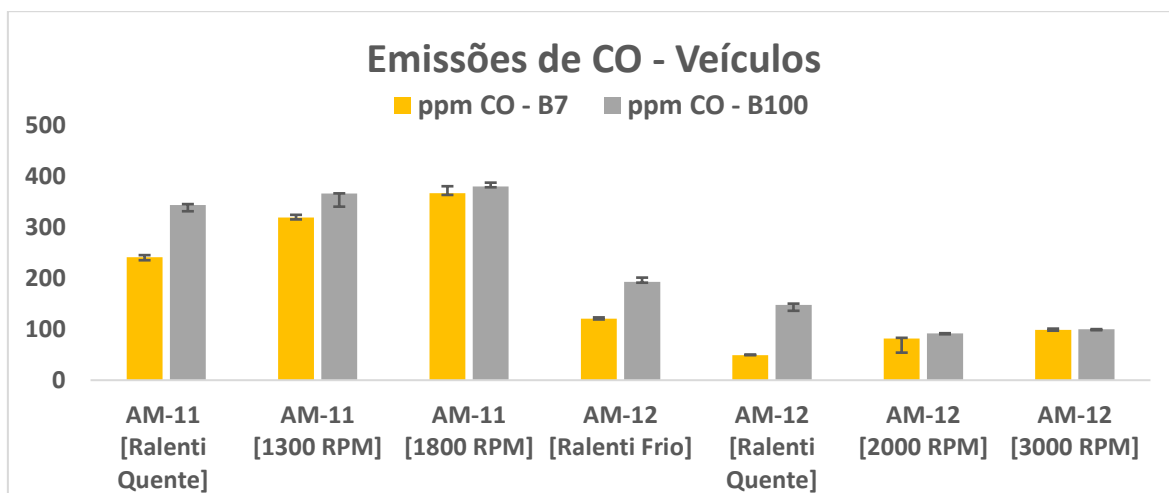


Gráfico 6: Emissões médias de CO por veículo.

Estudo sobre a utilização de combustíveis avançados no rendimento e emissões de veículos com motores de ignição por compressão

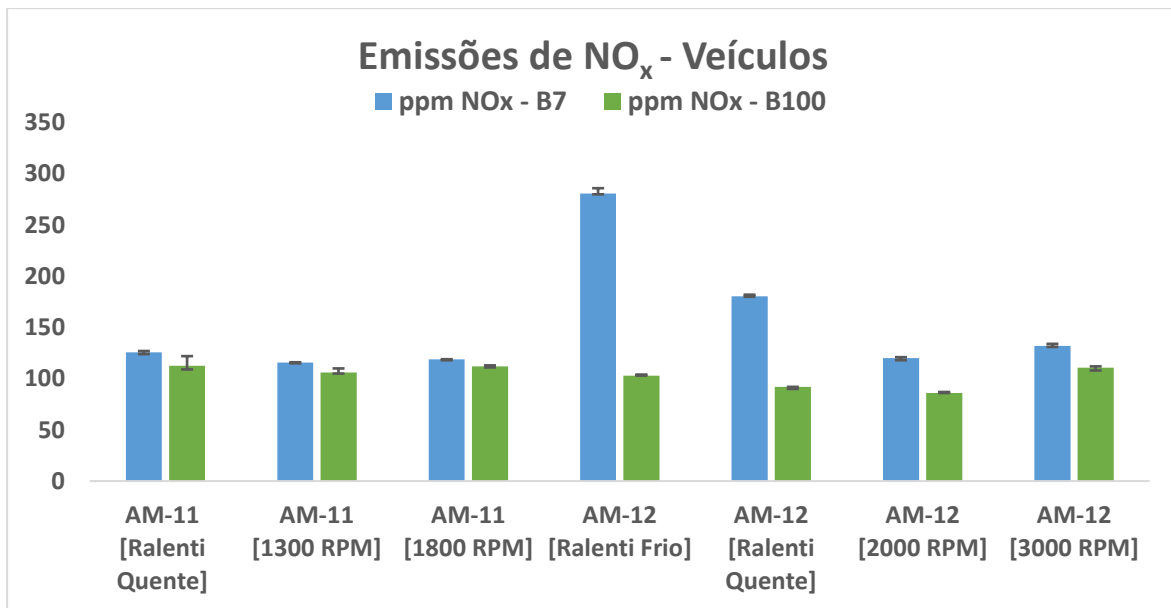


Gráfico 7: Emissões médias de NO_x por veículo.

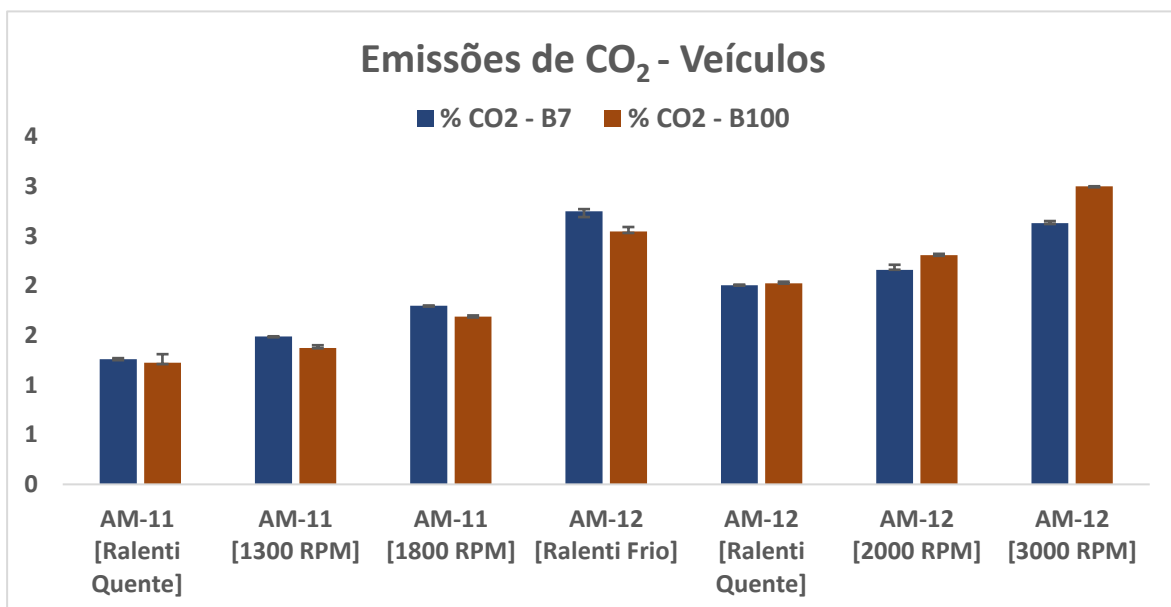


Gráfico 8: Emissões médias de CO₂ por veículo.

De modo idêntico, para os equipamentos, encontram-se apresentados nos seguintes Gráfico 9, Gráfico 10, Gráfico 11 e Gráfico 12 as emissões com ambos os combustíveis, de O₂, CO, NO_x e CO₂, respetivamente com a variabilidade de cada substância química, num período de 20 segundos.

Estudo sobre a utilização de combustíveis avançados no rendimento e emissões de veículos com motores de ignição por compressão

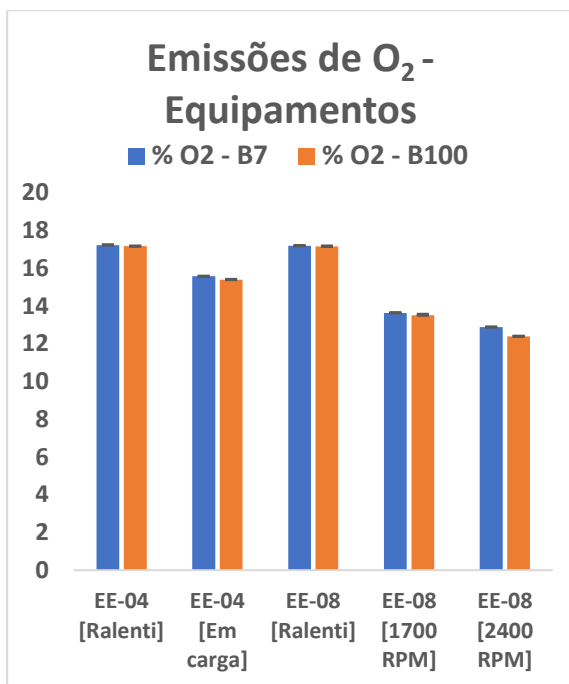


Gráfico 9: Emissões médias de O₂ por equipamento.

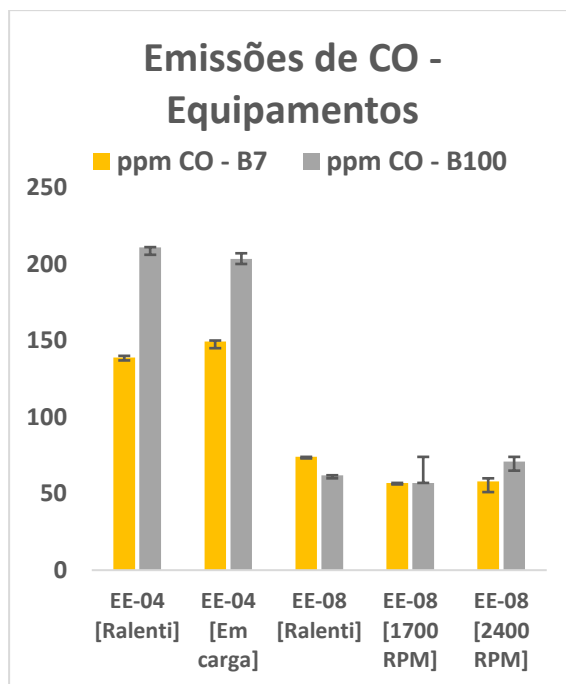


Gráfico 10: Emissões médias de CO por equipamento.

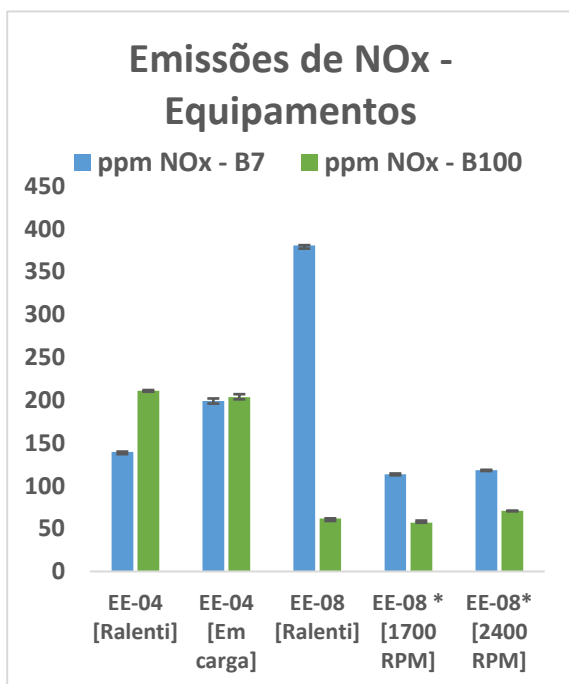


Gráfico 11: Emissões médias de NO_x por equipamento. A emissão de NO_x nos regimes assinalados por "*" deve ser multiplicada por um fator de 10.

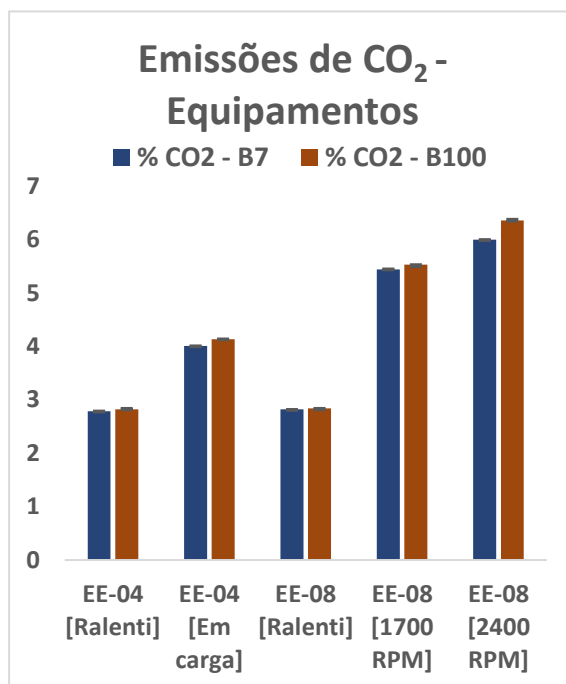


Gráfico 12: Emissões médias de CO₂ por equipamento.

De seguida, são apresentadas as diferenças percentuais nas emissões entre o B100 e o B7, para os veículos, na Tabela 18. Por espécie química, os resultados obtidos encontram-se nos seguintes gráficos Gráfico 13, Gráfico 14, Gráfico 15 e Gráfico 16, para o O₂, CO, NO_x e CO₂, respetivamente .

Tabela 18: Diferença percentual das emissões médias dos veículos.

Viatura	Regime	O ₂	CO	NO _x	CO ₂
AM-11	Ralenti (Quente)	0,24%	42,29%	-10,48%	-2,91%
	1300 RPM (Quente)	0,79%	14,91%	-8,21%	-7,94%
	1800 RPM (Quente)	0,79%	3,55%	-5,88%	-6,12%
AM-12	Ralenti (Frio)	1,53%	59,81%	-63,32%	-7,28%
	Ralenti (Quente)	-0,13%	201,02%	-49,03%	1,00%
	2000 RPM (Quente)	-1,09%	12,70%	-28,33%	6,79%
	3000 RPM (Quente)	-2,86%	1,36%	-16,16%	14,01%
Média Global		-0,06%	32,86%	-34,81%	0,37%

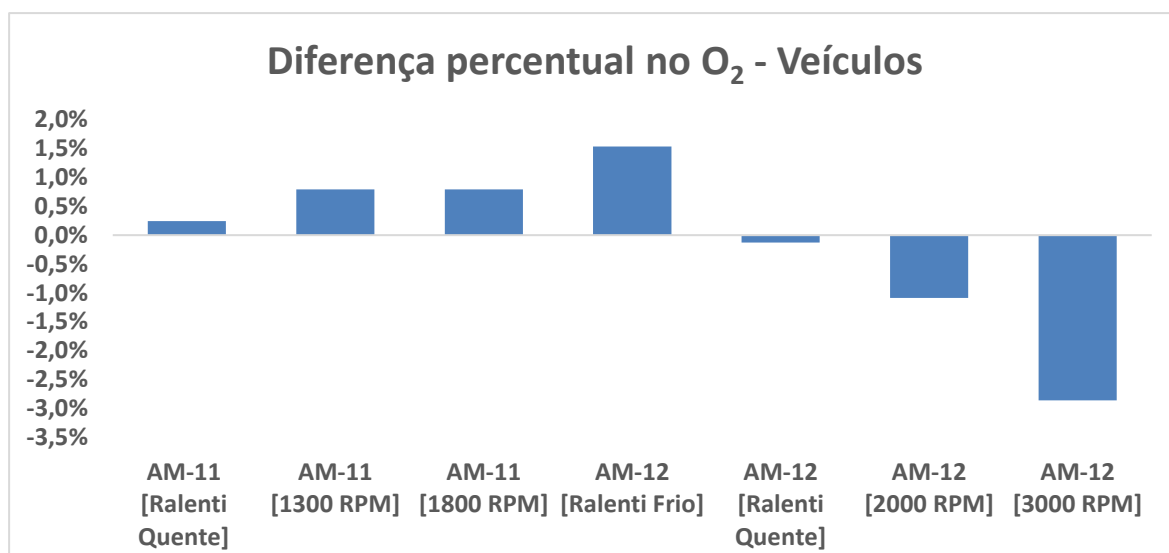


Gráfico 13: Diferença percentual na emissão de O₂ por veículo.

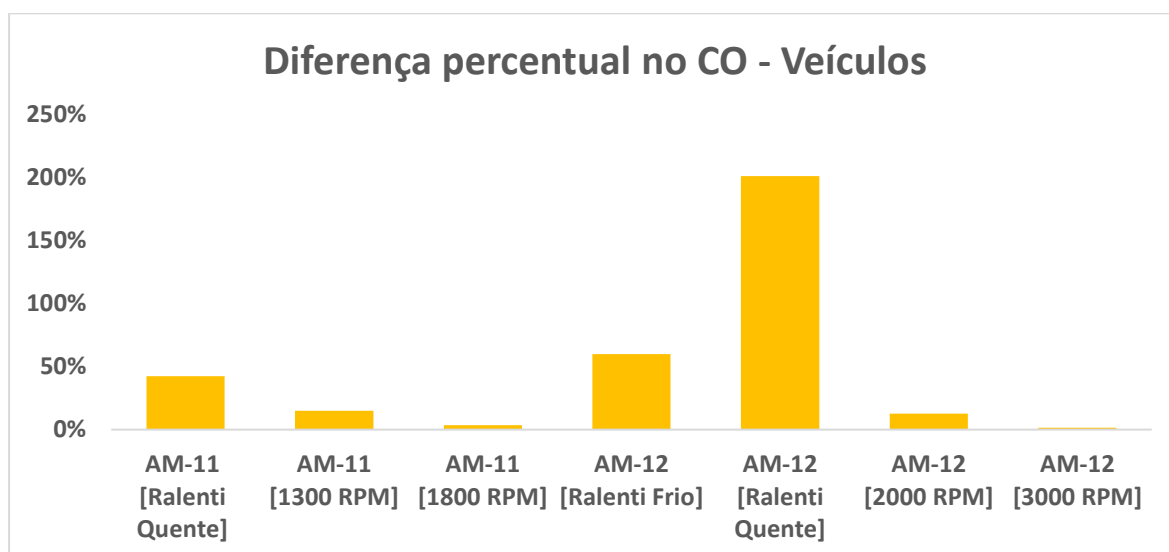


Gráfico 14: Diferença percentual na emissão de CO por veículo.

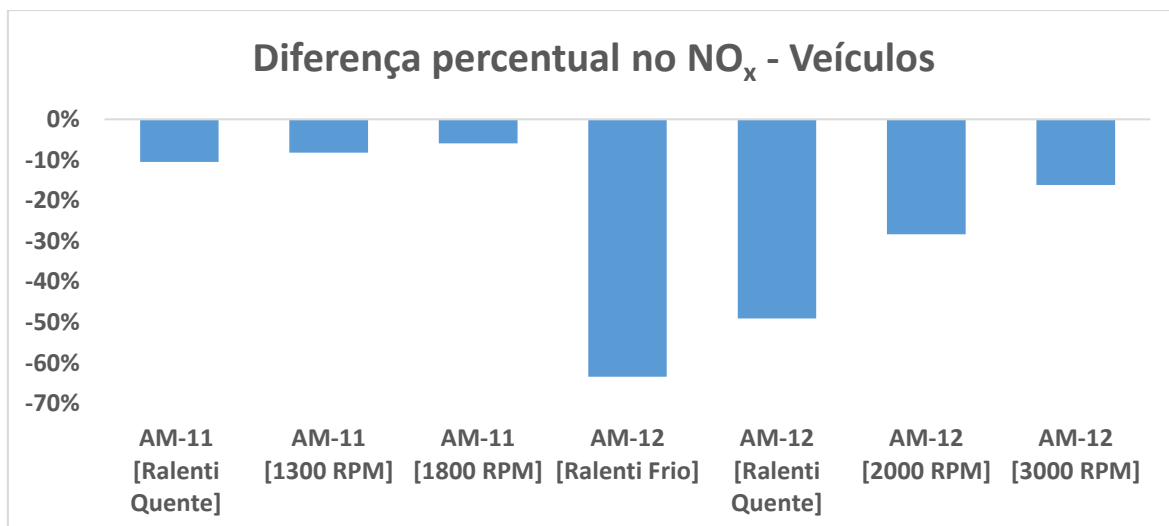


Gráfico 15: Diferença percentual na emissão de NO_x por veículo.

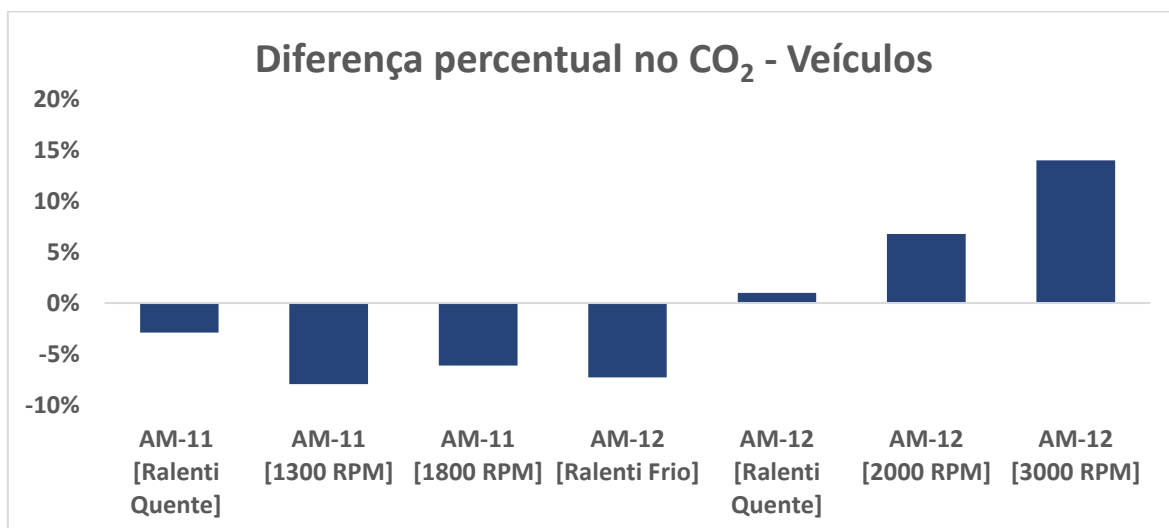


Gráfico 16: Diferença percentual na emissão de CO₂ por veículo.

De igual modo, para os equipamentos, são apresentadas as diferenças percentuais nas emissões entre o B100 e o B7, na Tabela 19. Por espécie química, os resultados obtidos encontram-se nos seguintes gráficos Gráfico 17, Gráfico 18, Gráfico 19 e Gráfico 20, para o O₂, CO, NO_x e CO₂, respetivamente.

Tabela 19: Diferença percentual das emissões médias dos equipamentos.

Equipamento	Regime	O ₂	CO	NO _x	CO ₂
EE-04	Ralenti	-0,27%	51,68%	-4,06%	1,20%
	Em Carga	-1,12%	36,16%	0,67%	3,16%
EE-08	Ralenti	-0,16%	-16,22%	7,49%	0,71%
	1700RPM	-0,88%	0,00%	12,03%	1,65%
	2400RPM	-3,77%	22,41%	1,27%	6,06%
Média Global		-1,12%	26,57%	5,78%	3,01%

Estudo sobre a utilização de combustíveis avançados no rendimento e emissões de veículos com motores de ignição por compressão

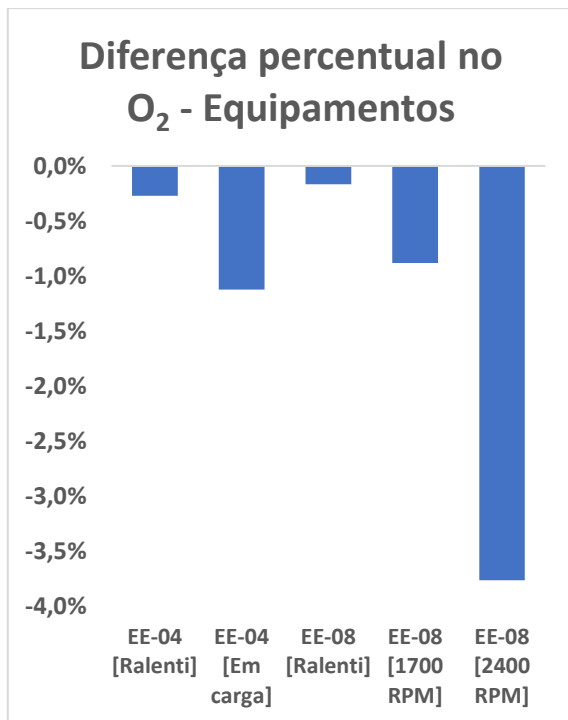


Gráfico 17: Diferença percentual na emissão de O₂ por equipamento.

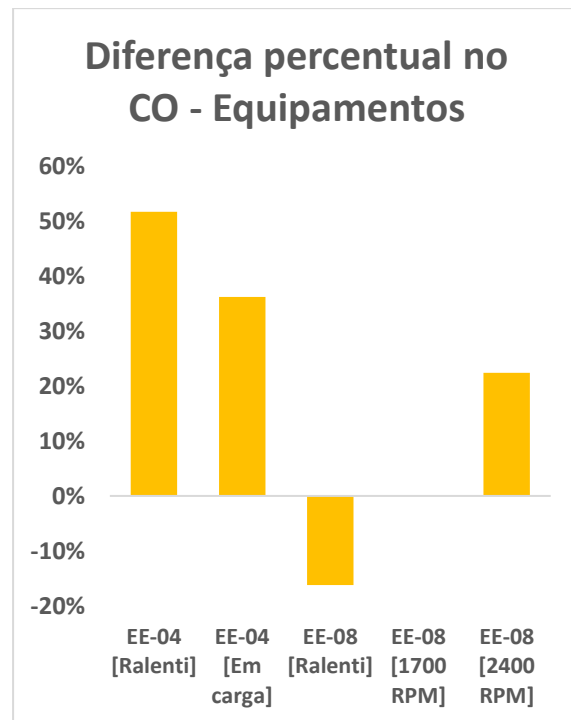


Gráfico 18: Diferença percentual na emissão de CO por equipamento.

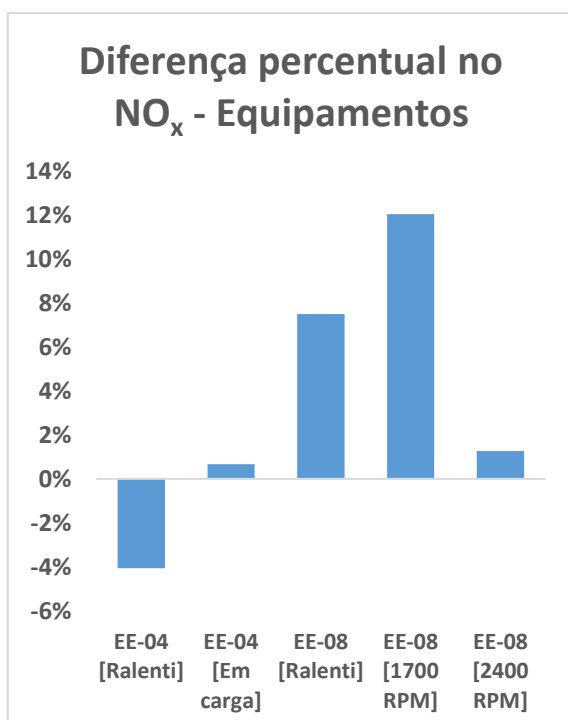


Gráfico 19: Diferença percentual na emissão de NO_x por equipamento.

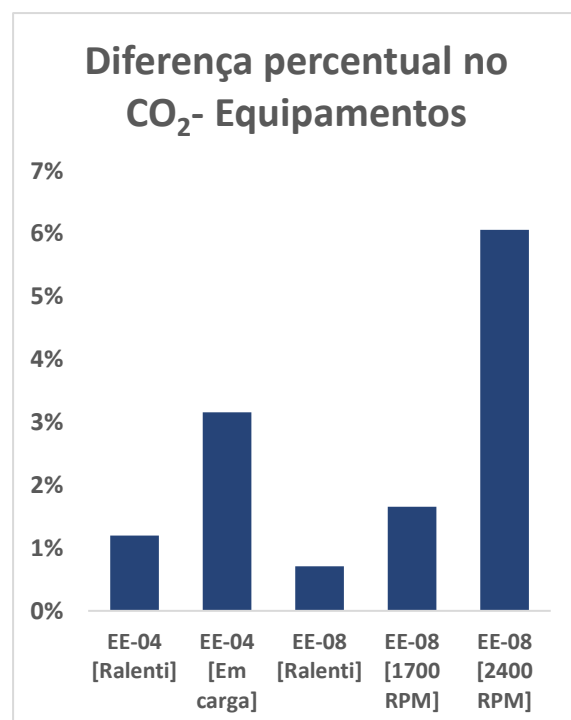


Gráfico 20: Diferença percentual na emissão de CO₂ por equipamento.

As diferenças percentuais médias das emissões para os veículos e equipamentos, operando com B7 e B100, por substância química encontram-se demonstradas na seguinte Tabela 20 e Gráfico 21.

Tabela 20: Diferenças na média global, para ambos os combustíveis, por espécie química.

Tipologia	O ₂	CO	NO _x	CO ₂
Veículos	-0,06%	32,86%	-34,81%	0,37%
Equipamentos	-1,12%	26,57%	5,78%	3,01%

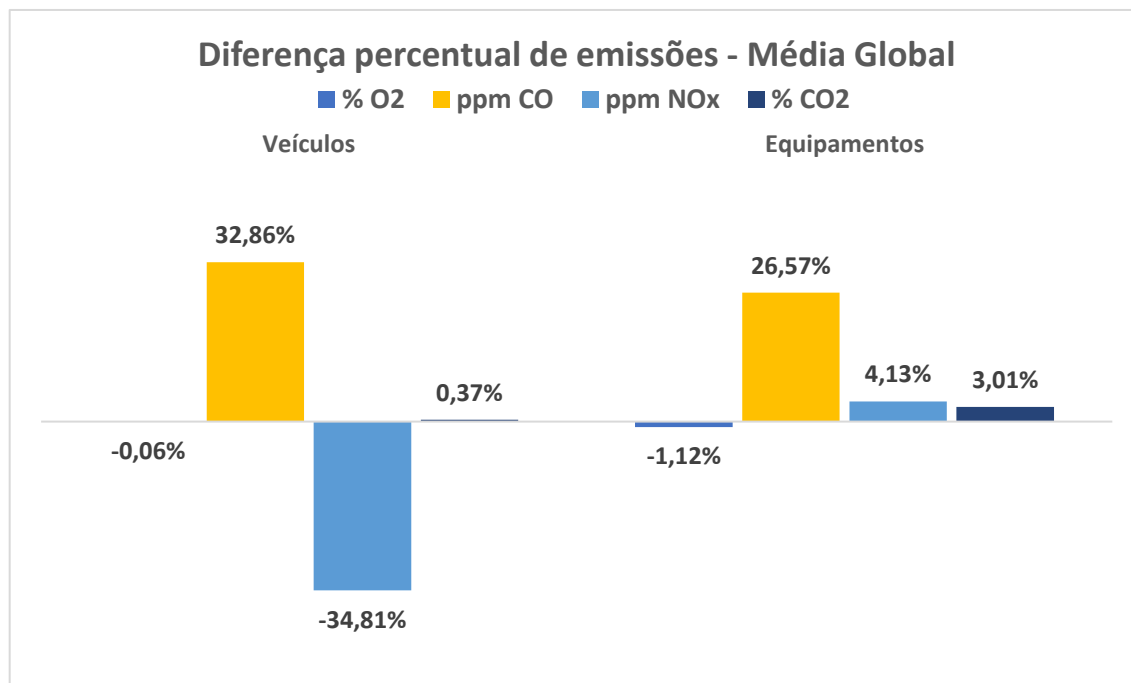


Gráfico 21: Diferenças na média global, para ambos os combustíveis, por espécie química.

Analisando agora as diferenças percentuais por substância química, obteve-se:

Oxigénio (O₂)

As alterações obtidas na emissão de oxigénio (O₂) foram pouco significativas, demonstradas pela diferença na média global de -0,06% nos veículos e de -1,12% nos equipamentos, pelo que, considerou-se um parâmetro inalterado quando utilizado o biodiesel. As diferenças apresentadas podem ser referentes a imprecisões na medição do próprio aparelho de medição, diferenças meteorológicas, entre outras. Ao utilizar o B100, caso fosse mantida a quantidade de combustível injetado por ciclo, seria expetável um aumento da emissão deste composto derivado da maior percentagem de O₂ presente no combustível, no entanto, o mesmo não se verificou.

Monóxido de carbono (CO)

Com a utilização do biodiesel, verificou-se um aumento da emissão monóxido de carbono (CO) em todos os regimes estudados, à exceção de uma medição ao ralenti para o

equipamento EE-08, o mesmo é visível analisando a diferença da média global, tanto para os veículos como para os equipamentos. O aumento da emissão desta substância foi mais significativo ao ralenti, uma vez que este é formado, maioritariamente, ou em zonas ricas e/ou rotações elevadas ou em zonas de carga baixas dada a injeção ineficiente e a baixa temperatura existente (Coelho & Costa, 2007). No entanto, este efeito não seria expectável ao utilizar o biodiesel visto que este promoveria reações de combustão mais completas, diminuindo a emissão deste composto (Aggarwal, 2007). Apesar disso, uma possível explicação para o seu aumento, utilizando o B100, poderá ser dada pela maior viscosidade deste combustível, que dificulta a atomização e posterior queima. A maior dificuldade de atomização é mais preponderante ao ralenti, visto que existe uma menor pressão de injeção neste regime. Apesar dos valores apresentados possuírem um aumento percentual muito significativo (na ordem dos 200%, por exemplo), a emissão de CO em motores Diesel não é notória uma vez que estes operarem sempre em mistura pobre e pelo facto de os valores da concentração desta substância serem bastante reduzidos, é natural e expectável que as diferenças percentuais apresentem valores mais significativos.

Óxidos de nitrogénio (NO_x)

Globalmente ocorreu uma diminuição da emissão de óxidos de azoto (NO_x) em todos os regimes, à exceção do equipamento EE-08, onde a emissão destas substâncias aumentou. O mesmo é visível analisando a diferença na média global nos veículos, que diminui 34,81%, ao contrário do que aconteceu nos equipamentos (aumentou 5,78%), proporcionado apenas pelo equipamento anteriormente referido. Uma explicação para a diminuição da emissão desta substância, será o decrescimento na formação de compostos aromáticos, ao utilizar o biodiesel (Robert L. McCormick, 2002). No entanto, seria expectável um aumento da emissão deste composto (O'Malley & Searle, 2021), pelo fator mais preponderante na sua formação, o aumento temperatura e o aumento da concentração de oxigénio. De ressaltar que para os veículos, a medição dos gases de escape foi realizada sem nenhuma carga aplicada. Esta poderia alterar os resultados, indo de encontro ao expectável. Por outro lado, a existência de sistemas de tratamento de gases levaria a um controlo superior sobre a emissão desta substância.

Dióxido de Carbono (CO₂)

Não é possível correlacionar a emissão de CO₂ com a utilização do biodiesel, em todas os equipamentos e veículos. Se para a viatura AM-11 ocorreu uma diminuição da

Estudo sobre a utilização de combustíveis avançados no rendimento e emissões de veículos com motores de ignição por compressão

emissão deste, nas restantes veículos e equipamentos verificou-se um ligeiro aumento ou uma estabilização da emissão desta substância. As emissões de CO₂ estão diretamente relacionadas com o consumo de combustível e com a relação carbono-hidrogénio (Gumus, Sayin, & Canakci, 2011). Como não foi inequívoco que existisse um aumento deste, seria expectável que houvesse também apenas ligeiras oscilações na emissão deste composto, para os vários veículos e equipamentos. Globalmente houve uma subida, ainda que muito ligeira na emissão de dióxido de carbono, com a utilização de biodiesel, de 0,37% nos veículos e de 3,01% nos equipamentos.

4.1.3. Teste laboratorial de potência

Os resultados dos testes de potência obtidos estão representados no Gráfico 22, onde são visíveis a potência e o binário desenvolvido em função da rotação, para os dois combustíveis em estudo. Todos os resultados apresentados derivam de uma média aritmética de três testes realizados, tal como anteriormente referido na metodologia.

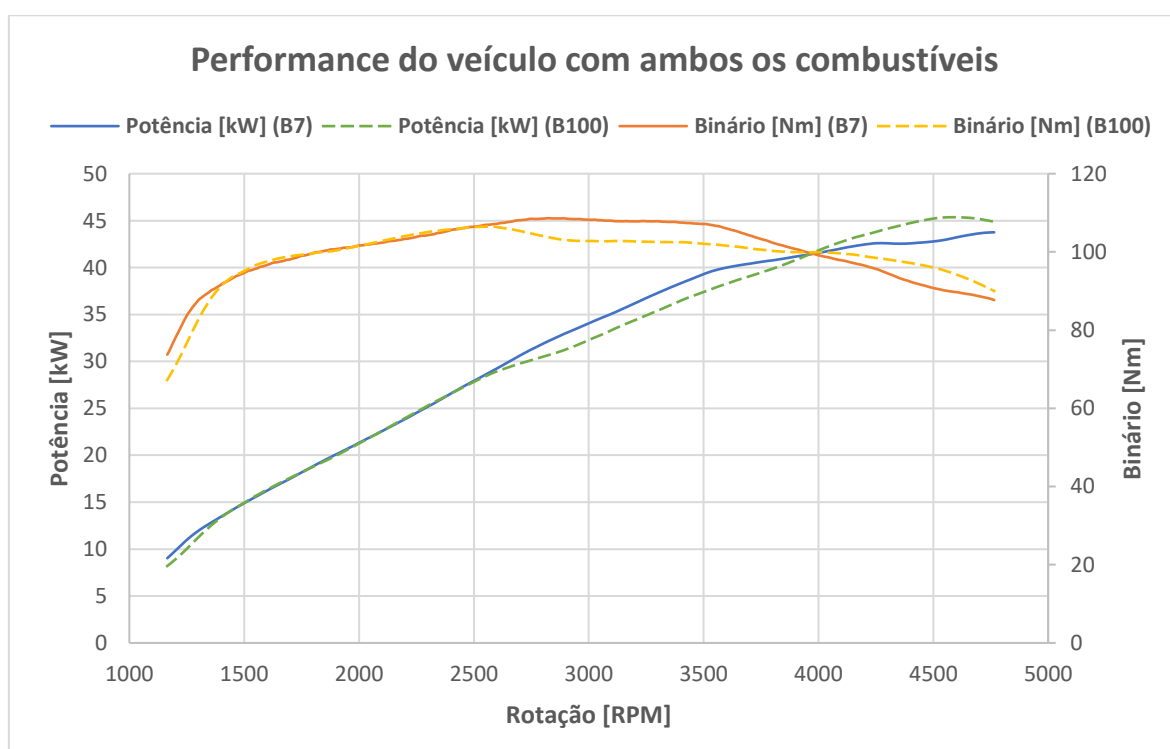


Gráfico 22: Gráfico de potência e binário obtidos.

As diferenças percentuais entre os valores obtidos para a potência normalizada com B7 e B100, encontram-se apresentadas, pontualmente, no seguinte Gráfico 23, desde 1250 RPM até 4750RPM com um passo de 250RPM. Neste caso, quando o valor apresentado é

Estudo sobre a utilização de combustíveis avançados no rendimento e emissões de veículos com motores de ignição por compressão

positivo, o mesmo traduz-se numa maior potência obtida quando o veículo operava com B100, comparativamente com quando operava com B7.

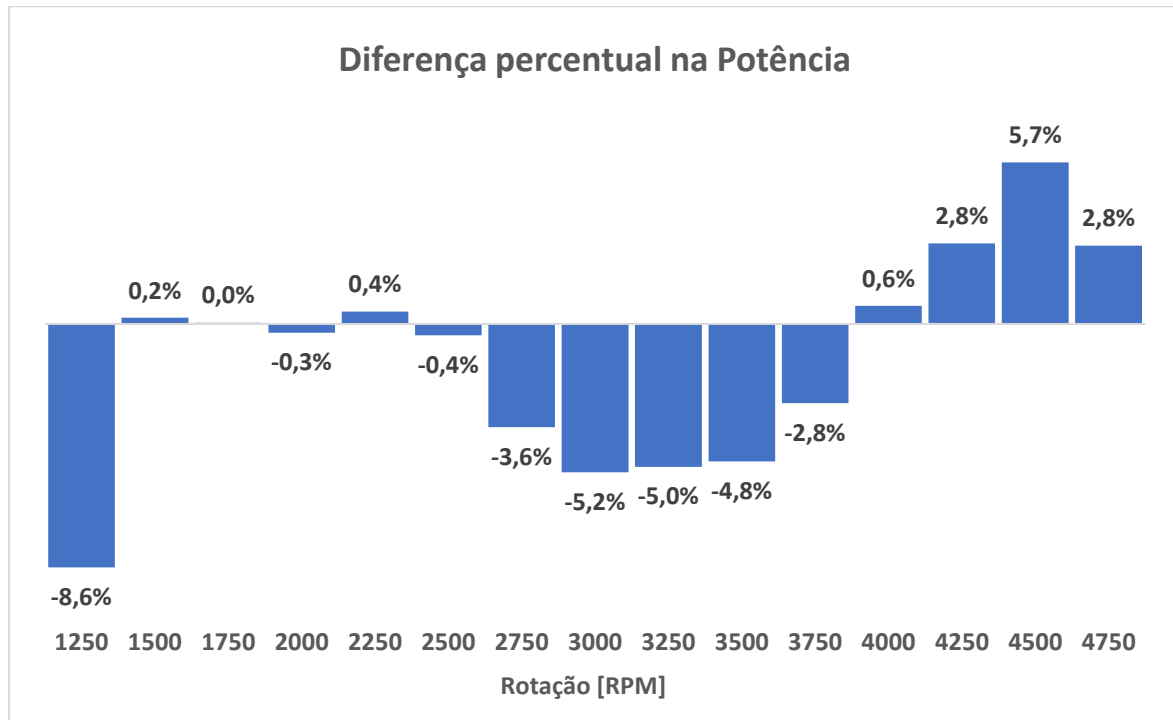


Gráfico 23: Diferença percentual obtida para a potência, para ambos os combustíveis.

Da análise de ambos os gráficos, é visível que as diferenças obtidas entre a utilização de B7 e B100 são reduzidas. Seria expectável uma diminuição da potência, na ordem de grandeza da diferença do poder calorífico do combustível, ou seja, 10% (Aggarwal, 2007). No entanto, o mesmo não se verificou, existindo até uma melhoria na potência debitada, a alto regime, após cerca das 3750 RPM. A baixo regime, a presença de oxigénio no combustível podia melhorar a combustão, aumentando assim o binário e, conseqüentemente, a potência debitada pelo veículo. O aumento de potência a alta rotação não seria expectável, podendo estar relacionado com algum problema na medição, fundamentalmente na parte final do teste onde ocorre a transição da medição da potência na roda e das perdas na transmissão. Para além disso, a uma elevada rotação onde o tempo de injeção é reduzido, o efeito da maior massa volúmica pode levar a uma maior massa de combustível injetado, aumentando a energia disponível, e, conseqüentemente, a produção de binário.

Os resultados numéricos médios para a potência e binário máximo encontram-se apresentadas na seguinte Tabela 21:

Tabela 21: Potência e binário máximo obtidos.

Parâmetro	B7	B100	Unidades
Potência da norma	43,8	45,4	kW
Potência do motor	44	45,2	kW
Potência à roda	29,8	33,2	kW
Potência resistiva	14,1	11,6	kW
@	4760	4590	RPM
Binário da norma	108,7	106,5	Nm
@	2870	2600	RPM

Dos resultados adquiridos, e comparando com o valor inicial de potência máxima produzida pelo motor (52 kW), existe uma diferença ainda significativa de cerca de 10%. O mesmo é indicador do estado já algo degradado do veículo devido à sua normal utilização. Na seguinte Tabela 22 são apresentadas as diferenças percentuais obtidas.

Tabela 22: Diferença percentual obtida para a potência e binário máximo.

Parâmetro	Diferença percentual [%]
Potência da norma	3,8
Potência do motor	2,7
Potência à roda	12,6
Potência resistiva	-18,2
Binário da norma	-2,0

Analisando os resultados numéricos, é visível que, ao contrário do esperado, ao utilizar biodiesel, ocorreu um aumento na potência máxima debitada do motor. O mesmo poderá estar relacionado com alguma intervenção que o veículo tenha sofrido, ou deterioração de um componente crítico, que diminui a potência máxima debitada pelo motor. Seria expectável uma diminuição de cerca de 10% (Aggarwal, 2007), correspondente à diferença do poder calorífico dos combustíveis, quando utilizado o biodiesel. Já o binário máximo obtido, quando utilizado B100, diminuiu, e foi atingido mais cedo, indo de encontro ao expectável.

Para os testes discretos, foram considerados 5 rotações representativas de todo o mapa de potência, igualmente espaçadas por 750 RPM, iniciando a 1250 RPM e terminando a 4250 RPM, à carga máxima. Os resultados obtidos para a potência normalizada e binário estão apresentadas na seguinte Tabela 23, sendo os mesmos, a média aritmética de 3 ensaios, para cada combustível.

Estudo sobre a utilização de combustíveis avançados no rendimento e emissões de veículos com motores de ignição por compressão

Tabela 23: Potência obtida nos ensaios discretos, ao operar com B7 e com B100.

Rotação [RPM]	Potência (norma) [kW] B7	Binário (norma) [Nm] B7	Potência (norma) [kW] B100	Binário (norma) [Nm] B100
1250	12,80	97,33	13,10	100,07
2000	22,87	108,97	23,30	111,13
2750	33,03	114,50	32,00	111,03
3500	40,67	110,87	39,87	108,80
4250	43,93	98,67	46,00	103,37

As diferenças percentuais nos testes discretos e contínuos entre a utilização do B100, comparativamente com o B7, encontram-se apresentadas na seguinte Tabela 24.

Tabela 24: Diferenças percentuais entre combustíveis na potência obtida (normalizada), nos dois testes realizados.

Rotação [RPM]	Potência (norma) Diferença percentual Teste Discreto	Potência (norma) Diferença percentual Teste contínuo
1250	2,34%	-8,57%
2000	1,90%	-0,31%
2750	-3,13%	-3,64%
3500	-1,97%	-4,85%
4250	4,70%	2,84%

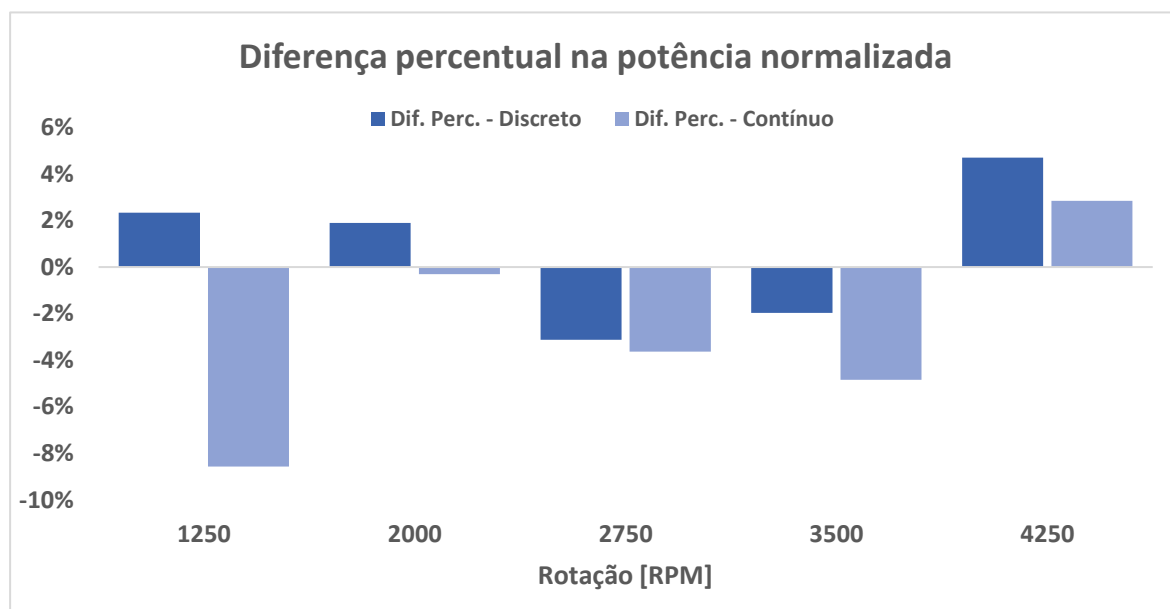


Gráfico 24: Diferenças percentuais na potência normalizada, em ambas tipologias de teste.

Comparativamente com os resultados obtidos nos testes contínuos existem ligeiras diferenças nos valores obtidos. Se, no teste contínuo ocorreu uma diminuição abrupta no regime mais baixo, o mesmo não foi obtido no teste discreto ocorrendo até uma ligeira melhoria da potência debitada. O mesmo podia estar relacionado com dificuldades no motor

Estudo sobre a utilização de combustíveis avançados no rendimento e emissões de veículos com motores de ignição por compressão

na fase inicial da realização do teste de potência contínuo. Nas restantes rotações ocorrem variações mínimas decorrentes da incerteza do aparelho de medição presente no banco de potência, e das diferenças no método realização do teste de potência. Globalmente, as realizações destes testes discretos vieram ainda mais credibilizar os resultados obtidos nos testes contínuos demonstrando as mesmas conclusões retiradas anteriormente.

4.1.4. Teste laboratorial de consumo – Ciclo WLTP

Os resultados correspondentes ao ciclo WLTP, são apresentados na Tabela 25, ou seja, para cada perfil de velocidade é demonstrado os valores dos fluxos mássicos médios de combustível obtidos, para B7 e B100, assim como a diferença percentual obtida do B100, comparativamente com o B7. De igual modo, os resultados estão também apresentados no Gráfico 25, para os fluxos mássicos de combustível obtidos, e no Gráfico 26 para as diferenças percentuais. Todos estes, tal como referido na metodologia, correspondem a uma média aritmética de 3 ciclos realizados para cada combustível.

Tabela 25: Fluxos mássicos e diferenças percentuais obtidas no ciclo WLTP, para B7 e B100.

Perfis de velocidade	Fluxo mássico B7 [g/s]	Fluxo mássico B100 [g/s]	Diferença percentual
Baixa	0,365	0,383	4,70%
Média	0,548	0,562	2,71%
Elevada	0,705	0,732	3,80%
Extra Elevada	1,206	1,219	1,06%

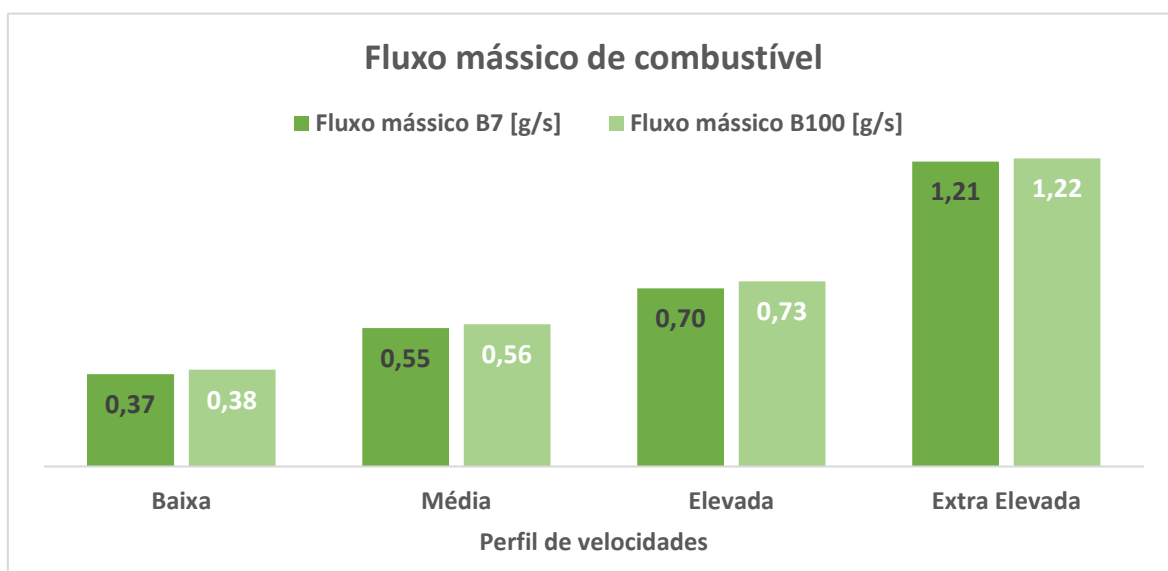


Gráfico 25: Fluxo mássico médio obtido, por perfil de velocidades, para ambos os combustíveis.

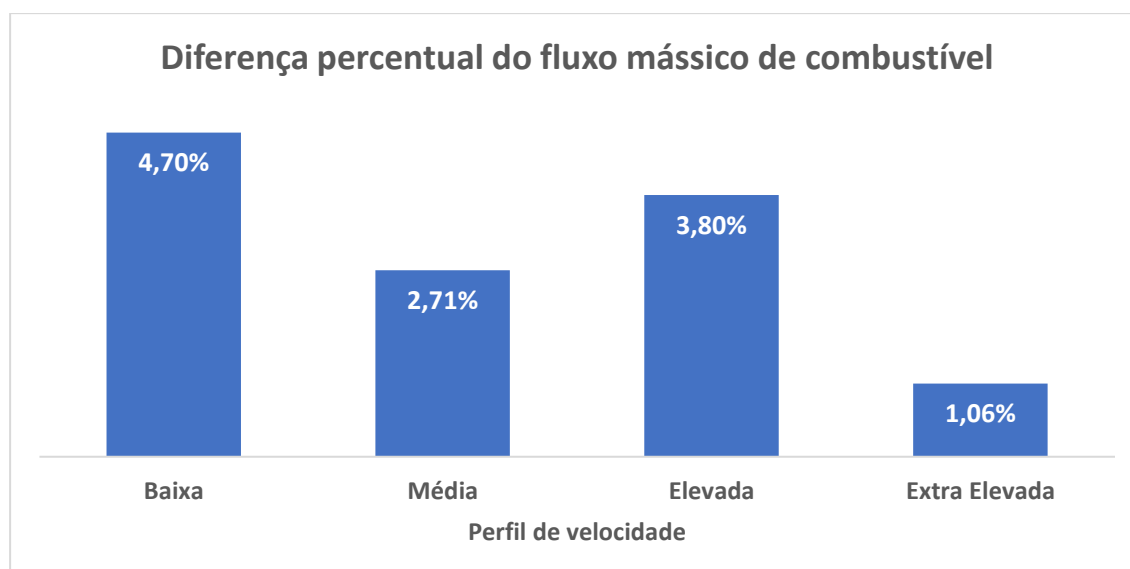


Gráfico 26: Diferença percentual do fluxo mássico entre combustíveis, por perfil de velocidades.

Da análise dos resultados é possível constatar um aumento no fluxo mássico médio de combustível em todos os perfis de velocidade considerados desde 1% a 5% resultando num aumento médio de 3,2%. Esta diferença tem maior impacto na situação de perfil baixo de velocidades, diminuindo, com o aumento da velocidade, ocorrendo um ligeiro aumento no perfil de velocidade elevado. O aumento de consumo de combustível pode ser explicado pelo menor poder calorífico presente no biodiesel. No entanto, e visto que o resultado é mostrado numa base mássica, faz sentido analisar também o consumo numa base volúmica, como é considerado na utilização dos veículos. Os consumos médios de combustível obtidos, considerando uma massa volúmica típica, para o B7, de 839,8 kg/m³ e, para o B100, de 881,7 kg/m³, estão visíveis no seguinte Tabela 26 e, graficamente, no Gráfico 27. As diferenças percentuais estão também visíveis na Tabela 26 e no Gráfico 28.

Tabela 26: Consumos e diferenças percentuais obtidas no ciclo WLTP, para B7 e B100.

Perfis de Velocidade	Consumo médio [l/100km] - B7	Consumo médio [l/100km] - B100	Diferença percentual
Baixa	7,883	7,802	-1,03%
Média	5,759	5,616	-2,47%
Elevada	5,836	5,688	-2,53%
Extra Elevada	6,567	6,441	-1,93%

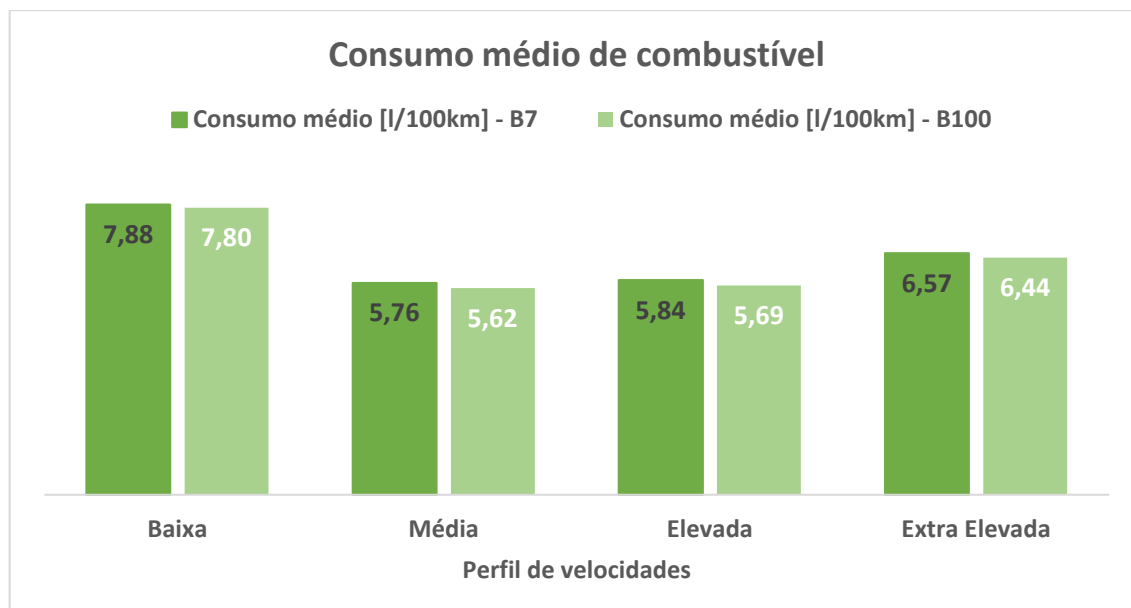


Gráfico 27: Consumo médio volumétrico de combustível, no ciclo WLTP.

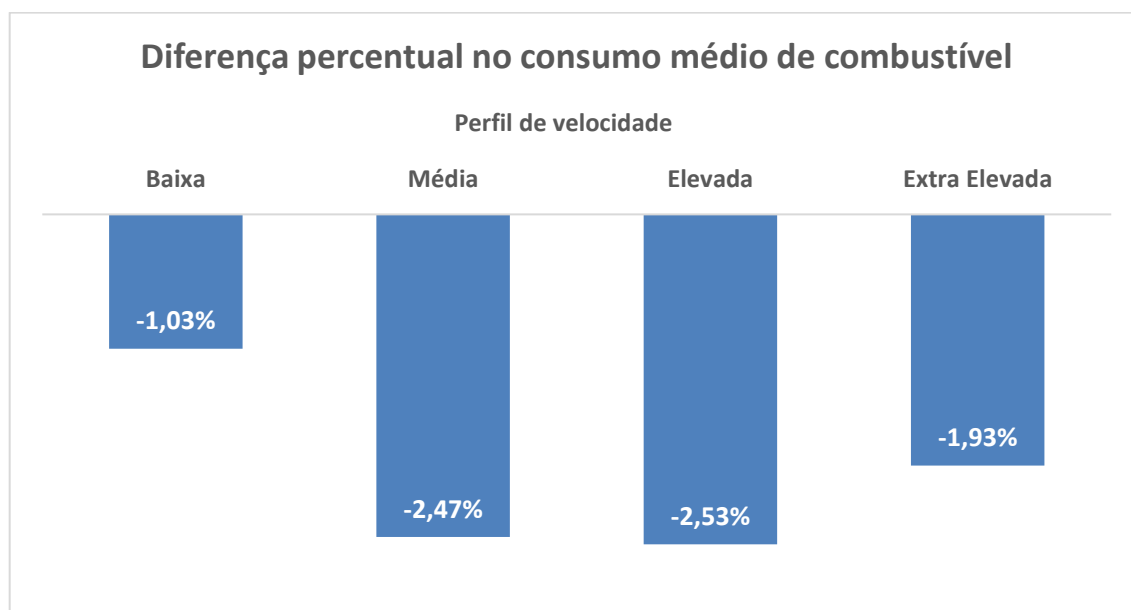


Gráfico 28: Diferenças percentuais no consumo médio volumétrico de combustível, no ciclo WLTP.

Tal como anteriormente referido, as diferenças na massa volúmica dos combustíveis, demonstram-se no consumo de combustível, onde, após utilizar o B100, este diminuiu. No entanto, esta diminuição foi muito diminuta, rondando apenas 1 a 2%, tornando-se, praticamente insignificante e dentro da gama de incerteza da medição. Os resultados de consumo de combustível obtidos no teste WLTP estão de encontro aos obtidos, neste mesmo estudo, nos testes de consumo em condições reais de estrada à frota de veículos, onde, ao utilizar o biodiesel não foi detetado um aumento do consumo de combustível.

4.2. Caso de estudo B

Neste caso de estudo, serão apresentados e discutidos os resultados para o consumo médio de combustível, para as emissões de gases de escape, para as análises ao óleo lubrificante, e, por fim, serão apresentadas as avarias reportadas.

4.2.1. Monitorização do consumo de combustível

Para obtenção dos valores médios de consumo, ao contrário do estudo anterior, considerou-se a quantidade de combustível atestado no período de estudo e a distância percorrida entre o primeiro e o último abastecimento, por veículo e por combustível. Para termos comparativos, e do mesmo modo, foi obtida a média do consumo, ao utilizar o diesel rodoviário, durante, sensivelmente, os dois meses que antecederam a realização do estudo (dezembro e janeiro). Para a viatura SC foi considerado o período de outubro e novembro, dado que o resultado obtido para o consumo no período anteriormente referido era muito superior ao expectável. Assim sendo, os resultados obtidos encontram-se apresentados nas seguintes tabelas, por viaturas, TG - Tabela 27, IX - Tabela 28 e SC - Tabela 29. Estes incluem a distância percorrida, o combustível abastecido, a média do consumo, e a diferença percentual deste, por combustível, comparativamente com o B7 utilizado como referência. Os resultados apresentados da plataforma de gestão de frota são referentes ao combustível consumido, que justifica ligeiras diferenças face ao método de estudo nos restantes veículos (combustível abastecido). De igual modo, são obtidas ligeiras diferenças na distância percorrida, uma vez que, para os restantes veículos é utilizada a distância percorrida entre abastecimentos e não a distância percorrida na data enunciada. Nos valores em litros de combustível abastecidos apresentados, já estão incluídos atestos que ocorreram, indevidamente, com diesel rodoviário. Na viatura TG foram atestados 181 litros, no período de operação com B30, na viatura IX, foram atestados 50 litros no período de operação com B30 e 100 litros no período de utilização do B50 e, por último, na viatura SC, foram atestados 70 litros no período de operação com B30 e 180 litros no período de utilização B50. Estes abastecimentos não comprometem o período de análise em causa, no entanto, é necessário tê-los em conta, dada a sua influência na média do consumo de combustível.

Estudo sobre a utilização de combustíveis avançados no rendimento e emissões de veículos com motores de ignição por compressão

Tabela 27: Média do consumo para a viatura TG.

Combustível / Período	Distância percorrida [km]	Combustível abastecido [l]	Média do consumo [l/100km]	Diferença Percentual [%]
B7 (6 dez – 26 jan)	7333	2226	30,36	
B30 (24 fev – 9 mai)	12953	4134	31,92	5,14
B50 (10 mai – 4 jul)	10837	3484	32,15	5,90

Tabela 28: Média do consumo para a viatura IX.

Combustível / Período	Distância percorrida [km]	Combustível abastecido [l]	Média do consumo [l/100km]	Diferença Percentual [%]
B7 (7 dez – 7 fev)	11049	4314	39,05	
B30 (29 mar – 9 mai)	7374	2926	39,69	1,65
B50 (10 mai – 10 jul)	10778	4315,13	40,04	2,53

Plataforma de gerenciamento de Frota

B7 (7 dez – 7 fev)	11211	4691	41,84	
B30 (29 mar – 9 mai)	7541	2992	39,67	-5,19
B50 (10 mai – 10 jul)	11035	4428	40,12	-4,12

Tabela 29: Média do consumo para a viatura SC.

Combustível / Período	Distância percorrida [km]	Combustível abastecido [l]	Média do consumo [l/100km]	Diferença Percentual [%]
B7 (3 out – 6 nov)	9577	2840,03	29,65	
B30 (29 mar – 9 mai)	8035	2369,92	29,49	-0,56
B50 (10 mai – 10 jul)	11382	3484	30,37	2,41

Do período em análise, totalizando pelas três viaturas, foram assim consumidos cerca de 9400 litros de B30 e 11300 litros de B50, percorrendo cerca de 28 000 quilómetros a B30 e 33 000 quilómetros com B50.

Analisando os resultados obtidos, é possível retirar algumas conclusões. Globalmente, as três viaturas percorreram distâncias idênticas entre elas, nos períodos de análise com exceção da viatura TG ao utilizar B30, visto que o utilizou mais tempo que as restantes. Iniciando com a viatura TG, é possível visualizar que, ao utilizar B30, ocorre um aumento do consumo de combustível de cerca de 5 %. No entanto, a diferença entre B30 e B50 é diminuta. Para a viatura IX, é visível que os dados obtidos na plataforma de gerenciamento de frota se aproximam bastante aos obtidos no estudo, garantindo confiança no método utilizado. O mesmo apenas não se verifica no período de análise com B7. Apesar disso, e comparando com os valores registados nos abastecimentos, é novamente visível um

ligeiro aumento do consumo de combustível, desta vez na ordem de 2%, quando operava com B30. Este é repetido quando ocorre a passagem para B50, existindo um aumento de 3% face a B7. Para a última viatura, a SC, ocorreu um decréscimo no consumo de combustível de B7 para B30 de cerca de 0,5%. Para o B50, e comparativamente com o B7, ocorreu um acréscimo no consumo médio de combustível, de cerca de 2%. Este ligeiro decréscimo pode estar relacionado com um fator externo ao combustível, como uma intervenção no veículo, alteração do seu condutor, alteração da sua rota, alteração da carga transportada, tempo gasto com o motor a trabalhar ao ralenti, alteração das condições climatéricas, entre outros. Estes aspetos, fazem ocorrer variações no consumo do veículo, ainda que este operasse com o mesmo combustível. Gráficamente, os mesmos resultados, das médias do consumo obtidas e das diferenças percentuais, encontram-se apresentados nos seguintes Gráfico 29 e Gráfico 30, respetivamente. Neste último é também apresentada a diferença percentual global com B30 e com B50.

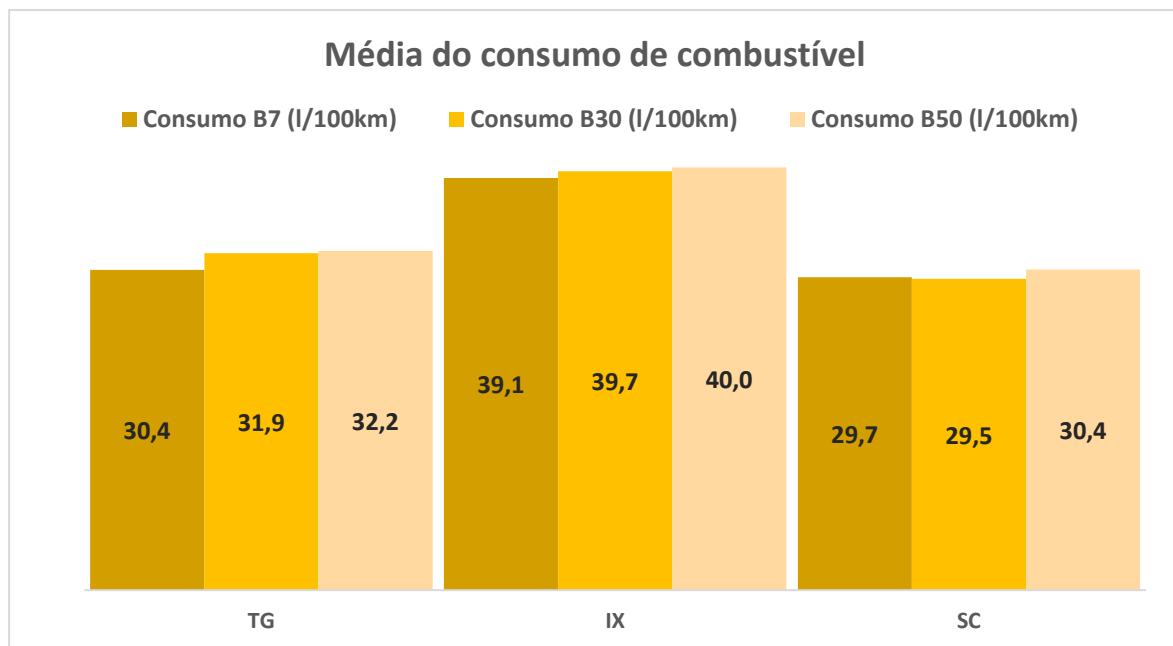


Gráfico 29: Consumo médio das viaturas, por combustível.

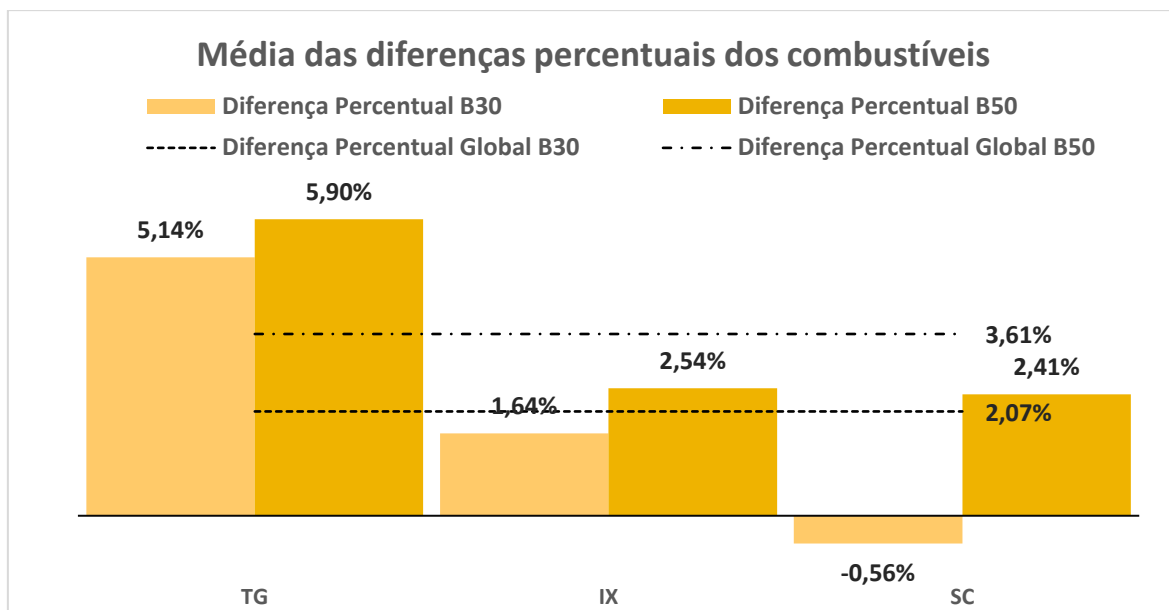


Gráfico 30: Diferenças percentuais das viaturas, por veículo.

Da análise do Gráfico 30, visualiza-se um aumento global do consumo, com o aumento do teor do biodiesel, de 2% com B30 e 3,6% com B50. O mesmo, só não foi mais pronunciado graças ao decréscimo do consumo obtidos na viatura SC. Com a utilização de biodiesel puro (B100) seria expectável um aumento do consumo próximo da diferença do poder calorífico dos combustíveis (10%) (Aggarwal, 2007). Visto que, no máximo, foi utilizado B50, a diferença nunca seria tão pronunciada. Na viatura TG, ocorre ainda um aumento significativo, próximo do esperado. Para viatura IX e SC, esta diferença não foi tão evidente. É assim visível uma tendência de ligeiro aumento do consumo de combustível, com a maior incorporação de biodiesel, no entanto, não tão significativa quanto seria expectável.

Entre os dois casos de estudo, são visíveis algumas similaridades, uma vez que, tanto num como no outro, existiram veículos em que se verificou um aumento do consumo de combustível, enquanto noutros verificou-se um decréscimo. A diferença percentual global obtida, ao utilizar B50, neste caso de estudo, foi ligeiramente superior à obtida ao utilizar B100 no caso de estudo A, apesar da diferente tipologia e idade dos veículos em estudo. Conforme anteriormente referido, existe uma série de variáveis que influenciam o consumo de combustível, sem alterar a percentagem de biodiesel incorporado neste, que aumentam a variabilidade da média do consumo obtido. Assim sendo, não é evidente que, ao analisar estes casos de estudo, numa utilização normal do veículo, com um combustível com maior teor de biodiesel (B30 ou B50 ou B100, nestes dois casos de estudo), exista obrigatoriamente um aumento do consumo de combustível considerável. Os resultados obtidos em ambos os

Estudo sobre a utilização de combustíveis avançados no rendimento e emissões de veículos com motores de ignição por compressão

estudos vêm em linha com os obtidos em (Serrano, Santana, Carvalho, & Correia, 2023) e (Shen, et al., 2018).

4.2.2. Medição das emissões de gases de escape

Na Tabela 30 estão apresentados os resultados obtidos das emissões de O₂, CO, NO_x e CO₂ para as 3 viaturas, com os regimes representativos da sua normal operação, ao ralenti e a 1500 RPM, tanto a “frio” (logo após o veículo ser posto a trabalhar) como à sua temperatura normal de funcionamento, mais à frente designada de “quente” (no final de percorrer um percurso determinado, igual para todos as viaturas e, mais tarde, repetido com os restantes combustíveis) a operar com B7. Os resultados apresentados são a média aritmética de 5 segundos, após estabilização da medição. Adicionalmente, é apresentada a média global para cada substância química.

Tabela 30: Emissões médias dos veículos a operar com B7.

Viatura	Regime	% O ₂	ppm CO	ppm NO _x	% CO ₂
TG	Ralenti (Frio)	16,99	1050,00	620,10	2,96
	Ralenti (Quente)	19,16	71,00	290,40	1,47
	1500 RPM (Frio)	15,74	966,00	703,80	3,89
	1500 RPM (Quente)	16,63	451,00	171,50	3,29
IX	Ralenti (Frio)	18,19	775,00	261,00	2,23
	Ralenti (Quente)	19,10	33,00	208,83	1,76
	1500 RPM (Frio)	17,11	415,67	264,33	3,26
	1500 RPM (Quente)	17,01	354,67	135,00	3,10
SC	Ralenti (Frio)	17,81	258,50	778,83	2,46
	Ralenti (Quente)	19,05	143,00	382,83	1,66
	1500 RPM (Frio)	16,69	193,67	709,50	3,40
	1500 RPM (Quente)	18,41	155,67	325,33	2,17
Média Global		17,66	405,60	404,29	2,64

Analisando estes resultados é visível o efeito do sistema de tratamento de gases, já que, a quente, o mesmo encontra-se em pleno funcionamento, diminuindo a emissão CO e de NO_x. De igual modo, já não ocorre o enriquecimento da mistura existente a frio, evidente no aumento da emissão de O₂ e na diminuição da emissão de CO₂ e CO a quente.

Já quando considerada a utilização de B30, os resultados das emissões para os veículos encontram-se disponíveis na seguinte Tabela 31 e para B50 na Tabela 32.

Tabela 31: Emissões médias dos veículos a operar com B30.

Viatura	Regime	% O ₂	ppm CO	ppm NO _x	% CO ₂
TG	Ralenti (Frio)	17,96	1047,67	297,50	2,27
	Ralenti (Quente)	19,25	66,00	278,17	1,50
	1500 RPM (Frio)	16,56	652,17	308,00	3,28
	1500 RPM (Quente)	16,65	416,00	135,00	3,39
IX	Ralenti (Frio)	17,52	1183,33	332,67	2,63
	Ralenti (Quente)	19,39	43,50	143,67	1,44
	1500 RPM (Frio)	16,15	817,83	517,50	3,61
	1500 RPM (Quente)	17,73	331,00	126,83	2,69
SC	Ralenti (Frio)	17,65	286,00	760,83	2,78
	Ralenti (Quente)	19,22	156,00	365,00	1,70
	1500 RPM (Frio)	16,82	191,00	645,00	3,32
	1500 RPM (Quente)	18,53	154,50	308,33	2,22
Média Global		17,79	445,42	351,54	2,57

Tabela 32: Emissões médias dos veículos a operar com B50.

Viatura	Regime	% O ₂	ppm CO	ppm NO _x	% CO ₂
TG	Ralenti (Frio)	17,17	898,83	527,67	2,95
	Ralenti (Quente)	19,24	50,33	243,00	1,56
	1500 RPM (Frio)	16,25	600,00	374,50	3,62
	1500 RPM (Quente)	16,38	567,50	87,00	3,63
IX	Ralenti (Frio)	17,46	1169,00	377,83	2,82
	Ralenti (Quente)	18,91	41,83	210,83	1,70
	1500 RPM (Frio)	16,49	646,67	331,67	3,57
	1500 RPM (Quente)	17,14	262,67	151,00	3,18
SC	Ralenti (Frio)	17,75	271,33	646,33	2,64
	Ralenti (Quente)	19,10	112,00	329,33	1,71
	1500 RPM (Frio)	16,86	162,50	592,00	3,31
	1500 RPM (Quente)	18,35	109,00	315,00	2,33
Média Global		17,59	407,64	348,85	2,75

Nos seguintes Gráfico 31, Gráfico 32, Gráfico 33 e Gráfico 34 encontram-se apresentadas as emissões de O₂, CO, NO_x e CO₂ para a viatura TG, respetivamente. O mesmo para a viatura IX nos seguintes, Gráfico 35, Gráfico 36, Gráfico 37 e Gráfico 38,

Estudo sobre a utilização de combustíveis avançados no rendimento e emissões de veículos com motores de ignição por compressão

para a viatura SC nos seguintes Gráfico 39, Gráfico 40, Gráfico 41 e Gráfico 42, com a variabilidade de cada substância química, num período de 20 segundos.

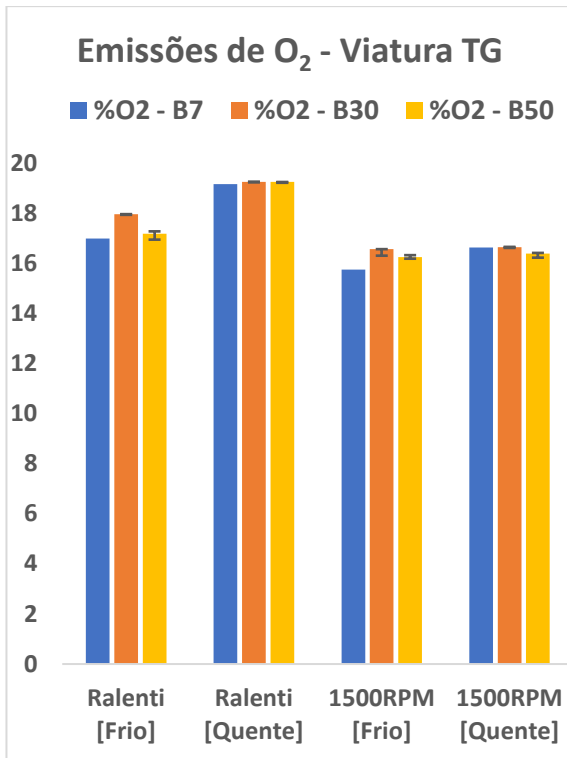


Gráfico 31: Emissão de O₂ para a viatura TG.

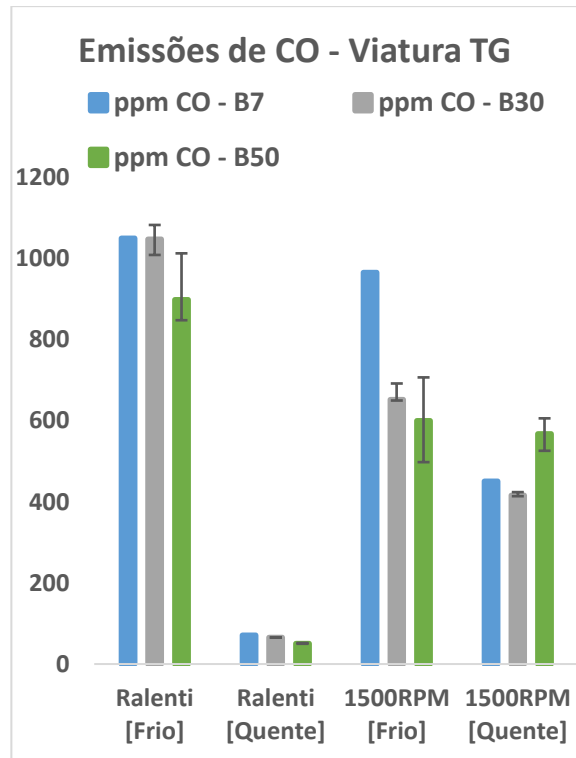


Gráfico 32: Emissão de CO para a viatura TG.

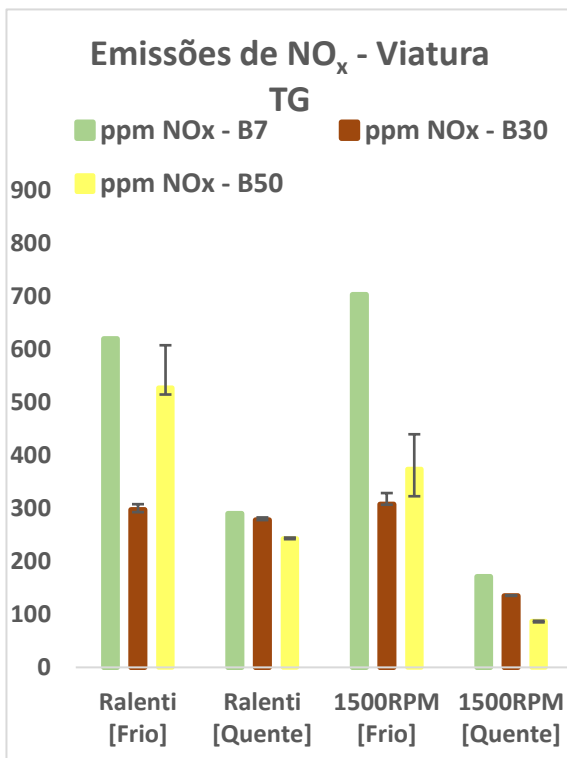


Gráfico 33: Emissão de NO_x para a viatura TG.

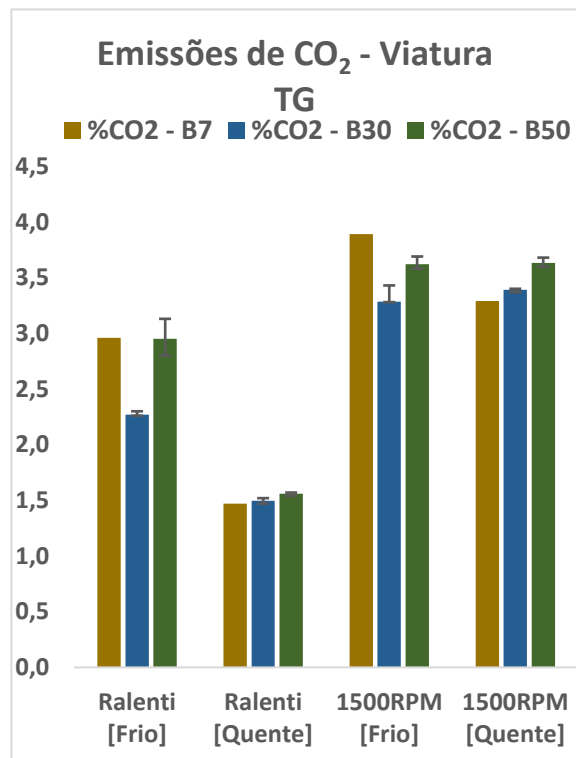


Gráfico 34: Emissão de CO₂ para a viatura TG.

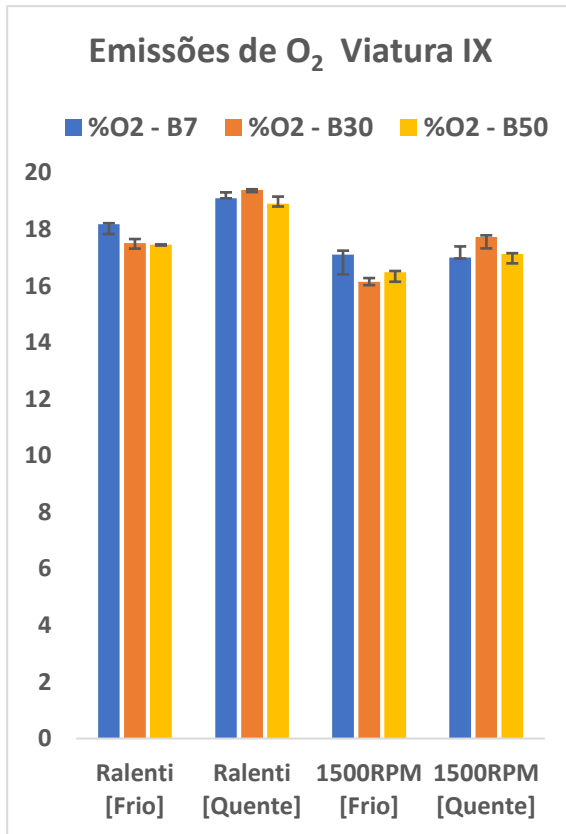


Gráfico 35: Emissão de O₂ para a viatura IX.

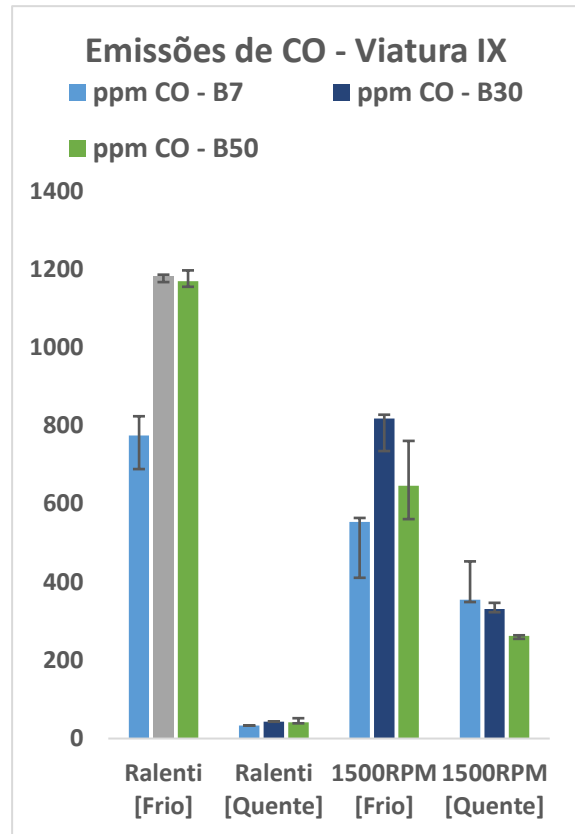


Gráfico 36: Emissão de CO para a viatura IX.

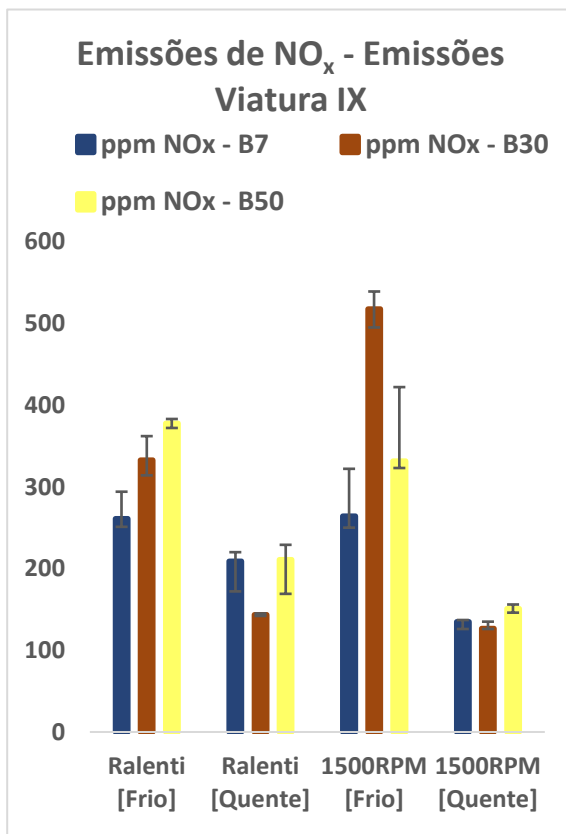


Gráfico 37: Emissão de NO_x para a viatura IX.

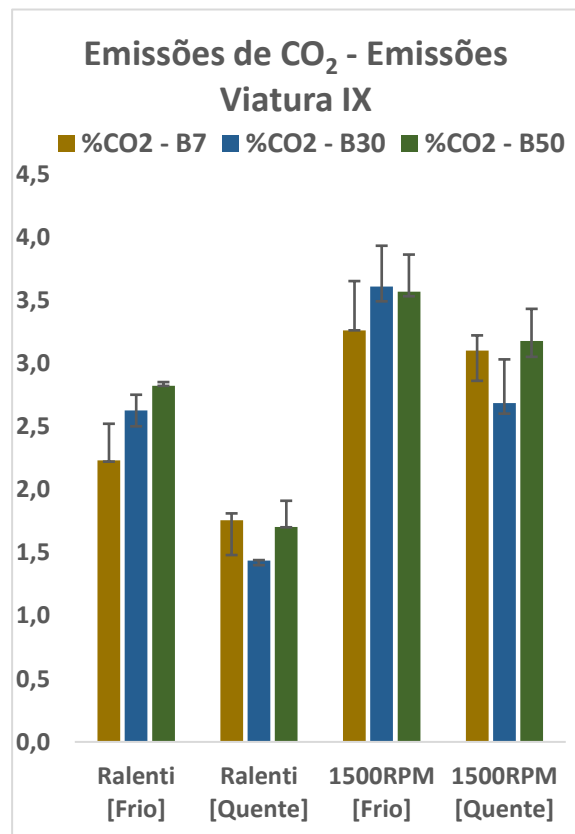


Gráfico 38: Emissão de CO₂ para a viatura IX.

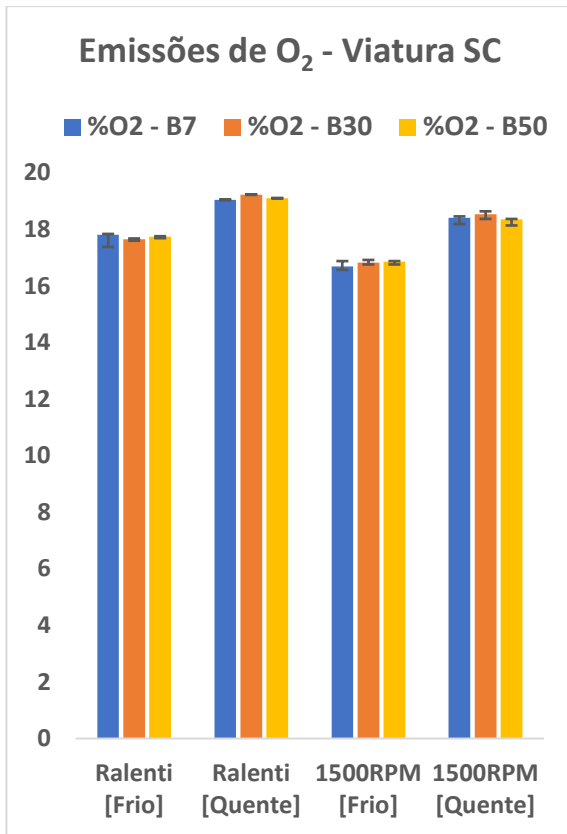


Gráfico 39: Emissão de O₂ para a viatura SC.

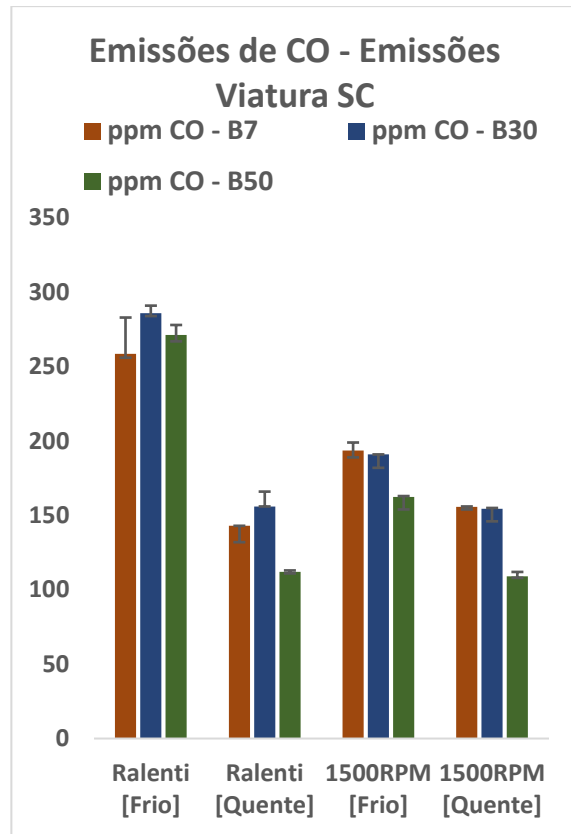


Gráfico 40: Emissão de CO para a viatura SC.

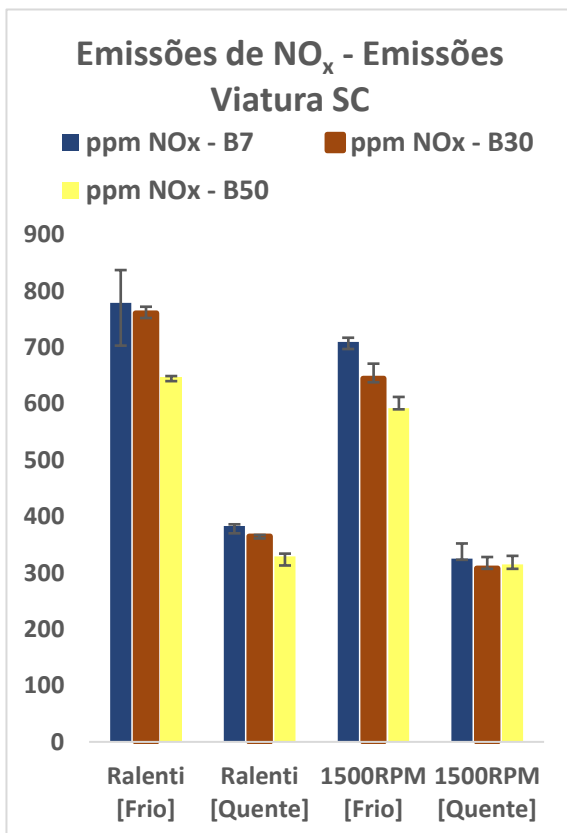


Gráfico 41: Emissão de NO_x para a viatura SC.

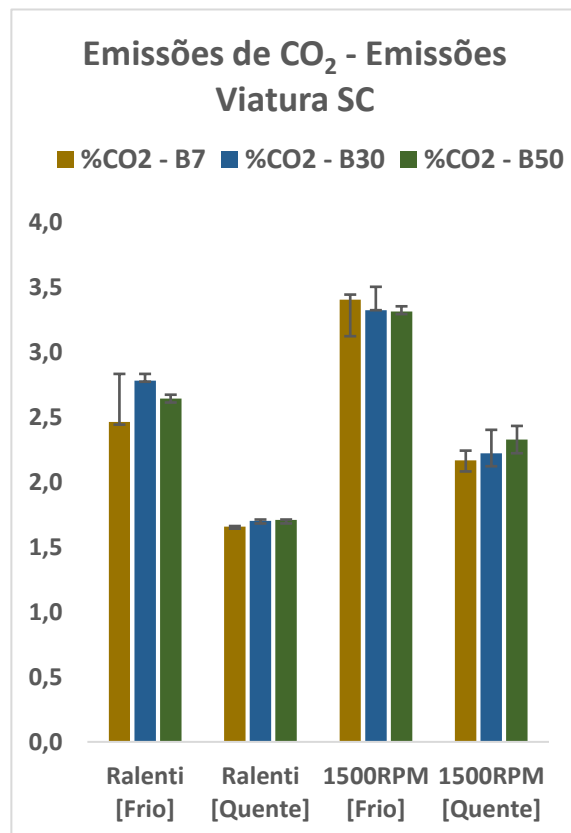


Gráfico 42: Emissão de CO₂ para a viatura SC.

Estudo sobre a utilização de combustíveis avançados no rendimento e emissões de veículos com motores de ignição por compressão

Para uma mais fácil comparação das diferenças entre os vários combustíveis, serão apresentadas as diferenças percentuais de cada substância química, por combustível, quando comparadas com os resultados obtidos com o B7. As mesmas encontram-se apresentadas na seguinte Tabela 33.

Tabela 33: Diferenças percentuais das espécies químicas, por viatura e por combustível.

Viatura	Regime	O ₂	CO	NO _x	CO ₂	O ₂	CO	NO _x	CO ₂
		B30				B50			
TG	Ralenti (Frio)	5,7%	-0,2%	-52,0%	-23,4%	1,1%	-14,4%	-14,9%	-0,3%
	Ralenti (Quente)	0,5%	-7,0%	-4,0%	1,8%	0,4%	-29,1%	-16,3%	6,1%
	1500 RPM (Frio)	5,2%	-32,5%	-56,2%	-15,6%	3,2%	-37,9%	-46,8%	-6,9%
	1500 RPM (Quente)	0,1%	-7,8%	-21,3%	3,0%	-1,5%	25,8%	-49,3%	10,4%
IX	Ralenti (Frio)	-3,7%	52,7%	27,5%	17,7%	-4,0%	50,8%	44,8%	26,5%
	Ralenti (Quente)	1,5%	31,8%	-31,2%	-18,3%	-1,0%	26,8%	1,0%	-3,0%
	1500 RPM (Frio)	-5,6%	47,6%	95,8%	10,6%	-3,6%	16,7%	25,5%	9,4%
	1500 RPM (Quente)	4,3%	-6,7%	-6,0%	-13,4%	0,7%	-25,9%	11,9%	2,5%
SC	Ralenti (Frio)	-0,9%	10,6%	-2,3%	12,9%	-0,4%	5,0%	-17,0%	7,3%
	Ralenti (Quente)	0,9%	9,1%	-4,7%	2,7%	0,3%	-21,7%	-14,0%	3,1%
	1500 RPM (Frio)	0,8%	-1,4%	-9,1%	-2,4%	1,0%	-16,1%	-16,6%	-2,7%
	1500 RPM (Quente)	0,7%	-0,7%	-5,2%	2,5%	-0,3%	-30,0%	-3,2%	7,4%
Média Global		0,7%	6,8%	-13,1%	-2,6%	-0,4%	-2,3%	-13,7%	4,4%

Nos seguintes Gráfico 43, Gráfico 44, Gráfico 45 e Gráfico 46 encontram-se apresentados os mesmos resultados de O₂, CO, NO_x e CO₂ para a viatura TG, respetivamente. O mesmo para a viatura IX nos seguintes Gráfico 47, Gráfico 48, Gráfico 49 e Gráfico 50 e para a viatura SC nos seguintes Gráfico 51, Gráfico 52, Gráfico 53 e Gráfico 54. Por último, é também mostrado no Gráfico 55 com as diferenças das médias globais.

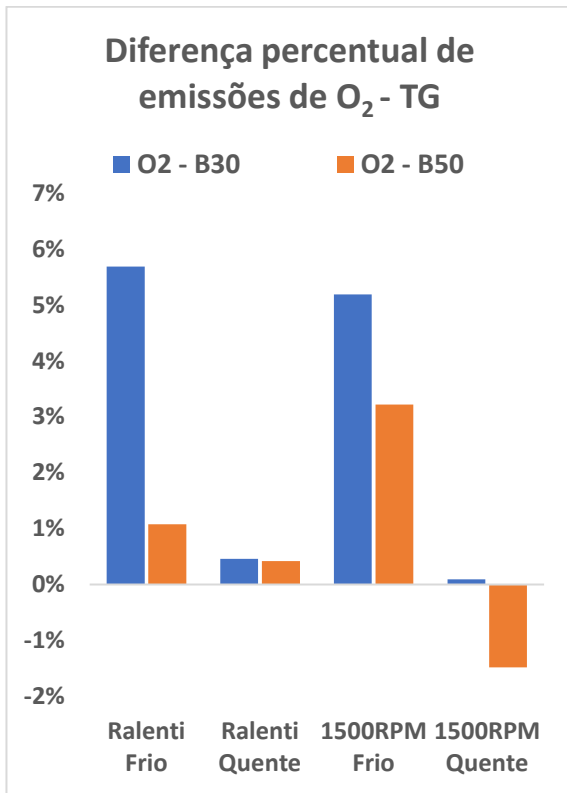


Gráfico 43: Diferença percentual na emissão de O₂ para a viatura TG.

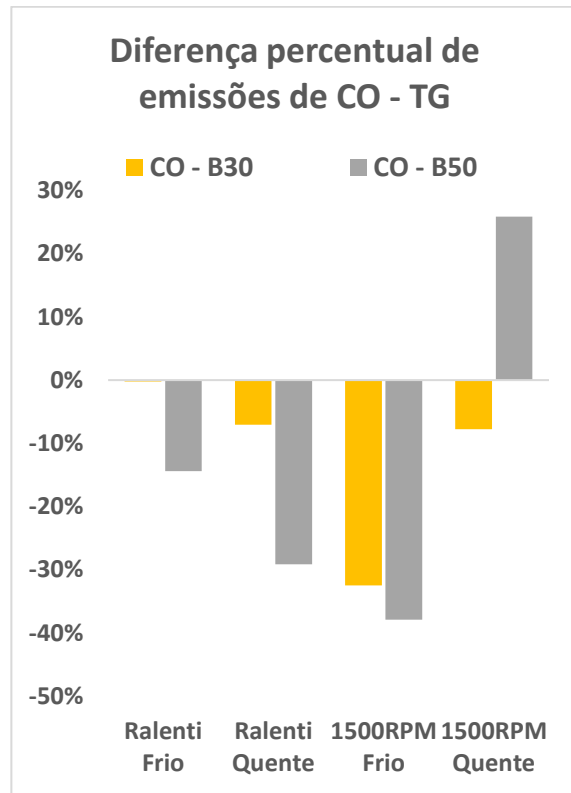


Gráfico 44: Diferença percentual na emissão de CO para a viatura TG.



Gráfico 45: Diferença percentual na emissão de NO_x para a viatura TG.

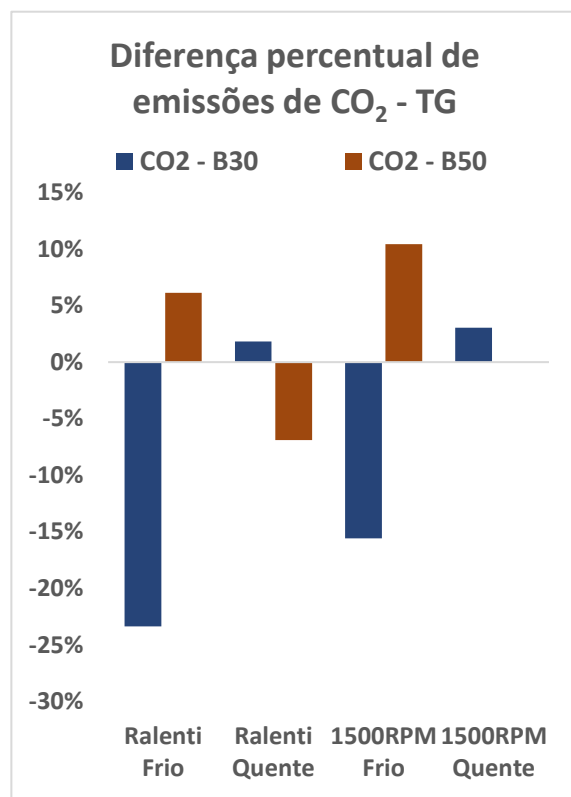


Gráfico 46: Diferença percentual na emissão de CO₂ para a viatura TG.



Gráfico 47: Diferença percentual na emissão de O₂ para a viatura IX.

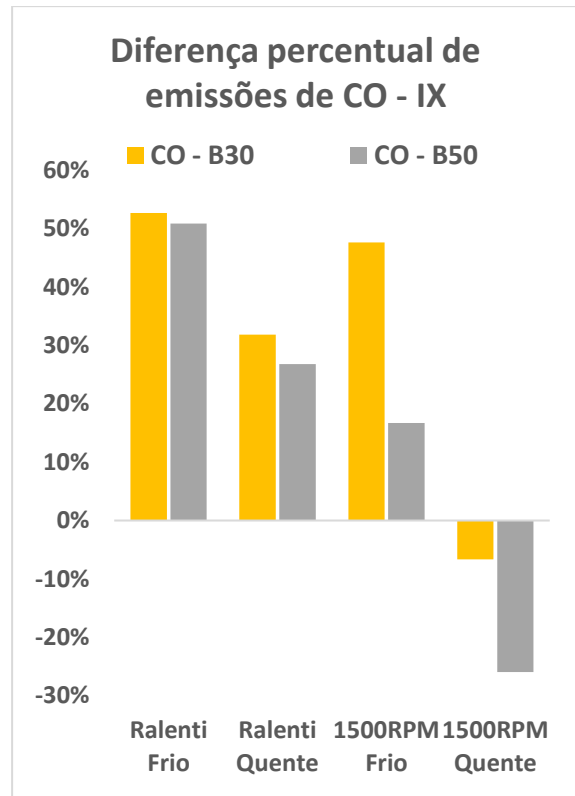


Gráfico 48: Diferença percentual na emissão de CO para a viatura IX.

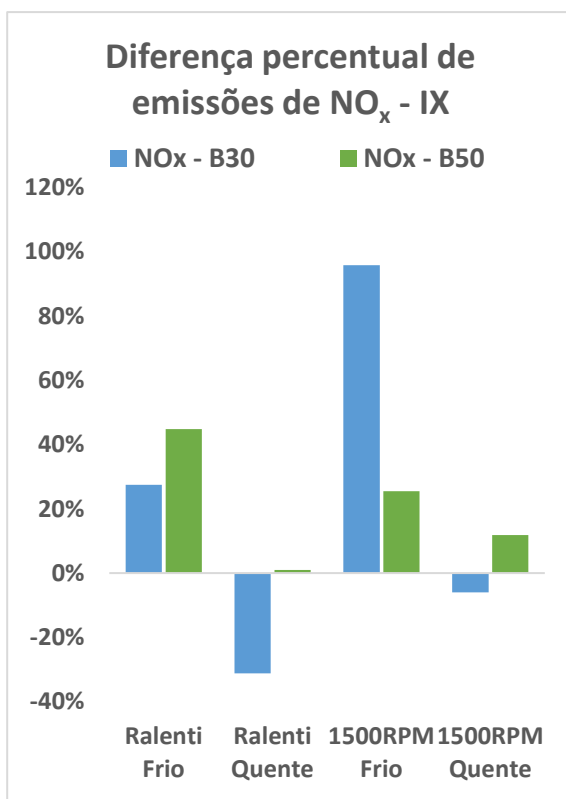


Gráfico 49: Diferença percentual na emissão de NO_x para a viatura IX.

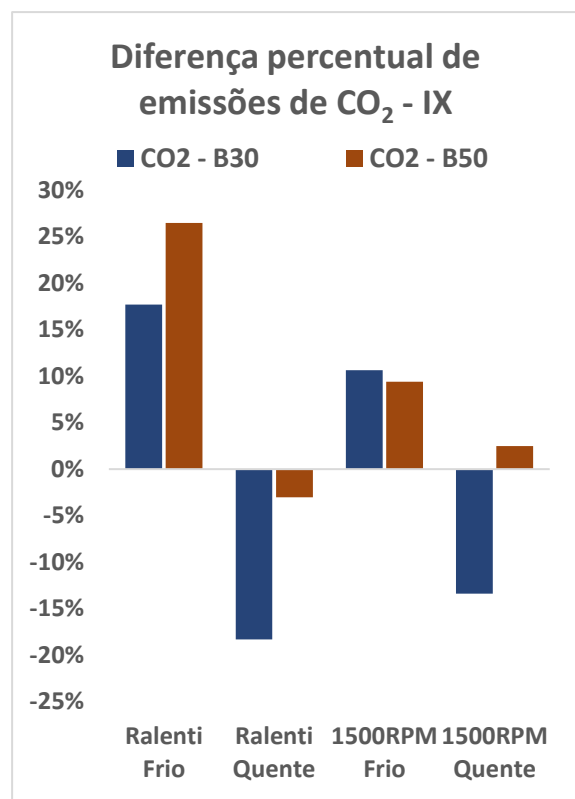


Gráfico 50: Diferença percentual na emissão de CO₂ para a viatura IX.

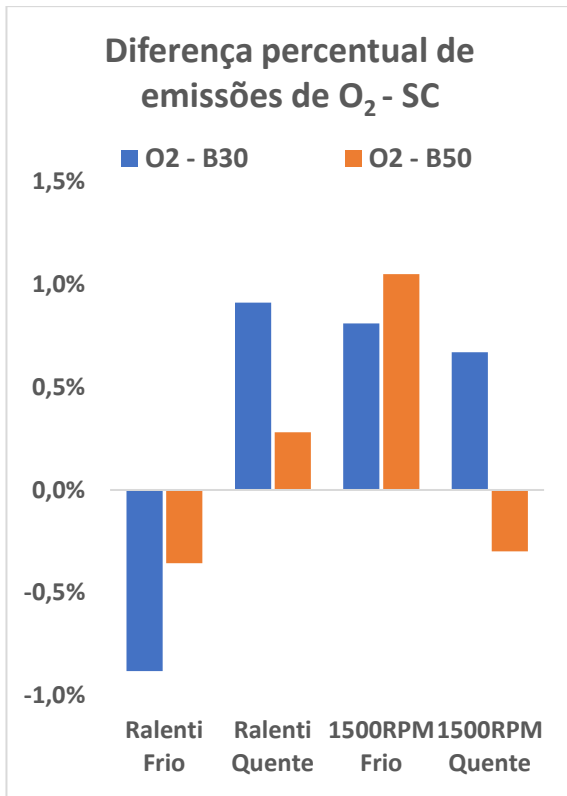


Gráfico 51: Diferença percentual na emissão de O₂ para a viatura SC.

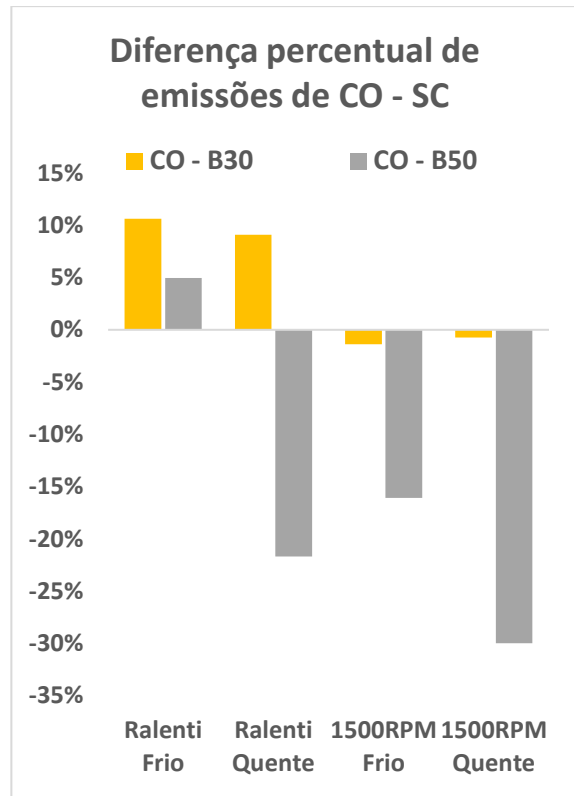


Gráfico 52: Diferença percentual na emissão de CO para a viatura SC.



Gráfico 53: Diferença percentual na emissão de NO_x para a viatura SC.

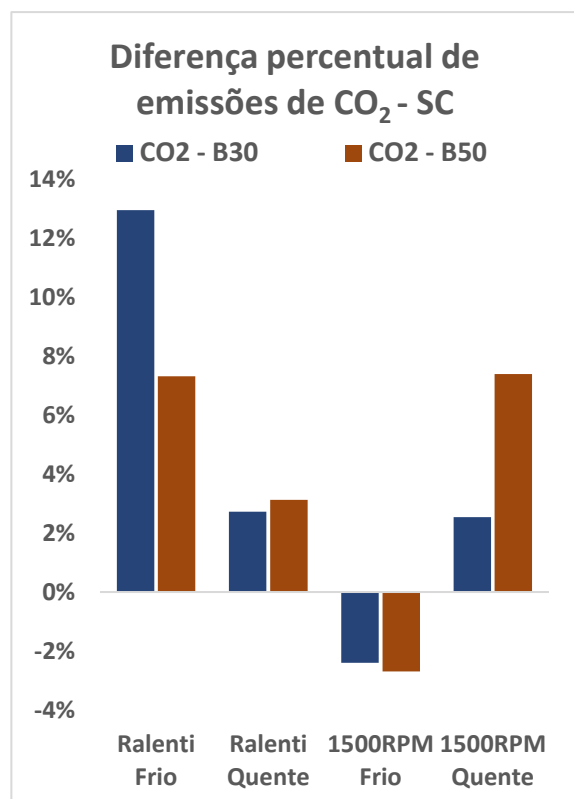


Gráfico 54: Diferença percentual na emissão de CO₂ para a viatura SC.

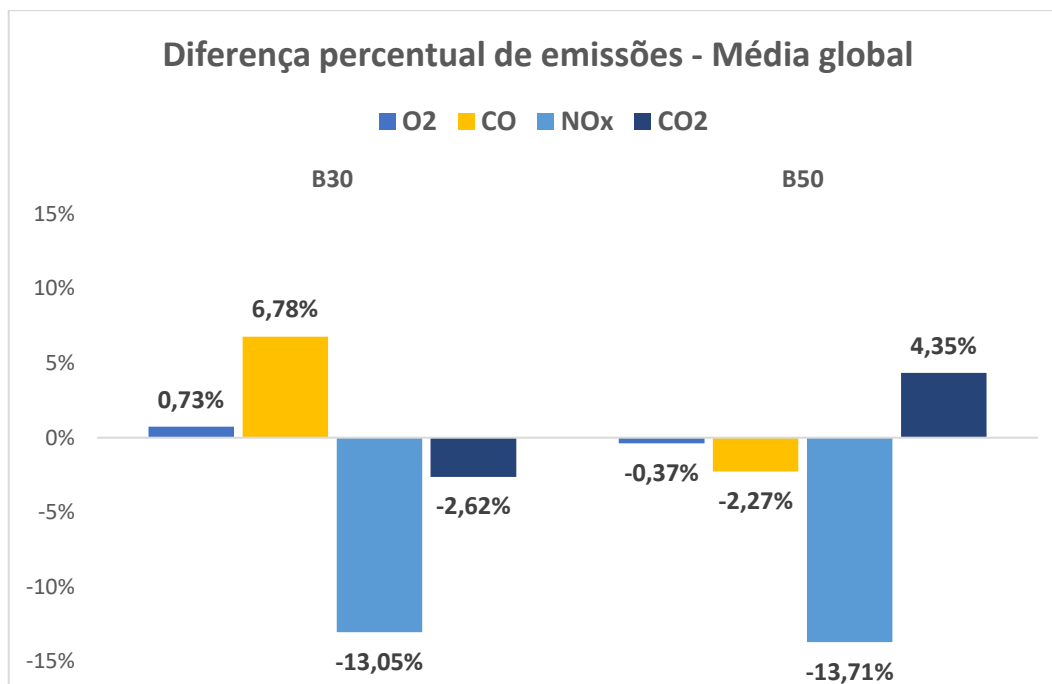


Gráfico 55: Diferença percentual das emissões, na média global, por espécie química.

Analisando na globalidade os gráficos dos três veículos não é visível nenhuma semelhança entre estes. De modo a conseguir retirar alguma conclusão, e à semelhança do realizado no caso de estudo anterior, a análise dos resultados será realizada por substância química.

Oxigénio (O₂)

As alterações obtidas da emissão de oxigénio (O₂), mais uma vez, foram pouco significativas, demonstradas pela diferença na média global de 0,7% ao utilizar B30 e de -0,37% ao utilizar B50, pelo que, considerou-se um parâmetro inalterado quando utilizado o biodiesel. Os resultados obtidos neste caso de estudo estão em concordância com os obtidos no anterior, pelas justificações já anteriormente apresentadas (variabilidade na aquisição de dados do aparelho de medição, diferenças meteorológicas). Também não é possível relacionar nenhuma tendência de como a emissão de este composto químico é afetado com o aumento da percentagem de biodiesel.

Monóxido de carbono (CO)

Analisando os dados das emissões de monóxido de carbono, não é possível visualizar nenhuma tendência, visto que, globalmente, ocorreu um aumento da emissão de CO ao utilizar B30 de cerca de 7%, que não se verificou com o B50, onde ocorreu até um decréscimo de cerca de 2%. Também não é possível retirar uma tendência de evolução desta

substância, com o aumento do teor de biodiesel em todos os veículos. Deste modo será realizada uma análise veículo a veículo.

Para o veículo TG, ocorre uma diminuição da emissão deste composto tanto a utilizar B30 como a utilizar B50. Esta diminuição é ainda mais pronunciada quando é utilizado o B50. O mesmo apenas não é verificado no regime das 1500RPM, à temperatura normal de funcionamento. No entanto, em ambos os regimes, devido ao funcionamento do sistema de tratamento de gases, a emissão deste composto torna-se, praticamente residual. Consequentemente, as diferenças entre a emissão deste composto com os vários combustíveis, nestes regimes, são de meras unidades de parte por milhão, estando na gama de incerteza do equipamento de medição. Esta diminuição, poderá estar relacionada com uma reação de combustão mais completa, devido à adição de oxigénio presente no combustível aliado ao maior número de cetano, contrapondo à pior atomização, derivada da maior viscosidade (Aggarwal, 2007).

No caso da viatura IX, independentemente da percentagem de biodiesel, ocorreu o aumento da emissão deste composto em todos os regimes, à exceção do das 1500 RPM à temperatura normal de funcionamento, sendo este o menos influente como anteriormente referido. Este aumento foi ligeiramente menos pronunciado com a utilização de B50. Os resultados contrariam assim o expectável, pelos motivos já anteriormente referidos. O que poderá explicar esta subida será o efeito da pior atomização, levando a um aumento das zonas ricas, aumentando a formação deste composto. Este efeito é mais visível ao ralenti, a uma carga baixa, onde a pressão de injeção é inferior, e o efeito anteriormente referido torna-se mais evidente. Não seria expectáveis diferenças tão assinaláveis entre estes dois veículos, visto que estes possuem uma tecnologia de injeção de combustível e de tratamento de gases idêntico.

Na viatura SC, ao utilizar B30, tanto a quente como a frio, ocorre o aumento da emissão deste composto ao ralenti. Com a utilização de B50, ao ralenti a quente verifica-se um aumento, sendo que nos restantes regimes ocorre uma diminuição da emissão de CO. É visível que, aumentando o teor de biodiesel, ocorre uma diminuição da emissão deste composto, mesmo no caso do ralenti a “frio”, a subida não foi tão pronunciada. Esta diminuição, pode ser explicada pelos motivos já referidos.

Óxidos de azoto (NO_x)

Globalmente ocorreu uma diminuição da emissão de NO_x, onde a média global deste composto diminui cerca 13% com B30, e 14% com B50. O mesmo foi proporcionado pela

viatura TG e SC que diminui a emissão deste composto em todos os regimes. No caso da viatura SC, foi até visível que, esta diminuição foi superior quando utilizado o B50. Já para a viatura IX, ao utilizar B30, apenas ocorreu a emissão deste composto a quente. Para o B50, ocorreu o aumento deste composto em todos os regimes. A explicação para a diminuição da emissão desta substância, será o decréscimo na formação de compostos aromáticos, ao utilizar o biodiesel (Robert L. McCormick, 2002). No entanto, seria expectável um aumento da emissão deste composto (O'Malley & Searle, 2021), pelo fator mais preponderante na sua formação, o aumento temperatura e o aumento da concentração de oxigénio.

Dióxido de carbono (CO₂)

Não é possível correlacionar a emissão de CO₂ com o aumento do teor de biodiesel. Globalmente, com B30 ocorre uma diminuição deste composto de cerca de 3%, contrariada pela subida de cerca de 4% ao operar com B50. Se com B30, na viatura TG, ocorre a diminuição da emissão deste composto a frio, na viatura IX, o mesmo ocorre a “quente”. Para as duas viaturas anteriormente referidas, ao passar de B30 para B50 ocorre um aumento da emissão de CO₂, ou a diminuição face a B7 não é tao acentuada. Porém, o mesmo não é verificado na viatura SC. As emissões de CO₂ estão diretamente relacionadas com o consumo de combustível e com a relação carbono-hidrogénio. Como não foi inequívoco que existisse um aumento do consumo em todas as viaturas, seria expectável que houvesse também apenas ligeiras oscilações na emissão deste composto, idêntico ao que ocorreu no caso de estudo anterior.

De ressaltar que, as medições realizadas às viaturas com B7, B30, e B50 não foram realizadas no mesmo dia, conseqüentemente, as condições meteorológicas (temperatura, humidade, entre outras) foram alterando entre medições. Estas diferenças provocam ligeiras oscilações na emissão de cada composto, de um modo diferente, pelo que se considera que as pequenas variações identificadas nas várias substâncias estão relacionadas com outros fatores que não a alteração do combustível. Adicionalmente, a medição dos gases de escape foi realizada sem nenhuma carga aplicada. Esta situação afasta-se de um normal funcionamento do veículo. Caso os testes fossem realizados numa condição normal de funcionamento, os valores obtidos seriam diferentes, alterando as conclusões retiradas.

4.2.3. Análise ao óleo lubrificante

Inicialmente, o intuito seria realizar a análise ao óleo lubrificante de cada viatura antes de este mudar de combustível. Assim sendo, existiriam 3 amostras, uma para B7, uma para B30 e outra para B50. Adicionalmente, existiria uma recolha de óleo lubrificante novo, igual ao que teria sido posto nas viaturas. O óleo utilizando nestas é um FUCHS TITAN CARGO LD3 SAE 10W-40. Dado que a viatura TG passou cerca de mais de um mês a utilizar B30 comparativamente com as restantes viaturas, foram realizadas 2 recolhas neste período. Deste modo, é garantindo um intervalo de tempo idêntico em todas as amostras de óleo retiradas. Os resultados obtidos para os contaminantes metálicos, encontram-se apresentados na seguinte Tabela 34, encontrando-se sinalizados, com uso de cor, os três graus de contaminação do óleo, por cada substância (amarelo – preocupante, cor de laranja – alarmante e vermelho - crítico).

Tabela 34: Contaminantes metálicos presentes no óleo, por veículo e por combustível.

Viatura	Recolha de óleo	Odómetro	Alumínio (mg/kg)	Cobre (mg/kg)	Ferro (mg/kg)
	Óleo Novo		6	0	6
TG	B7	990949	11	5	25
	B30	997785	39	6	38
	B30 (recolha 2)	1004298	76	9	71
	B50	1012719	100	10	129
IX	B7	1242024	147	15	161
	B30	1249777	172	18	203
	B50				
SC	B7	1126311	6	0	11
	B30	1134212	8	1	16
	B50	1142471	5	1	17

Analisando estes resultados, é visível que, durante o estudo, apenas a viatura SC não demonstrou sinal crítico de qualquer contaminante metálico. Não foi realizada a recolha de óleo lubrificante à viatura IX quando esta operava com B50, visto que o mesmo foi trocado nesse período. Esta intervenção foi realizada devido à elevada contaminação por elementos metálicos já presentes no óleo lubrificante aquando da recolha de óleo a operar com B30. Visto que o mesmo já se encontrava contaminado no início do estudo (na recolha com B7), não é evidente que tenha sido a incorporação de biodiesel no combustível a aumentar a

presença de contaminantes metálicos no motor desta viatura. O mesmo não é verificado na viatura TG, onde é visível que os contaminantes metálicos presentes no óleo vão aumentando, especialmente o ferro e o alumínio, de modo constante, recolha após recolha. No entanto, o motor do veículo em causa foi alvo de uma reparação interna pouco tempo antes do início do estudo. Assim sendo, é possível que surjam resíduos metálicos no óleo lubrificante resultantes desta operação. Por último, na viatura SC, e após percorrer cerca de 16 000 quilómetros, os contaminantes metálicos não apresentam nenhum valor crítico, aumentando ligeiramente, decorrendo do seu normal funcionamento. Não é inequívoco que a incorporação de biodiesel tivesse influência na degradação dos componentes internos do motor.

Os resultados obtidos para os restantes contaminantes encontram-se exibidos, na seguinte Tabela 35.

Tabela 35: Contaminantes presentes no óleo, por veículo e por combustível.

Viatura	Recolha de óleo	Odómetro	Água (%)	Combustível (%)	Material Carbonoso (%)	Silício (mg/kg)
	Óleo Novo		<0,1	<3	<0,1	6
TG	B7	990949	<0,1	<3	-	12
	B30	997785	<0,1	<3	0,7	14
	B30 (recolha 2)	1004298	<0,1	<3	-	17
	B50	1012719	<0,2	<3	1	17
IX	B7	1242024	<0,1	<3	1,4	10
	B30	1249777	<0,1	<3	1,5	11
	B50					
SC	B7	1126311	<0,1	<3	0,1	5
	B30	1134212	<0,1	<3	0,1	6
	B50	1142471	<0,1	<3	0,1	5

Neste caso, não existiu a contaminação com nenhuma das substâncias em análise. É assim concluído que os motores dos veículos não possuem passagens internas de líquido de refrigeração para o óleo lubrificante, que a injeção de combustível e a vedação entre pistões e cilindros ocorre sem anomalias, não existindo valores assinaláveis de combustível ou resíduos carbonosos no óleo. Por último, não ocorre a contaminação do óleo por elementos externos (silício) que poderiam estar incorporados no ar admitido, ou no combustível injetado, indiciando assim que ambos os sistemas estavam operacionais. O aumento do teor

de biodiesel não incorporou a existência destes contaminantes analisados. Na viatura TG, na amostra B7 e na segunda amostra B30, não é apresentado o material carbonoso porque a empresa que analisa o óleo lubrificante não disponibilizou estes dados. Nesta mesma viatura, ocorre um ligeiro aumento da quantidade de silício presente no óleo desde a amostra B7 até à amostra B50, porém, não chegou a um nível preocupante, na Tabela 36 são apresentados os indicadores de estado de cada amostra de óleo lubrificante.

Tabela 36: Indicadores de estado do óleo, por veículo e por combustível.

Viatura	Recolha de óleo	Odómetro	TBN (mg KOH/g)	Diferença da Viscosidade (%)
	Óleo Novo		16	
TG	B7	990949	15,3	1%
	B30	997785	16,4	-3%
	B30 (recolha 2)	1004298	15,8	-1%
	B50	1012719	14,5	2%
IX	B7	1242024	5,6	-12%
	B30	1249777	6,5	-13%
	B50			
SC	B7	1126311	16,1	-2%
	B30	1134212	18,7	-2%
	B50	1142471	4,8	-2%

Dos dados da Tabela 36 retira-se que, ao nível da viscosidade, face ao óleo novo, nenhuma amostra possuiu uma diferença superior a 15%, para que possa ser considerado um parâmetro preocupante. Já para o TBN, na viatura TG, apesar de não diminuir até um nível preocupante (diminuição de 50% do valor face ao original), é visível que ocorre uma diminuição deste parâmetro desde a amostra B30 até ao período de utilização de B50. Esta diminuição é expectável, pela oxidação normal do óleo. Um aumento deste parâmetro da recolha de B7 para B30 não seria expectável, tal como ocorreu nas restantes viaturas. O valor do TBN para a viatura IX também demonstra o mau estado do óleo e a justificação da sua substituição. Na viatura SC, também ocorre uma diminuição muito abrupta deste indicador, sinal de que o óleo possuiu uma degradação muito rápida. Não é assim possível concluir se foi a incorporação de uma maior percentagem de biodiesel no combustível, que tenha causado uma oxidação tão rápida do óleo ou outro fator externo, até porque, esta oscilação só ocorreu já com o B50.

4.2.4. Utilização do B30 e B50

Inicialmente, seria para estender a utilização os veículos a B100, no entanto, não foi indicada pelo fabricante dos veículos se os mesmos estariam aptos para o seu consumo e, caso necessário, que alterações deveriam ser realizadas nos veículos.

Durante a utilização do B30 e B50 existiram uma série de contratempos. Já estaria programada a substituição dos filtros de combustível com regularidade, visto que poderiam ser obstruídos por resíduos presentes no tanque de combustível (graças à propriedade detergente do biodiesel, que transportaria os resíduos presentes no tanque, para o sistema de combustível) ou por resíduos presentes no próprio combustível. Estes resíduos, caso tenham origem em detritos já presentes no tanque de combustível, com o normal abastecimento e substituição dos filtros, irão desaparecer. Caso a contaminação seja no próprio combustível, o mesmo será um problema recorrente. Apesar disso, e mesmo assim, ocorreu o entupimento dos filtros de combustível, na viatura TG e na viatura IX. Os mesmos foram para análise para apurar a origem dos resíduos, no entanto, à data da realização deste trabalho, ainda não tinha sido apurada a origem dos mesmos. Na viatura TG, pouco tempo depois do início do estudo, sucedeu-se a não vedação dos injetores de combustível. A causa do sucedido estaria relacionada com a existência de resíduos no sistema de combustível, após filtragem no filtro. Estes poderiam ter origem na reparação anterior realizada no veículo, ou por contaminação aquando da troca anterior do filtro de combustível. Não foi assim evidente que seria causado pela utilização do combustível, visto que, segundo a empresa reparadora dos veículos, é uma avaria que já se sucedeu no passado neste tipo de motorização. Estes problemas forçam a imobilização dos veículos, que levam a perda de rendimentos da empresa transportadora, a somar às despesas extra das reparações necessárias nos veículos.

5. Conclusões

O grande intuito deste trabalho seria aferir a influência que um combustível alternativo como o biodiesel poderia ter numa situação real de funcionamento. No caso de estudo A, este objetivo foi conseguido com sucesso, e corroborado com os ensaios realizados em banco de potência. O mesmo verificou parcialmente no caso B, dado que não se utilizou apenas biodiesel como combustível, finalizado este estudo com B50.

Para uma mais fácil compreensão das conclusões retiradas, as mesmas serão apresentadas, tal como na globalidade do trabalho, por caso de estudo e tipologia de teste, seguidas por umas considerações globais de ambos os casos de estudo. Por último, serão exibidas algumas propostas de melhoria para trabalhos futuros.

5.1. Caso de estudo A

Neste subcapítulo serão apresentadas todas as conclusões retiradas sobre este caso de estudo. O mesmo estará dividido nas quatro tipologias de teste, monitorização do consumo de combustível, medição das emissões de gases de escape, teste laboratorial de potência e de consumo.

5.1.1. Monitorização do consumo de combustível

Da análise dos resultados conclui-se que a utilização de biodiesel não impõe, obrigatoriamente, um aumento do consumo de combustível existindo veículos que apresentaram subidas e outros que apresentaram descidas. Estas oscilações ocorrem, não só devido às diferenças nas propriedades do combustível, mas também por causas associadas à normal utilização dos veículos por diferentes condutores em diferentes trajetos com diferentes tipos de carga, entre outros aspetos, o que implica uma oscilação no consumo. Globalmente, quando se utilizou biodiesel foi possível observar uma ligeira subida do consumo de combustível de cerca de 1%, nos veículos analisados. Já nos equipamentos ocorreu até uma descida do consumo do combustível, mas que não se considera realista e por isso não merecedora de análise mais profunda.

5.1.2. Medição das emissões de gases de escape

Analisando as emissões de gases de escape, é visível que nos veículos, a utilização de biodiesel, provocou um aumento médio na emissão de CO de 32,86%, uma diminuição

do NO_x de 34,81%, sendo que, para o O_2 e o CO_2 não houve, praticamente alteração. O aumento de CO não é crítico nos motores Diesel, uma vez que operam sempre em mistura pobre. A diminuição de NO_x é benéfica, porque este é um dos poluentes mais críticos associados à utilização de motores Diesel. Para os equipamentos, globalmente, ocorreu o mesmo que o referido nos veículos, à exceção da emissão de NO_x , que aumentou cerca de 6%, apesar de apenas se ter verificado esse aumento em um dos dois equipamentos considerados no presente estudo. Os valores de emissões de CO_2 são coerentes com a pequena diferença de consumo de combustível, dado que este o parâmetro correlacionado com estas emissões. Para ambos os casos não ocorreu um aumento significativo da emissão de CO_2 , sendo possível concluir assim, que, ao utilizar o biodiesel, ocorrerá uma significativa redução das emissões desta substância quando considerado o ciclo de vida completo atendendo ao carácter renovável deste combustível.

5.1.3. Teste laboratorial de potência

Analisando as diferenças na potência debitada pelo veículo em estudo, quando utilizado o biodiesel, não se verificou uma diminuição da prestação do veículo, existindo até um ligeiro aumento da potência máxima debitada pelo motor observada nos regimes mais altos. O mesmo, não sendo previsto, poderá estar relacionado com alguma intervenção que o veículo tenha sofrido, ou deterioração de um componente crítico que diminuiu a potência máxima atingida. Mesmo assim, num caso típico, não seria expectável uma diminuição acentuada da potência debitada pelo motor.

5.1.4. Teste laboratorial de consumo

Para os testes de consumo em banco de potência (WLTP), é visível um aumento do consumo mássico de combustível em todos os perfis de velocidade, entre 1 e 5%. Ainda assim, este valor foi mais baixo que o expectável. Analisando o consumo médio volumétrico por distância percorrida (l/100km), é visível uma ligeira diminuição deste, na ordem de 2%. Esta diferença é explicada pela maior densidade do biodiesel.

5.2. Caso de estudo B

Neste subcapítulo serão apresentadas todas as conclusões retiradas sobre este caso de estudo. O mesmo estará dividido nas três tipologias de teste, monitorização do consumo de combustível, medição das emissões de gases de escape, análise ao óleo lubrificante, seguindo da análise da sua utilização.

5.2.1. Monitorização do consumo de combustível

Da análise dos resultados conclui-se que, ao aumentar o teor de biodiesel presente no combustível, não existe, obrigatoriamente, um aumento acentuado do consumo de combustível existindo dois veículos que apresentaram subidas e um que apresentou uma ligeira descida ao utilizar B30. Estas oscilações ocorrem, não só devido às diferenças nas propriedades do combustível, mas devido a outros fatores externos já anteriormente mencionadas. Globalmente, quando se utilizou B30, o consumo de combustível aumentou cerca de 2%, já a utilizar B50, o mesmo aumento cerca de 3,6%. Estes resultados encontram-se iguais com os obtidos no estudo anterior e restantes estudos idênticos.

5.2.2. Medição das emissões de gases de escape

Analisando as emissões de gases de escape, é visível que existe uma grande disparidade entre regimes, veículos e combustíveis, não sendo assim possível correlacionar o que se sucedeu a cada composto químico com o aumento da incorporação de biodiesel. Globalmente, é novamente verificado uma indiferença da emissão de O_2 , independentemente da percentagem de biodiesel da mistura. Para o CO , se ao utilizar B30 ocorreu o seu aumento, o mesmo não se verificou com B50. Já para o NO_x , ocorreu uma diminuição deste composto com a mesma magnitude em ambos os combustíveis. Ainda que não tão acentuada, esta descida encontra-se em linha com a obtida no estudo anterior. Os valores de emissões de CO_2 variam ligeiramente. Se existe uma ligeira diminuição de 3% a utilizar B30, a mesma não é verificada ao utilizar B50, aumentando a sua emissão em 4%.

5.2.3. Análise ao óleo lubrificante

Destes resultados, globalmente é visível que nenhuma viatura possuía contaminantes externos do óleo. O mesmo é sinal que todos os sistemas de filtragem do combustível e do ar estavam a operar corretamente. Já para os contaminantes metálicos, a viatura IX foi até excluída do estudo dada a elevada concentração de ferro e alumínio presentes, antes da inicialização da utilização de B30 e B50. Assim sendo, a origem desta contaminação não está relacionada com o biodiesel. Para a viatura SC não foi registado nenhum valor preocupante para os contaminantes metálicos. Por último, para a viatura TG, a presença de ferro e alumínio foi subindo, ultrapassando os limites críticos. No entanto, não é inequívoco que a origem desta subida estivesse relacionada com o biodiesel, já que a mesma foi alvo de uma intervenção mecânica antes do início do estudo, podendo estes contaminantes serem originados por esta. Nos indicadores de estado, apenas a viatura SC apresentou um nível

alarmante no TBN. Não é evidente que o mesmo tenha sido decorrente do aumento do teor biodiesel, visto que ocorreu de uma descida abrupta no indicador. Adicionalmente, não é visível o mesmo comportamento noutros veículos. É assim concluído que a utilização de biodiesel não origina uma degradação do óleo lubrificante e um desgaste anormal dos componentes internos do motor.

5.2.4. Utilização do B30 e B50

Apesar da incorporação gradual da percentagem de biodiesel, surgiram uma série de problemas de entupimentos de filtros de combustível. Não é comprovada a origem dos resíduos, ou seja, se os mesmos foram para o sistema de combustível, por consequência das propriedades do combustível, transportados pelo combustível do interior do tanque ou se têm origem no próprio combustível. Mesmo assim, os mesmos traduzem-se em paragem e gastos de monetários pela empresa detentora dos veículos. Em adição à substituição dos filtros ocorreu a avaria do sistema de injeção de combustível. Contudo, não foi possível comprovar que a avaria tivesse origem no aumento do teor de biodiesel.

5.3. Considerações finais

Numa perspetiva global, pode concluir-se que a utilização, ou o aumento do teor de biodiesel nos veículos e equipamentos nos estudos revelou ser uma forma viável e eficaz na redução de emissões de CO₂. De facto, tendo em consideração as reduzidas diferenças em termos de emissões de consumo de combustível, pode afirmar-se que existe um grande potencial para que a utilização de biodiesel permita reduzir as emissões de CO₂, associadas ao carácter renovável deste combustível.

Por outro lado, foi ainda possível verificar que a utilização de biodiesel não penaliza motores em termos de desempenho, tendo sido possível constatar diferenças praticamente residuais nos valores de binário e de potência do motor. Também relativamente aos valores de emissões de gases poluentes verifica-se que as diferenças são pequenas e ainda assim revelam alguma vantagem na utilização de B100 pela menor quantidade de NO_x emitida, sendo este um dos componentes com maior relevância nos motores de ciclo Diesel.

Também em termos de redução de fiabilidade, houve registos de problemas ao nível da maior necessidade de substituição de filtros de combustível, o que é algo expectável, principalmente num processo de transição de diesel fóssil para biodiesel. Ao nível interno do motor, não foi demonstrado que a utilização de biodiesel provocasse um detrimento dos seus componentes.

5.4.Sugestões de trabalho futuro

Como sugestões de trabalhos futuros considera-se relevante a implementação de um procedimento idêntico, analisando o consumo, a emissão de gases de escape e óleo lubrificante e, caso possível, realizar testes de consumo e desempenho em banco de potência. Nos casos em que é aumentada a incorporação de biodiesel em veículos que sempre operaram com diesel rodoviário, será sempre recomendável limpar completamente os tanques de combustível, antes da utilização do biodiesel, de modo a retirar os detritos que pudessem ser transportados por este para os filtros de combustível. Também é de comprovar se o veículo está apto à sua utilização, e quais as alterações necessárias, evitando assim problemas técnicos decorrentes da utilização do combustível.

6. Referências

- Adam. (10 de setembro de 2018). *Source Element Guide - contamination, wear metal, additives and multi-origin elements*. Obtido de Learn Oil Analysis: <https://learnoilanalysis.com/lube-oil-test-analysis-lab-lubrication-reliability-maintenance/source-element-guide-contamination-wear-metal-additives-and-multi-origin-elements/>
- Aggarwal, A. K. (junho de 2007). Biofuels (alcohols and biodiesel) applications as fuels for internal combustion engines. *Progress in Energy and Combustion Science*, 33, pp. 233-271. doi:<https://doi.org/10.1016/j.pecs.2006.08.003>
- Almeida, R. J. (setembro de 2022). *Monitorização de motores em frotas de veículos pesados com foco no combustível utilizado - Motor*. Escola Superior de Tecnologia e Gestão, Leiria. Obtido em 23 de junho de 2023, de <https://iconline.ipleiria.pt/handle/10400.8/8296>
- António, M. (22 de março de 2022). *WLTP. Contamos-lhe tudo o que precisa de saber*. Obtido em 26 de maio de 2023, de Turbo: <https://www.turbo.pt/ciclo-wltp/>
- Antunes, J. E. (2019). *As Licenças de Emissão - Um Novo Instrumento Financeiro*. Obtido em 29 de junho de 2023, de Universidade Católica Portuguesa: https://repositorio.ucp.pt/bitstream/10400.14/34131/1/CMVM_CADERNOS_N63_9_39.pdf
- Atkins, R. D. (1 de abril de 2009). *An introduction to engine testing and development*. Warrendale. SAE Internacional. Obtido de <https://www.sae.org/publications/books/content/r-344/>
- axpo. (2023). *Como é produzido o hidrogénio?* Obtido em 2 de setembro de 2023, de axpo: <https://www.axpo.com/pt/pt/about-us/blog.detail.html/about-us/blog/energias-renovables/Como-e-produzido-o-hidrogenio.html#:~:text=O%20hidrog%C3%A9nio%20verde%20%C3%A9%20ent%C3%A3o%20baixo%20em%20CO2.&text=O%20hidrog%C3%A9nio%20cinza%20%C3%A9%20produzido,%>
- Bastos, D. (março de 2019). *Análise sobre a influência da utilização de aditivos em combustíveis*. Escola Superior de Tecnologia e Gestão, Leiria. Obtido em 25 de maio de 2023, de <https://iconline.ipleiria.pt/handle/10400.8/4178>

Estudo sobre a utilização de combustíveis avançados no rendimento e emissões de veículos com motores de ignição por compressão

Boretti, A. (14 de fevereiro de 2020). Advances in Diesel-LNG Internal Combustion Engines. *applied sciences*, pp. 1-28. doi:<https://doi.org/10.3390/app10041296>

Channapattana, S., Pawar, A. A., & Kamble, P. G. (2015). Effect of Injection Pressure on the Performance and Emission Characteristics of VCR engine using Honne Biodiesel as a Fuel. Em S. K. Singh, *4th International Conference on Materials Processing and Characterization* (pp. 1316 – 1325). doi:<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2015.07.049>

Ciolkosz, D. (2016 de junho de 2016). *Using Biodiesel Fuel in Your Engine*. Obtido em 5 de junho de 2023, de PennState Extension: <https://extension.psu.edu/using-biodiesel-fuel-in-your-engine#:~:text=Engine%20Care%20When%20Running%20on,oil%20remains%20in%20good%20shape>

Coelho, P., & Costa, M. (2007). *Combustão*. Amadora: Orion.

Conselho de Reguladores do MIBEL. (julho de 2020). *Estudo sobre o mercado de licenças de emissão de CO2*. Obtido em 22 de agosto de 2023, de Mibel Mercado Ibérico de Eletricidade: https://www.erse.pt/media/d1cnjj14/estudo-do-mercado_mibel_pt.pdf

Costa, P. (2019). Armazenamento e transporte. *Hidrogénio como vétor energético*, p. 63.

Costa, P. (2019). Utilização. *O hidrogénio como vector energético*, p. 127. Obtido em 5 de maio de 2023, de <https://fenix.ciencias.ulisboa.pt/downloadFile/844562369089607/Utilizacao.pdf>

Dietsche, K.-H., & Klingebiel, M. (2007). *Automotive Handbook*. Inglaterra: John Wiley & Sons Ltd. Obtido em 5 de maio de 2023

Estêvão, T. (2008). *O Hidrogénio como combustível*. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto. Obtido em 5 de junho de 2023, de <https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/58102/1/000129289.pdf>

ETIP Bioenergy. (s.d.). *Sustainable Feedstocks for Advanced Biofuels and Intermediate Bioenergy Carriers Production in Europe*. Obtido em 26 de julho de 2023, de European Technology and Innovation Platform: <https://www.etipbioenergy.eu/value-chains/feedstocks/biofuels-feedstocks-an-overview>

Gnap, J., & Dočkalik, M. (25 de agosto de 2021). Impact of the operation of LNG trucks on the environment. *Open Engineering*, pp. 937-947. doi:<https://doi.org/10.1515/eng-2021-0096>

- Granstrand, J., París, R. S., Nilsson, M., Regali, F., & Pettersson, L. J. (9 de dezembro de 2020). Assessment of the Impact of Trace Elements in FAME Biodiesel on Diesel Oxidation Catalyst Activity after full lifetime of operation in a Heavy-Duty truck. *Catalysts* 2020, pp. 1-11. doi:<https://doi.org/10.3390/catal10121439>
- Gumus, M., Sayin, C., & Canakci, M. (19 de novembro de 2011). The impact of fuel injection pressure on the exhaust emissions of a direct injection diesel engine fueled with biodiesel–diesel fuel blends. *Fuel*, pp. 486-494. doi:<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2011.11.020>
- Hosseinzadeh-Bandbafha, H. N.-S.-K. (2022). Environmental life cycle assessment of biodiesel production from waste cooking oil: A systematic review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 161. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112411>
- Iberdrola. (2023). *Diferença entre hidrogénio verde e azul*. Obtido em 6 de setembro de 2023, de Iberdrola: <https://www.iberdrola.com/quem-somos/nossa-atividade/hidrogenio-verde/diferen%C3%A7a-hidrogenio-verde-azul>
- Jornal Oficial da União Europeia. (25 de julho de 2019). Regulamento (UE) 2019/1242 do Parlamento Europeu e do Conselho. *Jornal Oficial da União Europeia*, 202-240. Obtido em 5 de julho de 2023, de <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/PDF/?uri=CELEX:32019R1242&from=EN>
- Lapuerta, M., Armas, O., & Rodríguez-Fernández, J. (abril de 2008). Effect of biodiesel fuels on diesel engine emissions. *Progress in Energy and Combustion Science*, pp. 198-223.
- Martins, J. (2006). *Motores de Combustão Interna*. Porto - Portugal: Publíndustria - Edições Técnicas.
- Matias, C. R. (2015). *Avaliação da incorporação de biodiesel em gásóleo rodoviário*. Escola Superior de Tecnologia e Gestão. Obtido em 4 de junho de 2023, de https://iconline.ipleiria.pt/bitstream/10400.8/1524/1/Cristiano%20Matias_Relat%C3%B3rio%20do%20Projeto%20MEENA-ESTG.pdf
- McCabe, M., & Jones, C. (2012). Biodiesel : Impact on Engine Oil Durability. *Journal of the JIME* , 89-96. doi:<https://doi.org/10.1021/acsomega.9b02353>
- Mizushima, N., Murata, Y., Suzuki, H., Suzuki, H., Goto, Y., & Kawano, D. (10 de outubro de 2010). Effect of Biodiesel on NOx Reduction Performance of Urea-SCR System. *SAE Int. J. Fuels Lubr*, pp. 1012-1020. doi:<https://doi.org/10.4271/2010-01-2278>
- Ng, J.-H., Ng, H. K., & Gan, S. (19 de dezembro de 2009). Advances in biodiesel fuel for application in compression ignition engines. *Clean Technologies and Environmental*

Estudo sobre a utilização de combustíveis avançados no rendimento e emissões de veículos com motores de ignição por compressão

- Policy*, pp. 459-493. Obtido em 20 de fevereiro de 2023, de <https://link.springer.com/article/10.1007/s10098-009-0268-6>
- O'Malley, J., & Searle, S. (17 de março de 2021). *Air quality impacts of biodiesel in the United States*. Obtido em 12 de fevereiro de 2023, de <https://theicct.org/wp-content/uploads/2021/06/US-biodiesel-impacts-mar2021.pdf>
- Oil Analysis Laboratories. (s.d.). *General Guidelines to Alarm Limits*. Obtido em 22 de agosto de 2023, de Oil Analysis Laboratories: <https://oilanalysislab.com/general-guidelines-to-lubricant-alarm-limits/>
- Ozsezen, A. N., & Canakci, M. (Janeiro de 2011). Determination of performance and combustion characteristics of a diesel engine fueled with canola and waste palm oil methyl esters. *Energy Conversion and Management*, 52, pp. 108-116. doi:<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2010.06.049>
- Parlamento Europeu. (22 de Março de 2019). *Emissões de dióxido de carbono nos carros: factos e números (infografia)*. Obtido em 20 de Fevereiro de 2023, de <https://www.europarl.europa.eu/news/pt/headlines/society/20190313STO31218/emissoes-de-co2-dos-carros-factos-e-numeros-infografias>
- Pinto, C. N. (2016). *Influência da Qualidade da Matéria-Prima no Processo de Produção de Biodiesel da Enerfuel*. Lisboa, Instituto Superior Técnico Lisboa. Obtido em 4 de fevereiro de 2023, de <https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/563345090415172/Documento%20-%20Tese.pdf>
- Prio. (2017). *Ficha Técnica - Gasóleo Aditivado*. Gafanha da Nazaré. Obtido em 15 de fevereiro de 2023, de https://www.prio.pt/pt/postos/downloads/file22_pt.pdf
- Ragon, P.-L., & Rodríguez, F. (Setembro de 2021). *CO2 Emissions from trucks in the EU: An Analysis of the heavy-duty CO2 Standards baseline data*. Obtido em 25 de março de 2023, de <https://theicct.org/publication/co2-emissions-from-trucks-in-the-eu-an-analysis-of-the-heavy-duty-co2-standards-baseline-data/>
- Robert L. McCormick, J. R. (6 de maio de 2002). Fuel Additive and Blending Approaches to Reducing NOx Emissions from Biodiesel. *Spring Fuels & Lubricants Meeting & Exhibition*, p. 12. doi:<https://doi.org/10.4271/2002-01-1658>
- Santana, B. J. (Setembro de 2020). *Utilização de misturas com baixo teor de Biodiesel em frotas de veículos*. Escola Superior de Tecnologia e Gestão, Leiria. Obtido em 24 de janeiro de 2023, de <https://iconline.ipleiria.pt/handle/10400.8/7109>
- Santos, H. (2022). *Células de combustível*. Obtido em 25 de junho de 2023

Estudo sobre a utilização de combustíveis avançados no rendimento e emissões de veículos com motores de ignição por compressão

- Santos, H. (2022). *Fuel Cell Range Extender*. Obtido em 26 de junho de 2023
- Scania. (2021). *Combustível Descrição - Converter veículos a diesel em veículos a biodiesel [XPI]*.
- Serrano, L. M. (2012). *Análise comparativa do desempenho de motores de combustão interna quando utilizam biocombustíveis*. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Coimbra. Obtido em 4 de fevereiro de 2023, de <https://iconline.ipleiria.pt/handle/10400.8/752>
- Serrano, L. M., Santana, B., Carvalho, P. M., & Correia, C. (abril de 2023). Using B15 in vehicles on real on-road circumstances - A case study. *Cleaner Engineering and Technology*, 13. doi:<https://doi.org/10.1016/j.clet.2023.100616>
- Serrano, L., Pereira, N., & Carvalho, P. M. (9 de maio de 2021). Comparative Performance and Efficiency of EURO VI Heavy-Duty Engines Fueled by Biodiesel, HVO and Diesel. *Proceedings of the 1st International Conference on Water Energy Food and Sustainability*, pp. 271-279. doi:https://doi.org/10.1007/978-3-030-75315-3_31
- Shen, X., Shi, J., Cao, X., Zhang, X., Zhanga, W., Wua, H., & Yao, Z. (6 de agosto de 2018). Real-world exhaust emissions and fuel consumption for diesel vehicles fueled by waste cooking oil biodiesel blends. *Atmospheric Environment*, pp. 249-257. doi:<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.08.004>
- Smajla, I., Sedlar, D., Drljača, B., & Jukić, L. (6 de fevereiro de 2019). Fuel Switch to LNG in Heavy Truck Traffic. *SDEWES 2018 Conferences on Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems*, p. 19. doi:<https://doi.org/10.3390/en12030515>
- Tat, M. (2003). *Investigation of oxides of nitrogen emissions from biodiesel-fueled engines*. Iowa - USA. Obtido em 10 de abril de 2023, de <https://core.ac.uk/download/pdf/38896888.pdf>
- Tavares, N. (2019). *Introdução ao GNC*. Obtido em 12 de Março de 2023, de APVGN: <https://www.apvgn.pt/index.php/introducao-ao-gnc>
- testo. (s.d). *Instruction manual testp 350 M/XL*. Lenzkirch. Obtido de <https://static-int.testo.com/media/4f/63/12fa44a894ea/testo-350-M-XL-Instruction-Manual.pdf>

Anexos

Anexo A – Procedimento de recolha de amostras de óleo

Preparação da instrumentação

- Localizar a vareta de nível do óleo na viatura. Caso seja necessário, solicitar ao responsável de manutenção/motorista o levantamento da cabine da viatura para acesso à mesma;
- Retirar a vareta de nível do óleo e medir a distância entre a extremidade mergulhada no óleo e a extremidade de encosto no tubo da vareta de nível, de modo a determinar o comprimento do tubo de recolha necessário;
- Cortar o tubo de recolha com um comprimento igual ao medido anteriormente, acrescentando um comprimento de trabalho, entre 40 e 60 cm, dependente de cada situação, cortando a extremidade a introduzir no óleo em cunha ou em V de modo a evitar a obstrução do tubo no contacto com as paredes do cárter (Figura 79). Assinalar no tubo o comprimento da vareta medido anteriormente;



Figura 79 - Corte em cunha da extremidade do tubo a inserir no cárter

- Colocar a vareta de nível no respetivo alojamento de modo a proceder à preparação do motor.

Preparação do motor

- Caso o motor se encontre frio, colocar o mesmo em funcionamento ao ralenti durante um período de 10 a 15 minutos;
- Caso o motor se encontre parado à mais de uma hora, colocar o mesmo em funcionamento ao ralenti durante cerca de 1 minuto;
- Caso o motor se encontre quente, aguardar cerca de uma hora para que a sua temperatura diminua e colocar o mesmo em funcionamento ao ralenti durante cerca de 1 minuto.

Figura 23: Procedimento de recolha de amostras de óleo, retirado de (Almeida, 2022), Parte – 1

Recolha da amostra

- A amostra deve ser recolhida tão rápido quanto possível após a paragem do motor, para que esta represente o estado do lubrificante em condições normais de funcionamento do motor;
- Retirar a vareta de nível e acondicionar a mesma num local limpo. Avaliar a temperatura da vareta por resistência ao toque, que na zona mergulhada no óleo deve permitir “agarrar” com a mão após ser retirada do motor.
- Introduzir na bomba de vácuo o tubo e o frasco de recolha, deixando um comprimento de segurança de tubo, de cerca de 5 cm, no interior do frasco (Figura 80).



Figura 80 - Comprimento de segurança a deixar no interior do frasco de recolha

- Verificar o aperto dos componentes de modo a garantir a estanquicidade do conjunto (Figura 81).



Figura 81 – Montagem da bomba de vácuo, frasco e tubo de recolha

- Introduzir o tubo de recolha no tubo da vareta de nível até à marca assinalada anteriormente, correspondente ao comprimento da vareta (Figura 82).

Figura 24: Procedimento de recolha de amostras de óleo, retirado de (Almeida, 2022), Parte – 2



Figura 82 – Inserção do tubo de recolha no tubo da vareta de nível

- Aspirar o óleo com a bomba de vácuuo, mantendo o frasco de recolha na vertical de modo a não contaminar a mesma (Figura 83).



Figura 83 – Posição do frasco de recolha durante a realização da recolha

- Encher o frasco até cerca de $\frac{3}{4}$ da capacidade (Figura 84). É necessário considerar que existe um retardamento inicial no enchimento do frasco e que o seu limite máximo não pode ser ultrapassado, uma vez que tal implica a contaminação da bomba e a consequente contaminação cruzada entre amostras de óleo de diferentes viaturas;



Figura 84 – Amostra de óleo do motor

- Retirar o tubo de aspiração do tubo da vareta de nível quando o nível do frasco se aproximar dos $\frac{3}{4}$;
- Retirar cuidadosamente o frasco da bomba de vácuo e selar devidamente a respetiva tampa, armazenando o mesmo no interior de um saco com fecho de correr nunca antes utilizado;
- Em cada recolha efetuada devem ser recolhidas duas amostras idênticas, uma para análise e outra para contraprova;
- Após a realização da recolha, o tubo de recolha deve ser retirado de forma a não contaminar a bomba de vácuo e isolado do restante equipamento no interior de um saco descartável;
- Colocar a vareta de nível no respetivo alojamento e limpar qualquer área do motor ou da viatura contaminada durante o processo de recolha utilizando líquido de limpeza de travão;

Figura 26: Procedimento de recolha de amostras de óleo, retirado de (Almeida, 2022), Parte - 4