



C •

FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS
E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

Luís Manuel Ventura Serrano

ANÁLISE COMPARATIVA DO DESEMPENHO DE MOTORES
DE COMBUSTÃO INTERNA QUANDO
UTILIZAM BIOCOMBUSTÍVEIS

Tese de Doutoramento em Engenharia Mecânica, na especialidade de
Aerodinâmica, apresentada à Faculdade de Ciências e Tecnologia da
Universidade de Coimbra para obtenção do grau de Doutor

Orientador: Prof. Doutor Manuel Carlos Gameiro da Silva

Coimbra, 2012

ISBN: 978-972-8954-30-7

Esta página foi intencionalmente deixada em branco.

AO MEU PAI...

**A SAUDADE É SEMPRE QUERER PARTILHAR AS COISAS BOAS QUE NOS
ACONTECEM, MESMO COM QUEM JÁ PARTIU.**

Esta página foi intencionalmente deixada em branco.

***"Gosto de imaginar que o Mundo inteiro é uma grande máquina.
Sabes, as máquinas nunca têm peças a mais.
Possuem o número e tipo exato de peças que necessitam.
Assim, assumo que se o Mundo inteiro é uma grande máquina,
eu tenho de estar aqui por alguma razão."***

Frase de Brian Selznick,
retirada do livro "A Invenção de Hugo Cabret"

Esta página foi intencionalmente deixada em branco.

AGRADECIMENTOS

Tal como na parábola de “pegadas na areia”, na nossa vida, quando olhamos para trás e julgamos que estamos sós, são muitas vezes as pegadas de outros que vemos. Sinto que bastas vezes neste percurso, foi o apoio de muitos que me permitiu continuar o meu caminho, mesmo quando os escolhos pareciam inultrapassáveis.

Num trabalho com a duração de cerca de seis anos, foram de facto várias as pessoas que direta ou indiretamente dele fizeram parte e permitiram que se fosse fazendo caminho, ultrapassando as dificuldades e contratempos. Algumas das pessoas que me ajudaram, provavelmente nem se deram conta da importante colaboração que tiveram, tendo resultado de uma simples conversa ou de genuínas palavras de alento.

Como se compreende, não me é possível aqui exprimir diretamente o meu agradecimento a todas essas pessoas, mas existem também todas as outras cuja contribuição para o presente trabalho foi fundamental e decisiva e que são pessoalmente ou institucionalmente identificáveis.

Não posso deixar de iniciar este meu sincero agradecimento ao meu orientador de seminário da licenciatura, de mestrado e agora de doutoramento, Professor Manuel Carlos Gameiro da Silva. Neste parágrafo certamente que não conseguirei exprimir toda a gratidão que sinto, mas gostava contudo de manifestar a minha profunda admiração e o privilégio que sinto pelo facto de ter partilhado comigo a sua amizade e extraordinária sensatez, conhecimento e exemplo de humanidade sempre presente nas suas ações.

Se este trabalho atingiu grande parte dos objetivos propostos, também tal é devido ao Rui Câmara e ao Vasco Carreira. Foram de facto os meus braços direito e esquerdo na realização de ensaios, sempre que precisei de apoio na preparação e na realização de ensaios, quer no banco de motores, quer nos ensaios em estrada, foi a eles que recorri e foram eles que sempre se manifestaram disponíveis para me prestar esse apoio.

Ainda tenho também de manifestar o imenso agradecimento à ADAI, casa que considero também já minha e onde me foram concedidas todas as condições para realizar o trabalho apresentado. Para além das instalações, a ADAI vale essencialmente pelas pessoas e destas tenho de deixar a minha gratidão especial para o Sr. Cardoso, para a Ana Rosa, para o Gonçalo Fonseca, para a Ana Ramos e para o Mário Mateus.

Uma boa parte do trabalho desenvolvido resultou do protocolo estabelecido com a PRIO ENERGY SA. Foram eles que me cederam os combustíveis, algumas ideias e o crescente ânimo para a realização deste doutoramento, porque através desta colaboração via sempre a aplicação e utilidade do trabalho realizado. Não posso deixar de prestar a minha homenagem a alguém que é um exemplo de profissionalismo e com quem acabei por estabelecer amizade. Obrigado Cristina Correia.

Também o Instituto Politécnico de Leiria prestou um apoio essencial para o desenrolar deste doutoramento, quer através da disponibilização de meios, como os existentes no laboratório de engenharia automóvel, quer pelas dispensas de componente letiva e outras iniciativas integradas na bolsa PROTEC concedida pela FCT, mas operacionalizada e garantida até final pelo IPL.

Falando do IPL, não posso deixar de manifestar a minha gratidão a todos os colegas da Escola Superior de Tecnologia e Gestão, com especial carinho para os colegas do DEM em particular aos GCDC. Tenho especial dívida de gratidão ao Nuno Pires, profundo conhecedor da área automóvel e com uma capacidade de trabalho absolutamente notável, tendo prestado um auxílio precioso e fundamental para a realização de ensaios no banco de rolos e na preparação do motor VW. Também quero agradecer ao Carlos Dias. Não posso deixar de manifestar aqui a minha admiração e respeito pelos amigos Helder Santos, Nuno Martinho, Joel Morgado e Paulo Carvalho com quem partilhei alegrias e dificuldades, com quem tive discussões importantes para a resolução de alguns problemas e ainda articulei opções no sentido de mantermos equilibrada a distribuição de trabalho na área de Termodinâmica e Fluidos, de modo a que todos pudéssemos ir avançando com os nossos doutoramentos.

Na Universidade de Coimbra, existem também pessoas que prestaram uma generosa contribuição através da disponibilidade de meios necessários à realização do presente trabalho, devendo-se destacar o Prof. Pedro Carvalheira, o Prof. José Baranda e o Prof. Ricardo Mendes do Dep. Eng^a Mecânica e o Prof. Abel Ferreira do Dep. Eng^a Química.

O motor Volvo foi graciosamente cedido pela Câmara Municipal de Coimbra, pelo que fica aqui o meu agradecimento, personalizado no Eng^o Falcão e Eng^o Carlos Dinis. Para além do motor, foi disponibilizada toda a colaboração necessária para colocar o motor em condições de poder ser testado. Deste modo, para além da Câmara Municipal de Coimbra, os responsáveis já citados manifestaram ainda a disponibilidade de técnicos, ficando para todos o meu respeito e admiração, não podendo deixar de referir o Sr. José Simões e o Sr. João Paulo, a quem reconheço a inequívoca competência, humildade e capacidade de trabalho extraordinária.

Para a Sintética, nomeadamente para o José Nunes, quero deixar um abraço de amizade e respeito pelo apoio, pelas conversas e pelo conhecimento partilhados, um grande bem-haja.

Também a ARRIVA Portugal prestou um apoio importante para o trabalho realizado, razão pela qual deixo aqui o meu sincero agradecimento ao Sr. Manuel Oliveira e ao Dr. Filipe Pereira.

Quero ainda agradecer à minha mãe, aos meus sogros, minha irmã e meus cunhados e cunhada. Sei que não vos posso devolver aquilo que a preocupação com este projeto nos levou, mas quero agradecer o vosso inquestionável apoio e confiança, foram eles que muitas vezes de forma invisível me iam sustentando neste caminho montanhoso.

Finalmente mas acima de tudo para aqueles que todos os dias me esperam em casa. Quero deixar aqui expresso um pedido de desculpas pela menor disponibilidade física e mental, mas principalmente quero agradecer os sorrisos, as conversas, as palermices e as brincadeiras. Foi através destes pequenos tesouros que escondem no vosso olhar que encontrei forças para todos os dias avançar mais um passo. Se dias houve em que as coisas regrediam, era no vosso olhar e no vosso carinho que eu encontrava a força necessária para avançar novamente. Um beijo grande do pai para ti Rafaela, também para ti Daniela e para ti João Pedro.. Para ti Gabriela, sei que não vou conseguir voltar a dar-te o tempo que te roubei, sei que não vou conseguir compensar-te pelos projetos que deixas-te de poder enfrentar para que eu pudesse concretizar este desafio, sei que também não posso voltar a dar-te a minha companhia nos momentos que passas-te sozinha a tratar dos nossos filhos ou simplesmente só. Quero por isso deixar-te as minhas palavras de reconhecimento e admiração pelo teu papel de mãe, mas acima de tudo pela tua paciência e compreensão neste difícil papel de esposa deste tipo que te ama infinitamente muito (!!!).

RESUMO

Considerando as atuais circunstâncias de dependência energética relativamente ao petróleo, com implicações claras para a sociedade ao nível económico, energético e ambiental e acentuadas no setor dos transportes pela dificuldade em encontrar soluções evidentes, foi elaborado um estudo para avaliar os impactos da utilização de biocombustíveis em motores de combustão interna.

A importância do presente trabalho é justificada pela tendência crescente da utilização de biodiesel, quer em Portugal, quer nos outros países europeus. De facto, nas atuais circunstâncias, esta é uma solução efetiva, surgindo com a capacidade de substituir em parte aquele que é o combustível mais utilizado pelos transportes rodoviários em Portugal, o gasóleo.

No presente estudo, de cariz essencialmente experimental, utilizou-se um banco de ensaios de motores com um dinamómetro hidráulico, um banco de rolos e ensaios em estrada. Através destas metodologias avaliou-se a forma como a utilização de biodiesel em motores de veículos afeta o consumo, o desempenho e as emissões desses mesmos veículos.

Foram consideradas motorizações de veículos ligeiros e pesados, tendo sido realizados estudos comparativos dos resultados de laboratório com os obtidos em estrada, nas condições reais de utilização dos veículos. Relativamente aos veículos pesados, foi feita a análise de dados de uma frota de veículos de transporte de passageiros e a avaliação do comportamento de um motor Volvo de 6 cilindros em banco de ensaios, considerando-se a utilização de diversos combustíveis constituídos por diferentes proporções de biodiesel e gasóleo. No caso dos veículos ligeiros, foi elaborada e implementada uma nova metodologia de ensaios em estrada, considerando a utilização simultânea de dois veículos similares, abastecidos por combustíveis diferentes (B0 e B20). Estes resultados foram comparados com os dados obtidos pelos mesmos veículos no banco de rolos e com os resultados de ensaios de um motor VW 1.9 TDI no banco de ensaios de motores.

Concluiu-se que o impacto da utilização de biodiesel em substituição de gasóleo, principalmente quando se considera a utilização de incorporações até 20% de biodiesel, não é significativo ao nível energético. Pode-se admitir uma justificação em termos ambientais, pela redução de emissão de gases com efeito de estufa devido ao carácter renovável do biodiesel e em termos económicos pela diminuição da dependência de petróleo e eventual criação de emprego e riqueza interna. Em termos do consumo de combustível, não é absolutamente claro que a utilização de biodiesel implique um aumento desse consumo pelo facto de possuir menor conteúdo energético por litro de combustível. Atendendo aos dados obtidos, para determinadas situações ocorre um aumento da eficiência energética com a utilização de biodiesel em pequenas proporções de incorporação no gasóleo, sendo verificado que a utilização de um combustível com menor quantidade de energia pode permitir uma maior disponibilidade energética. É também claro que em função do comportamento dos motores quando sujeitos a diferentes tipos de exigência, correspondente a diferentes tipologias de percurso, ocorre uma distinta avaliação em termos de consumo e emissões de NOx, quando o motor é abastecido com uma mistura de biodiesel em gasóleo.

O trabalho realizado permitiu estabelecer metodologias de ensaios, aumentando a fiabilidade na avaliação comparativa da utilização de distintos combustíveis em sistemas de propulsão de veículos automóveis.

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

ABSTRACT

Having in mind the current energy dependency on oil, with clear implications on economic, energetic and environmental areas, especially in the transport sector by the apparent difficulty in finding alternative solutions, a study aiming to evaluate the implications of the use of biofuels in internal combustion engines was designed.

The importance of this research is fully justified by the growing trend of biodiesel use in Portugal and other European countries. In fact, under the current circumstances, this is an effective solution, since it has the ability to partially replace the use of diesel that is the most used fuel by road transport in Portugal.

The present study, primarily supported by experimental approaches, integrates the use of an engine test bench with a hydraulic dynamometer, the use of a chassis dynamometer and the establishment of methodologies for road tests. With the use of these methods the goal was to evaluate how the use of biodiesel in motor vehicles affects consumption, performance and emissions.

The performed work included the engine evaluation of heavy duty vehicles and cars, considering the comparative study of results obtained in laboratory and in real use conditions. In this context, for heavy vehicles, the analysis of data from a fleet of vehicles for passenger transportation was considered and the evaluation of a 6 cylinder Volvo on an engine bench tests was performed, considering the use of various blends composed of different biodiesel and diesel proportions. For light vehicles a new methodology for the road test was developed and implemented, which implied the simultaneous use of two similar cars, differently fueled (B0 and B20). These results were compared with data obtained by this same vehicles on a chassis dynamometer. Tests with an engine VW 1.9 TDI on an engine test bench were also performed.

By analyzing the obtained results, it is possible to conclude that the impact of the use of biodiesel instead of diesel fuel, especially when one considers the use of embodiments up to 20% biodiesel, is not significant at a energetic level; however it may be justified in environmental terms, by the reduction of greenhouse gases emission due to the renewable character of biodiesel, and economically by the reduction of the dependence on oil and eventual inner creation of employment and wealth. In terms of fuel consumption, it isn't absolutely clear that the use of biodiesel involves an increase of consumption justified by its lower energy content per fuel liter. Observing the obtained data, for certain situations there is an increase in energy efficiency with the incorporation of biodiesel in small proportions in diesel, being clear that the use of a fuel with less energy can allow increased availability of energy. It is also clear that due to the behavior of engines when subjected to different types of requirements, corresponding to different types of routes, there is a distinct evaluation in terms of consumption and NOx emissions when the engine is fueled with a blend of biodiesel in diesel.

It is possible to establish a certain type of preferential use of vehicles and thus make a more tailored energy option with environmental and economic implications, increasing the reliability on the comparative assessment of the use of different systems propulsion, thus resulting in a surplus of the presented work.

Esta página foi intencionalmente deixada em branco.

ÍNDICE

	PÁGINA
AGRADECIMENTOS	v
RESUMO	vii
ABSTRACT	ix
ÍNDICE	xi
LISTA DE FIGURAS	xvii
LISTA DE TABELAS	xxi
NOMENCLATURA	xxiii

	PÁGINA
CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO	
1.1 Enquadramento	3
1.2 Identificação do problema	6
1.3 Motivação	8
1.4 Âmbito do trabalho	9
1.5 Abordagem científica	10
1.6 Estrutura	11
1.7 Objetivos	12

CAPÍTULO II – FUNDAMENTAÇÃO E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1	Introdução à revisão bibliográfica	15
2.1.1	Objetivos da revisão bibliográfica	16
2.1.2	Metodologia da revisão bibliográfica	16
2.1.3	Organização do capítulo	17
2.2	Utilização de Biodiesel em motores de combustão interna	19
2.2.1	Especificações relativas a ensaios de motores	20
2.2.2	Energia e Transportes – obsessão mundial	22
2.2.3	Breve análise histórica da utilização de biodiesel	25
2.2.4	Produção	26
2.2.5	Propriedades	28
2.2.6	Armazenamento e durabilidade do Biodiesel	35
2.2.7	Lubrificação e Arranque a frio	36
2.2.8	Spray e Injeção	37
2.2.9	Combustão	40
2.2.10	Utilização de biodiesel e avaliação de ciclo de vida	43
2.3	Análise conclusiva sobre o desempenho, emissões e consumo de biodiesel comparativamente ao gasóleo	45
2.3.1	Introdução	45
2.3.2	Emissões de monóxido de carbono (CO)	45
2.3.3	Emissões de hidrocarbonetos (HC)	47
2.3.4	Emissões de fumos	48
2.3.5	Emissões de óxidos de azoto (NOx)	50
2.3.6	Consumo e desempenho do motor	53
2.4	Sumário do capítulo	57
2.4.1	Resumo da pesquisa	57
2.4.2	Análise crítica ao capítulo	60
2.4.3	Questões orientadoras do trabalho a realizar	61

CAPÍTULO III – MONTAGEM EXPERIMENTAL E RECURSOS

3.1	Introdução	65
3.1.1	Metodologia geral	65
3.1.2	Objetivos	67
3.1.3	Resumo	68
3.2	Ensaaios de motores recorrendo a um banco de ensaios de motores	70
3.2.1	Dinamómetro	71
3.2.2	Balança de combustível	75
3.2.3	Opacímetro	77
3.2.4	Analizador de gases de escape	78
3.2.5	Outros sistemas de medição	79
3.2.6	Software CompComb	81
3.3	Ensaaios de veículos em banco de rolos	85
3.3.1	Banco de rolos	85
3.3.2	Balança para medição de consumo de combustível	87
3.3.3	Software	88
3.4	Ensaaios em veículos em circulação em condições reais de estrada	90
3.4.1	Sistema de aquisição de dados com ligação OBDII e GPS	91
3.4.2	Metodologia associada à realização de ensaios em estrada	92
3.4.3	Pesagem de combustível	94
3.5	Propriedades dos combustíveis utilizados	96
3.5.1	Viscosidade	96
3.5.2	Densidade	100
3.5.3	Poder calorífico	101
3.6	Sumário do capítulo	104
3.6.1	Resumo	104
3.6.2	Análise crítica do capítulo	106
3.6.3	Linhas orientadoras do trabalho a realizar	107

CAPÍTULO IV – APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

4.1	Introdução	111
4.1.1	Metodologia geral	112
4.1.2	Objetivos	114
4.1.3	Resumo	114
4.2	Ensaio de veículos pesados	116
4.2.1	Realização de ensaios em banco de motores	117
4.2.1.1	Ensaio em banco de motores – regime estacionário	118
4.2.1.1.1	Resultados de consumo de combustível	120
4.2.1.1.2	Resultados de emissões de gases de escape	126
4.2.1.2	Ensaio em banco de motores – regime transiente	130
4.2.1.2.1	Resultados de consumo de combustível	132
4.2.1.2.2	Resultados de emissões de NOx	137
4.2.2	Análise de resultados de consumo numa frota de autocarros	139
4.2.2.1	Resultados de consumo de combustível	141
4.2.2.2	Análise económica da utilização de biodiesel	144
4.2.3	Discussão de resultados	147
4.3	Ensaio de veículos ligeiros	149
4.3.1	Ensaio em banco de rolos e em estrada	149
4.3.1.1	Estado da arte relativamente aos ensaios em estrada	149
4.3.1.2	Metodologia utilizada nos ensaios em estrada	151
4.3.1.2.1	Testes em banco de rolos	154
4.3.1.2.2	Testes feitos em estrada	155
4.3.1.3	Resultados	159
4.3.1.3.1	Resultados obtidos nos testes realizados em banco de rolos	159
4.3.1.3.2	Resultados obtidos nos testes realizados em estrada	162
4.3.1.4	Desempenho do método de ensaios em estrada	165
4.3.2	Ensaio em banco de motores	167
4.3.2.1	Metodologia	168
4.3.2.2	Resultados	171
4.3.2.2.1	Consumo de combustível	171
4.3.2.2.2	Emissões de NOx	178
4.3.2.3	Discussão de resultados	182
4.4	Sumário do capítulo	184
4.4.1	Resumo	185
4.4.2	Análise crítica do capítulo	187

CAPÍTULO V – CONCLUSÃO	
5.1 Sinopse	191
5.2 Discussão sobre as metodologias utilizadas e resultados obtidos	193
5.3 Análise crítica do trabalho	195
5.4 Conclusões	197
5.5 Trabalho de continuidade a realizar no futuro	198
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	199
ANEXO I	217

Esta página foi intencionalmente deixada em branco.

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO

PÁGINA

<i>Fig. 1.1 – Distribuição do consumo de energia por setor de atividade.</i>	4
<i>Fig. 1.2 – Distribuição do consumo de energia no transporte rodoviário por tipo de combustível</i>	4
<i>Fig. 1.3 – Estrutura adotada na abordagem do trabalho de investigação.</i>	10

CAPÍTULO II – FUNDAMENTAÇÃO E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

<i>Fig. 2.1 – Estrutura base da organização da revisão bibliográfica</i>	17
<i>Fig. 2.2 – Esquema representativo do processo de transesterificação</i>	27
<i>Fig. 2.3 – Variação da viscosidade em função da quantidade de biodiesel presente no combustível (Kinast 2003).</i>	32
<i>Fig. 2.4 – Esquema que relaciona as propriedades do combustível com os possíveis efeitos no motor.</i>	34
<i>Fig. 2.5 – Mecanismo de formação do NOx em função dos vários parâmetros intervenientes</i>	53

CAPÍTULO III – MONTAGEM EXPERIMENTAL E RECURSOS

<i>Fig. 3.1 – Recursos para realização de trabalho experimental</i>	68
<i>Fig. 3.2 – Vista do motor acoplado no dinamómetro, com restantes equipamentos anexos.</i>	70
<i>Fig. 3.3 – a) Freio de corda; b) Freio de Prony (Plint e Martyr 1999)</i>	71
<i>Fig. 3.4 – Representação do dinamómetro Schenck D230 em foto e em corte esquemático.</i>	72
<i>Fig. 3.5 – Diagrama de operação do dinamómetro Schenck D230</i>	73
<i>Fig. 3.6 – Esquema representativo do circuito de controlo da velocidade de rotação do motor.</i>	74
<i>Fig. 3.7 – Balança de combustível e ligações para abastecimento do motor.</i>	76
<i>Fig. 3.8 – Opacímetro AVL 437e acessório para colocação da sonda de gases respetiva.</i>	77
<i>Fig. 3.9 – Analisador de gases Horiba Mexa 584L e imagem da colocação da sonda de aspiração dos gases, elemento secador e pré-filtro.</i>	79
<i>Fig. 3.10 – Representação dos sistemas de medida utilizados no banco de ensaios de motores</i>	80
<i>Fig. 3.11 – Imagem da sala de controlo onde são visíveis os sistemas de aquisição e controlo.</i>	81
<i>Fig. 3.12 – Imagem da janela de monitorização do software CompComb.</i>	82
<i>Fig. 3.13 – Esquema representativo do sistema de aquisição de dados e controlo do banco de ensaios de motores.</i>	84
<i>Fig. 3.14 – Imagem do banco de ensaios instalado no Laboratório de Eng^a Automóvel (IPL)</i>	86
<i>Fig. 3.15 – Princípio de medição da potência com banco de ensaios de rolo utilizando um dinamómetro com funcionamento magnético.</i>	87
<i>Fig. 3.16 – Imagem do sistema utilizado para medição do consumo de combustível nos ensaios em banco de rolos.</i>	88
<i>Fig. 3.17 – Instalação experimental com o veículo no banco de rolos no laboratório de Eng^a Automóvel.</i>	89
<i>Fig. 3.18 – Imagem do sistema utilizado para aquisição de dados pela ficha OBD II e de GPS.</i>	92
<i>Fig. 3.19 – Balança utilizada na pesagem do combustível nos ensaios em estrada.</i>	94
<i>Fig. 3.20 – Representação gráfica dos resultados obtidos no processo de calibração da balança utilizada na medição de massa de combustível nos ensaios em estrada</i>	95
<i>Fig. 3.21 – Imagem do viscosímetro utilizado</i>	97
<i>Fig. 3.22 – Gráfico com dados da verificação do viscosímetro utilizando o líquido de calibração.</i>	98

<i>Fig. 3.23 – Gráfico representativo da variação da viscosidade com a temperatura para cada mistura de combustível.</i>	98
<i>Fig. 3.24 – Gráfico representativo da variação da viscosidade com a % de biodiesel misturado no combustível para as temperaturas consideradas.</i>	99
<i>Fig. 3.25 – Balança Precisa utilizada no processo de determinação da densidade dos combustíveis.</i>	100
<i>Fig. 3.26 – Variação da massa volúmica do combustível em função da quantidade de biodiesel misturado.</i>	100
<i>Fig. 3.27 – Calorímetro Parr utilizado para determinação do poder calorífico dos combustíveis.</i>	101
<i>Fig. 3.28 – Estrutura experimental a utilizar e linhas de orientação do trabalho a desenvolver.</i>	107

CAPÍTULO VI – APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

<i>Fig. 4.1 – Estrutura do capítulo 4.</i>	112
<i>Fig. 4.2 – Estrutura da parte do trabalho sobre a utilização de biodiesel em veículos pesados.</i>	116
<i>Fig. 4.3 – Montagem do motor Volvo TD41 no banco de ensaios de motores.</i>	117
<i>Fig. 4.4 – Plano de ensaios selecionado</i>	120
<i>Fig. 4.5 – Resultados de consumo obtidos para os diferentes combustíveis utilizados.</i>	122
<i>Fig. 4.6 – Resultados de variação percentual do consumo obtido para os diferentes combustíveis utilizado, relativamente ao B0.</i>	123
<i>Fig. 4.7 – Resultados da variação percentual do consumo obtido com Binário=50Nm</i>	124
<i>Fig. 4.8 – Resultados da variação percentual do consumo obtido com Binário=100Nm</i>	124
<i>Fig. 4.9 – Resultados da variação percentual dos consumos obtidos com Rotação=2000rpm</i>	125
<i>Fig. 4.10 – Resultados comparativos das emissões de NOx entre os diversos combustíveis</i>	127
<i>Fig. 4.11 – Resultados comparativos das emissões de HC entre os diversos combustíveis</i>	129
<i>Fig. 4.12 – Representação dos parâmetros impostos em cada um dos ciclos transientes A e B.</i>	131
<i>Fig. 4.13 - Variação do consumo volumétrico global no ciclo A para os combustíveis utilizados.</i>	133
<i>Fig. 4.14 - Variação do consumo volumétrico global no ciclo B para os combustíveis utilizados.</i>	133
<i>Fig. 4.15 - Valores de Eficiência de Conversão Energética (ECE) para os vários combustíveis para o ciclo A.</i>	134
<i>Fig. 4.16 - Valores de Eficiência de Conversão Energética (ECE) para os vários combustíveis para o ciclo B.</i>	134
<i>Fig. 4.17 - Variação do consumo específico e ECE para os vários combustíveis testados nos ciclos A e B.</i>	136
<i>Fig. 4.18 - Comparação das emissões de NOx para os vários combustíveis no ciclo A.</i>	137
<i>Fig. 4.19 - Comparação das Emissões de NOx para os vários combustíveis no ciclo B.</i>	138
<i>Fig.4.20 – Alguns autocarros da frota de veículos da empresa Arriva – Portugal, Guimarães.</i>	139
<i>Fig. 4.21 - Constituição da frota de veículos em função da classificação da tecnologia do sistema de exaustão de gases de escape.</i>	140
<i>Fig. 4.22 – Resultados de consumo relativos à sub-frota cidadina TUG</i>	142
<i>Fig. 4.23 - Resultados de consumo relativos à sub-frota extraurbana ARRIVA</i>	143
<i>Fig. 4.24 – Estrutura da metodologia implementada.</i>	153
<i>Fig. 4.25 – Esquema representativo da montagem experimental utilizada nos ensaios realizados em banco de rolos (medições feitas no eixo da frente – eixo de tração).</i>	154
<i>Fig. 4.26 – Imagem da realização de ensaios em banco de rolos</i>	155
<i>Fig. 4.27 – Veículos utilizados nos ensaios em estrada</i>	156
<i>Fig. 4.28 – Utilização dos equipamentos nos ensaios em estrada (aquis. Dados por OBD + GPS na imagem da esquerda e paisagem de reservatórios de combustível na imagem da direita).</i>	156
<i>Fig. 4.29 – Imagem onde é possível identificar as ligações efetuadas na alteração do circuito de combustível, permitindo o abastecimento e retorno do combustível ao reservatório utilizado.</i>	157

<i>Fig. 4.30– Imagens representativas da circulação dos veículos cumprindo as distâncias definidas e modos de limitação ou regulação de velocidade impostos pelo protocolo.</i>	158
<i>Fig. 4.31 – Representação do circuito urbano percorrido na cidade de Coimbra, utilizando o software “Google Earth”.</i>	159
<i>Fig. 4.32 – Resultados de desempenho para os dois veículos (RV e TV) com os dois tipos de combustíveis (B0 e B20)</i>	160
<i>Fig. 4.33 – Comparação do consumo obtido no veículo TV nos ensaios em banco de rolos, quando abastecido com B0 e B20.</i>	161
<i>Fig. 4.34 – Evolução temporal das velocidades dos dois veículos nos testes no percurso extraurbano.</i>	162
<i>Fig. 4.35 – Representação dos resultados relativos ao consumo dos veículos nos testes em estrada considerando a: análise gravimétrica (a,b); análise energética (c,d); análise volúmica (e,f).</i>	164
<i>Fig. 4.36 – Banco de ensaios de motores com o motor VW 1.9 TDI instalado.</i>	167
<i>Fig. 4.37 – Representação dos pontos correspondentes aos parâmetros de funcionamento estabilizado para medição de consumo e emissões.</i>	169
<i>Fig. 4.38 – Esquema representativo da montagem experimental existente no banco de ensaios de motores e utilizada nos ensaios do motor VW 1.9TDI.</i>	170
<i>Fig. 4.39 – Comparação dos resultados de consumo específico [g/kWh] com B0 e B20.</i>	172 e 173
<i>Fig. 4.40 – Comparação dos resultados de consumo específico [lts/kWh] com B0 e B20.</i>	174 e 175
<i>Fig. 4.41 – Comparação dos resultados de eficiência de conversão energética [%] com B0 e B20.</i>	176 e 177
<i>Fig. 4.42 – Comparação dos resultados de emissões de NOx [ppm/kWh] com B0 e B20</i>	179 e 180

CAPÍTULO V – CONCLUSÃO

Esta página foi intencionalmente deixada em branco.

LISTA DE TABELAS

PÁGINA

CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO

CAPÍTULO II – FUNDAMENTAÇÃO E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

<i>Tab. 2.1 – Tabela resumo sobre os objetivos do trabalho e as expectativas de contribuição para atingir esses objetivos.</i>	61
--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----------

CAPÍTULO III – MONTAGEM EXPERIMENTAL E RECURSOS

<i>Tab. 3.1 – Principais características associadas à medição dos parâmetros disponíveis no analisador de gases.</i>	70
<i>Tab. 3.2 – Resultados relativos ao PCS obtidos experimentalmente para os vários combustíveis base utilizados.</i>	102
<i>Tab. 3.3 – Poder calorífico superior dos vários combustíveis utilizados no estudo</i>	103

CAPÍTULO IV – APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

<i>Tab. 4.1 – Propriedades dos combustíveis base utilizados nos ensaios.</i>	118
<i>Tab. 4.2 - Plano de ensaios selecionado</i>	120
<i>Tab. 4.3 – Resultados obtidos para o caso de utilização de gasóleo.</i>	121
<i>Tab. 4.4 – Valores correspondentes aos ciclos de ensaios transientes impostos</i>	131
<i>Tab. 4.5 – Análise de custos associados ao combustível da frota considerada.</i>	145
<i>Tab. 4.6 – Propriedades dos combustíveis base utilizados nos ensaios.</i>	152
<i>Tab. 4.7 – Metodologia utilizada para cada percurso selecionado</i>	157
<i>Tab. 4.8 – Principais características do motor utilizado nos ensaios em banco de motores.</i>	168

CAPÍTULO V – CONCLUSÃO

Esta página foi intencionalmente deixada em branco.

NOMENCLATURA

ADAI	Associação para o Desenvolvimento da Aerodinâmica Industrial
APMS	Antes do ponto morto superior.
ARTEMIS	Assessment and Reliability of Transport Emission Models and Inventory Systems
BD	Biodiesel.
Bsfc	Melhor consumo específico de combustível (Best specific fuel consumption) kg/kWh].
BXX	Combustível contendo XX% de biodiesel incorporado.
CAN	Rede de comunicação por área de controlo (Control Area network).
C/A	Coarse/acquisition
CO	Monóxido de carbono.
CO₂	Dióxido de carbono.
CSV	Comma separate values
DEM	Departamento de Engenharia Mecânica
DEQ	Departamento de Engenharia Química
EPA	Environment Protection Agency
ECE	Eficiência de Conversão Energética.
ECU	Unidade de Controlo Eletrónico (Electronic Control Unit)
Fev	Fevereiro
FTP	Federal Test Procedure (USA)
GPS	Sistema de posicionamento global (Global Positioning System)
HC	Hidrocarbonetos.
IPL	Instituto Politécnico de Leiria
ISO	International Organization for Standardization
KWP	Protocolo de palavras chave (key word protocol).
LAI	Laboratório de Aerodinâmica Industrial
NEDC	New European Drive Cycle (CE)
Nov	Novembro
NO_x	Emissões de óxidos de azoto (NO, NO ₂ e N ₂ O).
OBD	Diagnóstico a bordo (On-board diagnostic).
P-Code	Precision Code
PCI	Poder Calorífico Inferior [kJ/kg]
PCS	Poder Calorífico Superior [kJ/kg]
PM	Partículas.
PWM	Impulsos com modulação (pulse with modulation)
RV	Veículo de referência
SAE	Society of Automotive Engineers
sfc	Consumo específico de combustível.
TV	Veículo de teste
UC	Universidade de Coimbra
VPW	Impulsos Variáveis com modulação (variable pulse with modulation)

Esta página foi intencionalmente deixada em branco.

INTRODUÇÃO

Sumário:

1. Qual é a situação atual do consumo de energia no setor dos transportes?
2. Qual a razão que motivou a realização de um trabalho sobre biodiesel?
3. De que forma foi estruturado o trabalho?
4. Quais as medidas inovadoras relativamente a outros trabalhos de investigação nesta área?
5. Quais são os objetivos que se pretendem atingir com este trabalho?

Esta página foi intencionalmente deixada em branco.

1.1 Enquadramento

A utilização de petróleo como fonte de energia foi um fator fundamental para o desenvolvimento da indústria, da economia e da sociedade mundial. Hoje somos uma sociedade fortemente viciada nesta fonte energética, com cariz totalmente dependente e demonstrando uma enorme incapacidade para nos vermos livres desta submissão. À semelhança daquilo que uma droga faz às pessoas que dela dependem, também o mundo está subjugado à incessante vontade de consumir mais energia, ficando com um aspeto cada vez mais degradado, secundarizando todas as outras vertentes para se consumir quase exclusivamente no controlo do acesso privilegiado ao petróleo.

Em 2009, a Comissão Europeia revelou as intenções na promoção do uso de energias de origem renovável. Nos chamados objetivos 20-20-20 para a política energética, esta comissão definiu critérios de sustentabilidade para a utilização de biocombustíveis, tornando obrigatório que cada um dos estados membros da comunidade europeia definisse objetivos concretos de modo a que, em termos gerais, seja possível, pelo menos atingir uma cota de 20 % do consumo final de energia de toda a Comunidade Europeia a partir de fontes de energia renovável no ano 2020. De modo a atingir este valor, cada um dos estados membros deveria promover e encorajar a eficiência energética e a poupança de energia (Conselho e Parlamento Europeu 2009). Em Portugal, no ano de 2010, 39% da energia final foi consumida pelo setor dos transportes, como se pode verificar no gráfico da figura 1.1. Torna-se evidente que será necessário um grande esforço para aumentar o consumo de energias renováveis nos transportes, uma vez que este é o setor onde a penetração de energia renovável é apenas residual. A avaliação do consumo de energia no transporte rodoviário em Portugal, de acordo com o gráfico da figura 1.2, permite identificar claramente a grande dependência do setor de

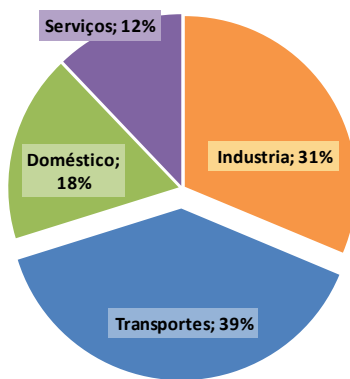
transportes rodoviários relativamente ao gasóleo, sendo de destacar mesmo assim uma utilização de 5,19% de biodiesel.

Nesta altura existem várias possibilidades que permitem aumentar a introdução de energia renovável consumida no setor dos transportes, como os veículos elétricos ou as fuel-cells. Contudo, estas tecnologias necessitam de tempo para atingir alguma maturidade e provar a sua efetividade. Neste momento a utilização de biocombustíveis surge como uma hipótese real que já tem vindo a ser utilizada em vários países como o Brasil ou a Alemanha. Para motores de ignição por compressão, que são os que equipam a esmagadora maioria de veículos pesados na Europa, o biocombustível que de forma mais consistente tem vindo a ser utilizado e estudado como possível substituto do combustível de origem fóssil é o biodiesel, embora a utilização de bioalcoóis também tenha merecido alguma atenção tendo fornecido alguns resultados que são igualmente interessantes (Hansen, Zhang e Lyne 2005) (Ahmed 2001) (D. Rakopoulos, C. Rakopoulos e E. Kakaras, et al. 2008) (Sayin, Ilhan, et al. 2009) (D. Rakopoulos, C. Rakopoulos e D. Hountalas, et al. 2010).

Normalmente a sociedade aceita melhor o que conhece, mesmo que não seja muito bom, do que aquilo que desconhece ou desconfia, mesmo sendo melhor. Para aumentar a quantidade de biocombustíveis no setor automóvel, será fundamental envolver as pessoas neste objetivo, pelo que será essencial que a população em geral tenha acesso a informação sobre a utilização de biocombustíveis nos motores dos seus veículos.

De modo a diminuir a dependência energética do petróleo e as emissões de CO₂ foram já tomadas algumas medidas pela Comunidade Europeia (Conselho e Parlamento Europeu 2009), através da definição de metas que permitam que em 2020, 10% da energia utilizada no sector dos transportes seja obtida a partir de biocombustíveis. Na União Europeia entre os anos 2005 e 2010, o consumo de biocombustíveis aumentou de 1,03% para 4,42% relativamente ao consumo total de combustíveis pelo setor dos transportes, tendo ainda assim ficado abaixo do objetivo definido para o ano 2010, correspondente a 5,75%. Paralelamente, verificou-se uma diminuição das emissões de CO₂

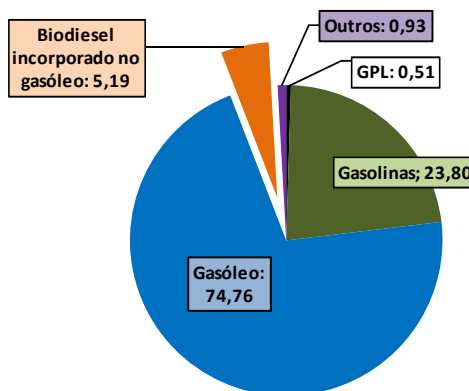
Consumo de energia por setor de atividade em Portugal em 2010



Fonte: DGEG - Direção Geral de Energia e Geologia

Figura 1.1 – Distribuição do consumo de energia [%] por setor de atividade (DGGE 2010).

Consumo de combustíveis no transporte rodoviário em Portugal [%] - 2010



Fonte: DGEG - Direção Geral de Energia e Geologia

Figura 1.2 – Distribuição do consumo de energia [%] no transporte rodoviário por tipo de combustível (DGGE 2010).

proveniente dos transportes para a atmosfera de 16,4Mt em 2008 e 26,6Mt em 2009, registando-se nesse ano um total de 920,74Mt (mega toneladas) de emissões de CO₂ (Cansino, et al. 2012).

A aposta nos biocombustíveis é cada vez mais uma alternativa evidente atendendo à enorme quantidade de energia utilizada pelos veículos rodoviários, acrescentando à dificuldade em encontrar soluções alternativas ao petróleo, garantindo a mobilidade energética essencial para este setor. De facto, os maiores problemas na implementação de soluções com menor impacto ambiental residem nos processos de distribuição e armazenamento da energia, tornando-a acessível e permitindo uma autonomia e fiabilidade próxima da atualmente existente. A Comunidade Europeia determinou a necessidade de aumentar a produção de biocombustíveis comercialmente viáveis, eficientes ao nível das emissões de CO₂ e compatíveis com os motores de combustão que equipam os veículos automóveis (Conselho e Parlamento Europeu 2009), pretendendo ainda assegurar o desenvolvimento de biocombustíveis de outras fontes que não apenas de origem alimentar (E. C. EU 2012). Segundo o ponto de vista europeu a utilização de biocombustíveis aumenta a segurança no fornecimento de energia, reduz a emissão de gases com efeito de estufa e aumenta os rendimentos e empregabilidade da atividade agrícola (Bozbas 2006).

O biocombustível mais utilizado na Europa é o biodiesel, um éster produzido a partir de óleos vegetais ou animais, através de um processo de transesterificação. Esta fonte de energia renovável representou, na Europa em 2003, 82% do total dos biocombustíveis produzidos (Bozbas 2006) e em 2007 uma cota de 84,7% de todos os biocombustíveis consumidos (Bloem, et al. 2010), sendo a Europa a 27 membros o maior produtor e consumidor de biodiesel, com a uma produção de 9164 milhões de litros de biodiesel no ano 2008, cerca de metade de toda a produção mundial de biodiesel (Sorda, Banse e Kemfert 2010). Considerando a utilização de biodiesel, a poupança em termos de emissões de CO₂ pode variar entre 36 a 83% quando comparada com diesel convencional (Ryan, Convery e Ferreira 2006). Contudo, para que este combustível seja economicamente rentável, será necessário recorrer a subsídios que permitam também equilibrar a diferença de preço de produção e contabilizar os efeitos de poupança por tonelada de CO₂ não emitida.

O consumo de óleos vegetais para produzir biodiesel tem vindo a aumentar em Portugal, fundamentalmente devido à sua natureza renovável e ao facto de ser menos poluente quando comparado com o gasóleo de origem fóssil produzido a partir do petróleo. Biodiesel é um combustível renovável que pode ser utilizado em alternativa nos motores de combustão interna de ignição por compressão, sem ser necessário efetuar quaisquer alterações, substituindo em parte ou no todo o combustível de origem fóssil. A utilização eficiente de biodiesel no setor dos transportes acarreta alguns benefícios importantes a nível ambiental, económico e social, traduzidos na criação de emprego, redução das emissões poluentes, diminuição da dependência energética do país relativamente ao petróleo e diminuição dos níveis de emissões de CO₂ do setor dos transportes.

A Agência Internacional para a Energia acredita que em 2050 será possível que os biocombustíveis possam corresponder a 27% da quantidade global de combustíveis no setor dos transportes, o que permitiria diminuir em 2,1Gt (giga toneladas) de emissões de CO₂ por ano, partindo de sistemas sustentáveis (IEA, Eisentraut, et al. 2011).

1.2 Identificação do problema

A dependência do setor dos transportes relativamente ao petróleo não poderá ser ultrapassada apenas através de uma solução tecnológica única. Citando o Livro Branco editado pela Comissão Europeia (Comissão Europeia 2011), *“A inovação tecnológica pode facilitar uma transição mais rápida e mais económica para um sistema de transportes mais eficiente e sustentável na Europa, se incidir em três fatores fundamentais: **eficiência dos veículos, inovando nos motores, nos materiais e na conceção; utilização mais ecológica da energia, inovando nas fontes de energia e nos sistemas de propulsão; melhor uso das redes e maior segurança nas operações, graças aos sistemas de informação e comunicação.**”*

A busca de possíveis soluções no sentido de atenuar a dependência energética dos transportes relativamente ao petróleo passa pela utilização de diversas opções, sendo que no presente momento e nos anos mais próximos, a solução com provas efetivas advém da utilização dos biocombustíveis.

É claro que pode ser discutível se a utilização de biocombustíveis nos veículos será uma solução ou um problema, contudo existem casos como o do bioetanol no Brasil ou o biodiesel em alguns dos países da Europa, como em Portugal, em França ou na Alemanha, onde se demonstrou ser possível utilizar o biodiesel como possível fonte energética de substituição parcial do gasóleo.

Alguns problemas foram levantados relativamente à disputa que as culturas energéticas podem promover pelo uso da terra e pela disputa dos alimentos, principalmente quando uma parte significativa da população mundial está a morrer à fome. Um exemplo desta situação foi vivida nos Estados Unidos, onde o crescimento explosivo do consumo de milho para produção de etanol fez com que o preço deste produto fosse elevado para níveis muito altos, causando a maior colheita de milho desde a 2ª guerra mundial, em que $\frac{1}{5}$ desse milho serviu para produção de etanol. Contudo este é claramente um mau exemplo, atendendo a que a produção de etanol através da fermentação de milho é um processo muito pouco eficiente e que representa uma muito ligeira diminuição nas emissões de CO₂, sendo esta situação um caso de descontrolo completo e desregulação do mercado. Existem a este nível duas soluções. Em primeiro lugar importa controlar o processo e garantir que a produção de biocombustíveis não se torna mais gravosa para o ambiente e que não compete com o setor alimentar, através de regulação governamental rígida e clara. Em segundo lugar será necessário procurar alternativas naqueles que serão os *“advanced biofuels”*, que permitem obter biocombustíveis a partir de matérias-primas não alimentares como resíduos da indústria e da biomassa, como as algas e outras culturas que não produzam matérias comestíveis.

Através do documento *“Technology Roadmap 2050 – Biofuels for Transport”* (IEA, Eisentraut, et al. 2011), é possível verificar que em 2050 a população mundial será de 9,1 biliões de pessoas, provocando um aumento das necessidades alimentares em 70%. Para tal será necessário aumentar as áreas aráveis em 70Mha, sendo expectável que a expansão de 120Mha ocorra nos países africanos subsarianos e na América Latina e que a utilização da terra nos países desenvolvidos diminua em 50Mha, verificando-se aqui um aumento potencial considerável para a produção de biocombustíveis. Será óbvio que a existência de culturas energéticas requeira uma produção sustentável, sem comprometer a segurança alimentar, sem afetar a biodiversidade ou limitar o acesso de pequenos agricultores às terras, requerendo este processo uma componente legislativa forte e um compromisso de todos os envolvidos.

Parece contudo claro que os biocombustíveis poderão fazer parte da solução, se forem encarados de forma regulada e sustentada, permitindo o aumento da produtividade do setor agrícola, fazendo com que algumas pessoas voltem a apostar neste setor, diminuindo a dependência energética e económica de alguns países como Portugal e promovendo a criação de postos de trabalho.

A única forma de promover o consumo de biocombustíveis será através de incentivos. Mas será que a utilização destes incentivos fará menos sentido do que os que foram dados a empresas na produção de eletricidade recorrendo às energias renováveis? Será que a utilização de incentivos não trará mais-valias pela criação de riqueza interna, pela diminuição da emissão de gases com efeito de estufa, pela aposta no setor primário como a agricultura, pela descentralização dos postos de trabalho e pela diminuição do desequilíbrio da balança comercial com o exterior, pela diminuição da importação de petróleo?

Claro que não foi a busca destas respostas que esteve na génese do presente trabalho. Mas foram algumas destas questões que despertaram o interesse na avaliação da real valia dos biocombustíveis como possíveis substitutos do petróleo. Existe um elevado número de publicações relativa à produção de biocombustíveis, contudo a investigação relativa à utilização desses biocombustíveis é mais limitada e revelava algumas questões que motivaram o interesse pela realização de um trabalho experimental que permitisse perceber qual o impacto na utilização de biodiesel em motores de combustão interna e de que modo essa utilização afetava o desempenho energético, o consumo e as consequentes emissões de CO₂ e a emissão de outros poluentes.

A análise da bibliografia publicada permitiu concluir que a esmagadora maioria dos trabalhos de investigação relativos à utilização de biodiesel em motores recorriam a métodos discutíveis relativamente ao modo como eram realizados os ensaios, baseados em regulamentação utilizada para a homologação de motores, ou utilizando uma banda muito restrita de pontos de funcionamento do motor.

Esta situação foi já avaliada pela comissão europeia que através do Livro Branco (Comissão Europeia 2011), revela como parte das iniciativas a serem consideradas, o estabelecimento de normas adequadas para as emissões de CO₂ dos veículos, se necessário complementadas por requisitos de eficiência energética, de modo a abranger todos os sistemas de propulsão; e a proposta para que, o mais tardar em 2013, ocorra a revisão do ciclo de ensaio para medição das emissões, a fim de que a redução das emissões de CO₂ e de outros poluentes tenha em conta as condições de condução reais, sendo esta também uma preocupação acentuada pelo investigadores relativamente às novas fontes de propulsão atualmente a serem implementadas (Silva, Ross e Farias 2009).

1.3 Motivação

A utilização de biocombustíveis é uma realidade existente em Portugal, correspondendo em 2010 a 5,19% de todos os combustíveis utilizados pelos veículos rodoviários, de acordo com o gráfico da figura 1.2 (DGGE 2010). Estima-se que em 2012 a quantidade de biodiesel incorporada no gasóleo rodoviário comercial seja de 6,75%.

Os fabricantes de veículos automóveis já permitem que seja utilizada uma determinada quantidade de biodiesel no gasóleo, sem que isso afete a garantia desses veículos. Os fabricantes de sistemas de injeção de combustível, Delphi, Continental, Denso, Bosch e Stanadine, têm vindo a acompanhar a evolução do processo de introdução de biodiesel, assumindo na declaração conjunta de 2009 (Diesel Fuel Injection Equipment Manufacturers 2009), a possibilidade da utilização de biodiesel nos sistemas de injeção de combustível até uma mistura de 7%, prevendo que este limite seja alargado até 10% se forem efetuados os respetivos ajustes nas normas EN 14214 e EN 590 que estabelecem os critérios de qualidade e comercialização de biodiesel e gasóleo, respetivamente.

Considera-se ainda relevante a utilização de biodiesel em frotas de veículos quer por empresas municipais, quer por empresas de transportes de bens e pessoas.

Para os utilizadores em geral, a informação relativa à utilização de biodiesel é escassa, muitas vezes contraditória e frequentemente carregada de intuito comercial pouco credível.

Acrescentando esta situação ao facto de haver várias empresas que apostaram na produção de biodiesel em Portugal, surgiu o desafio de perceber como poderia ser feito um estudo cujo intuito fosse a análise comparativa da utilização de biodiesel nos veículos, focando este estudo no caso dos veículos que circulam em Portugal.

Com o apoio da empresa Prio Energy, SA foi estabelecido um protocolo para a realização de alguns testes utilizando o banco de ensaios de motores e um motor típico de um veículo pesado. Ainda com a colaboração desta empresa foi estabelecido um estudo complementar que visava a utilização dos dados de consumo de uma empresa de transporte de passageiros no norte do país, que iria iniciar o abastecimento com biodiesel, introduzido de forma faseada, fornecido pela Prio Energy.

Para complementar o trabalho, atendendo a que seria importante efetuar um estudo tendo também em consideração a avaliação de veículos ligeiros, realizaram-se ensaios com este tipo de veículos em banco de motores, em banco de rolos e em estrada.

Esta abordagem tinha ainda como objetivo a introdução de metodologias que permitissem complementar os ensaios de laboratório com uma avaliação concreta envolvendo a utilização de veículos em circulação real de estrada, permitindo a obtenção de informação fidedigna sobre o impacto da utilização de biodiesel nos veículos que circulam em Portugal.

1.4 Âmbito do trabalho

Tendo em consideração que $\frac{3}{4}$ do consumo de combustível no transporte rodoviário em Portugal é em gasóleo e que é esta a grande aposta da Europa, foi decidido que seria preferencial a avaliação da introdução de biodiesel nos motores de combustão interna com ignição por compressão. Esta preferência considera ainda que para atingir os objetivos de 10% de biocombustíveis consumidos em 2020 relativamente ao consumo total de energia pelos veículos, será quase obrigatório que a via preferencial seja a de ultrapassar a substituição de mais de 10% de gasóleo, compensando aquilo que não for conseguido por parte da substituição da gasolina. Esta situação advém ainda da desvantagem dos motores de ignição por faísca necessitarem de algumas adaptações para poderem utilizar um combustível contendo um bioálcool, contrariamente à utilização de biodiesel nos motores de ignição por compressão, o que origina um efeito muito diferenciador sobre a introdução de biocombustíveis no parque de veículos existentes.

A vantagem apresentada pelo biodiesel é a de poder reduzir o impacto associado às emissões de CO₂, atendendo ao seu caráter renovável. Contudo, essa situação vai depender do modo como o motor lida com esse combustível, sendo essencial perceber como a utilização de biodiesel nos motores de combustão interna afeta o consumo, a eficiência energética e as emissões gasosas e de partículas. Para que seja possível atingir este desiderato, será essencial ter informação sustentada sobre o consumo de biodiesel e de que forma poderá ser otimizada a mistura de combustível para minimizar o consumo e ainda avaliar como um motor desenvolvido para consumir gasóleo, se comporta quando utiliza biodiesel.

Atendendo que a situação dos veículos pesados é bastante diferente da situação dos veículos ligeiros, foram estruturadas metodologias diferentes para análise da problemática da utilização de biodiesel em substituição de parte do gasóleo. Para além do facto dos motores apresentarem um regime de funcionamento diferente, sendo os motores de maior cilindrada que tradicionalmente equipam os veículos pesados menos rotativos e normalmente sujeitos a maiores binários, estando muitas vezes estruturados em frotas, enquanto grande parte dos motores instalados em veículos ligeiros apresentar regimes de funcionamento completamente diferentes, sendo a gestão da sua utilização feita de um modo marcadamente mais unipessoal. Também por este motivo, é mais importante uma análise de várias misturas de combustíveis com diferentes incorporações de biodiesel em gasóleo nos motores de veículos pesados, sendo preferível avaliar menos combustíveis nos veículos ligeiros, mas efetuar uma avaliação mais pormenorizada com as misturas selecionadas.

Considerando que a abordagem pretendida correspondia à cobertura da situação real da utilização dos veículos, permitindo uma caracterização do funcionamento dos veículos a operar nas estradas portuguesas, aquilo que se incluiu como contribuição específica do trabalho e que o distanciava claramente das restantes abordagens efetuadas por outros investigadores, foi o estabelecimento de metodologias de ensaio que permitissem a avaliação da utilização de biodiesel em veículos quando em circulação em estrada.

1.5 Abordagem científica

O modo como a utilização de biocombustíveis em veículos foi tratada no presente trabalho sustentou-se numa estrutura que teve em conta a busca das razões que estão na origem das eventuais diferenças de consumo, desempenho e emissões de motores. O trabalho iniciou-se pela definição do que se pretendia abordar e do esclarecimento das matérias onde se poderia desenvolver trabalho, permitindo traçar alguns objetivos. Numa fase seguinte foram identificados e estabelecidos os métodos de trabalho que se poderiam empregar e as ferramentas a ser utilizadas no sentido de cumprir os objetivos delineados.

Os resultados obtidos, após tratamento adequado, permitiram em primeira análise reajustar as metodologias inicialmente definidas que após validação, possibilitaram a análise crítica e construtiva da informação recolhida, conduzindo ao estabelecimento de conclusões suficientemente esclarecedoras relativamente às questões colocadas e que motivaram a realização do trabalho, definindo deste modo a contribuição para a evolução do conhecimento científico na área em causa.

A estrutura que exemplifica o modo como foi realizada a abordagem no presente trabalho de investigação está representada na figura 1.3.

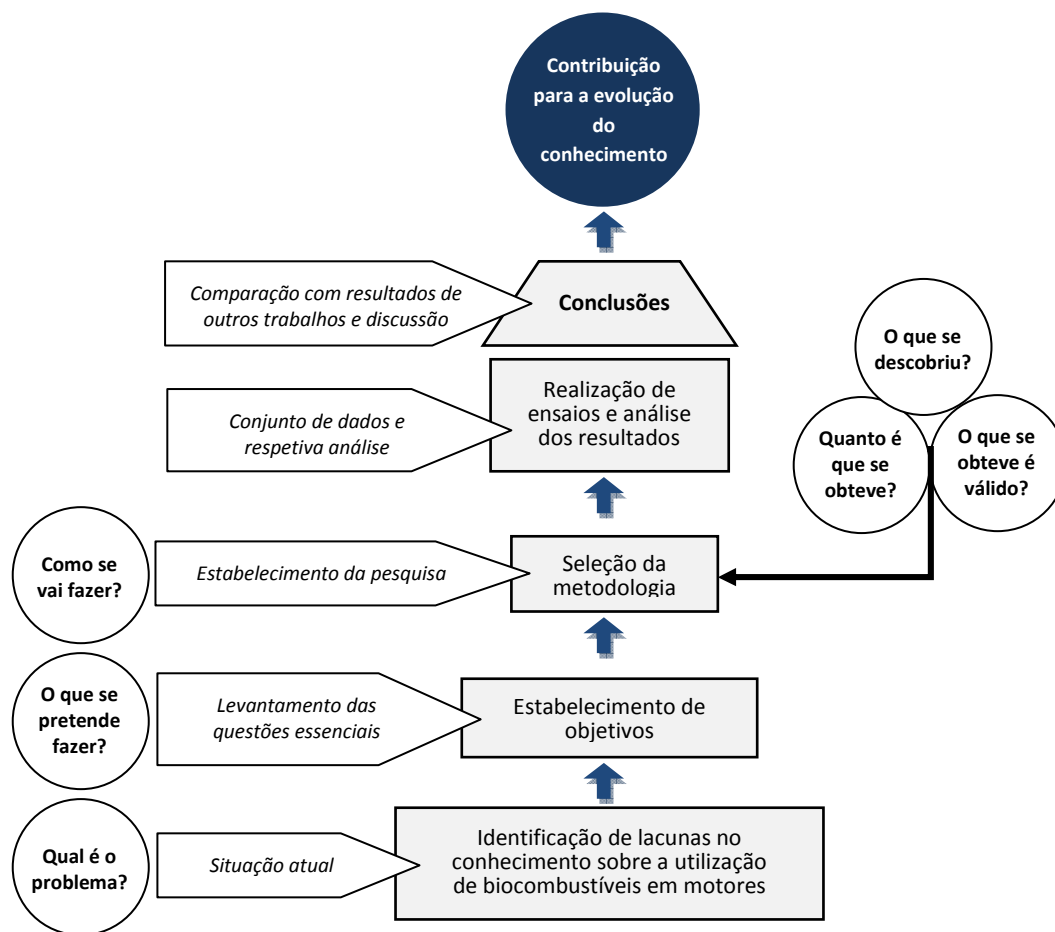


Figura 1.3 – Estrutura adotada na abordagem do trabalho de investigação.

1.6 Estrutura

Capítulo I – Neste capítulo é apresentado de modo geral o problema e a motivação para realizar um trabalho que permita constituir-se como uma contribuição válida. São descritos em traços gerais o modo e a forma como se pretende executar um trabalho válido, com consistência científica, sendo ainda apresentados os objetivos que se pretendem atingir.

Capítulo II – É feita uma abordagem relativamente às publicações existentes que tratam da utilização de biocombustíveis em veículos, com especial incidência sobre o biodiesel, sendo possível identificar dois tipos diferentes de análises. Atendendo à intenção do presente trabalho se pretender definir como uma contribuição científica e rigorosa, mas acessível à sociedade interessada sobre a temática da utilização de biocombustíveis em veículos, é realizada uma apreciação em dois níveis perfeitamente diferenciados e distintos. Uma avaliação mais geral e abrangente sobre os vários aspetos sensíveis à utilização de biodiesel, e uma análise com maior profundidade sobre alguns assuntos que, pela importância específica para o trabalho que se pretende desenvolver, mereceram maior detalhe e rigor científico.

Capítulo III – Tendo em conta que o trabalho é essencialmente experimental, foi estruturado este capítulo onde são revelados os equipamentos utilizados para a realização dos vários ensaios, estando associados por tipo de metodologia selecionada, nomeadamente equipamentos do banco de ensaios de motores, equipamentos do banco de rolos e equipamento dos ensaios em estrada. Para os equipamentos mais relevantes está ainda descrita a forma como é garantida a fiabilidade nos resultados obtidos, sendo também descrito o sistema de aquisição utilizado e o respetivo software desenvolvido para garantir a aquisição de dados e o respetivo processamento. Ainda neste capítulo é possível encontrar resultados relativos aos ensaios de caracterização dos combustíveis utilizados, nomeadamente no que diz respeito à densidade, viscosidade e poder calorífico.

Capítulo IV – Este capítulo é o núcleo desta tese, concentrando a descrição mais específica das metodologias utilizadas nos diversos ensaios, bem como os resultados obtidos nos ensaios, incluindo ainda a discussão dos mesmos. Encontra-se dividido em duas partes, uma primeira parte onde são apresentados os resultados obtidos para veículos pesados, referentes aos ensaios em banco de motores e aos dados de uma frota de veículos, e uma segunda parte onde são apresentados os resultados obtidos para veículos ligeiros, integrando a informação recolhida nos ensaios em estrada, em banco de rolos e em banco de motores.

Capítulo V – Como fecho da presente tese encontram-se as conclusões, onde são salientados os aspetos mais relevantes do trabalho realizado, efetuando uma avaliação sobre a utilização de biodiesel em veículos e identificando possibilidades de continuidade do trabalho até aqui desenvolvido.

1.7 Objetivos

- 1º Objetivo:** Avaliar como é que a utilização de biodiesel afeta o consumo e o desempenho de veículos, nomeadamente numa vertente de utilização em Portugal.
- 2º Objetivo:** Entender de que modo a utilização de biodiesel pode ser benéfica ou prejudicial para o ambiente, fundamentalmente pelo incremento ou pela diminuição das emissões poluentes mais gravosas provenientes de motores de ignição por compressão.
- 3º Objetivo:** Disponibilizar um documento, baseado numa estrutura científica, onde estejam concentradas algumas informações essenciais ao entendimento sobre os efeitos que a utilização de biodiesel nos veículos poderá implicar, permitindo a produtores de biodiesel, investidores, empresas de transportes e utilizadores em geral uma maior compreensão sobre este assunto.
- 4º Objetivo:** Desenvolver uma metodologia que permita um significativo aumento da capacidade de representar o comportamento efetivo de veículos ao nível do consumo e das emissões, quando abastecidos por diferentes combustíveis ou propulsionados por diferentes fontes energéticas.

FUNDAMENTAÇÃO E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Sumário:

1. Que informação existe e como está organizada?
2. O que existe feito e o que falta fazer sobre este tema?
3. Quais as questões mais controversas desta matéria?
4. Porque vale a pena fazer este trabalho?

Esta página foi intencionalmente deixada em branco.

2.1 Introdução à revisão bibliográfica

Concordando inteiramente com a ideia expressa por Julião (Julião 2005), uma revisão bibliográfica é uma parte essencial de um trabalho de investigação. A forma de abordar um processo de revisão bibliográfica não se deve resumir ao enunciado sumário do trabalho desenvolvido numa determinada área de investigação, mas antes deverá ser entendida como um estímulo crítico ao pensamento sobre o modo como determinados conceitos e abordagens concetuais podem ser utilizadas para construir um modelo de evolução científica nessa área. A revisão bibliográfica aborda o conhecimento sobre um determinado tema, abrangendo as metodologias utilizadas e erigindo uma rede de saber que permite evidenciar os problemas, traçar objetivos e definir metodologias para os atingir.

No presente capítulo são apresentadas as fundações em que se baseará todo o trabalho de investigação, reconhecendo os pilares principais de toda a estrutura de conhecimento e selecionando as ferramentas mais indicadas para atingir os objetivos enunciados. No pressuposto científico de que uma revisão bibliográfica é um passo inicial essencial para atingir um determinado fim, a presente pesquisa teve em especial atenção o equilíbrio entre as questões laterais e os aspetos principais. Foi dedicada uma especial atenção às questões nucleares que se prendem com a utilização de biodiesel em motores de ignição por compressão, não deixando contudo de analisar alguns aspetos laterais que interferem sobre o modo como o biodiesel pode ser efetivamente encarado como uma alternativa ao gasóleo.

2.1.1 Objetivos da revisão bibliográfica

Os objetivos deste capítulo são os seguintes:

- 1º Objetivo:** Saber como é entendida a utilização de biodiesel como estratégia energética alternativa no setor dos transportes, identificando a necessidade e mais-valias do presente trabalho.
- 2º Objetivo:** Caracterizar o trabalho desenvolvido nesta área, identificando os problemas, definindo as limitações e analisando as oportunidades de progresso do conhecimento atual.
- 3º Objetivo:** Definir os conteúdos de investigação, direcionando o trabalho no sentido de responder às questões colocadas nesta pesquisa.

2.1.2 Metodologia da revisão bibliográfica

O número de publicações sobre biodiesel tem crescido consistentemente de forma exponencial ao longo dos últimos 15-20 anos. Contudo a análise desta temática tem sido bastante diversa, cobrindo desde questões ao nível do processo de produção incluindo a análise agrícola, da avaliação de ciclo de vida do combustível e das suas propriedades e de possíveis aditivos, até à sua estabilidade físico-química quando armazenado e ainda como fonte energética.

Relativamente à questão da utilização de biodiesel em motores, numa análise paralela à linha de investigação deste trabalho, também se podem ainda encontrar vários tipos de análise que vão desde a avaliação termodinâmica do processo de combustão, passando por questões de lubrificação do motor e do arranque a frio, do processo de injeção até à avaliação sobre o impacto que a utilização de biodiesel poderá ter no desempenho do motor, no consumo de combustível e nas consequentes emissões de gases poluentes.

Nesta revisão bibliográfica considerou-se a análise sumária de algumas questões marginais mas contudo relevantes na avaliação do biodiesel como possível alternativa energética ao gasóleo, centrando todavia uma maior atenção nas questões centrais de utilização do biodiesel em motores ao nível das suas implicações no consumo, emissões e desempenho do motor. Para tal, a pesquisa elaborada teve sempre em consideração a necessidade de alguma seleção de publicações em termos de relevância nos aspetos marginais, estabelecendo um critério muito mais alargado quanto a publicações mais específicas que foquem as questões consideradas essenciais para o presente trabalho. Deste modo, mais de metade das publicações analisam a utilização de biodiesel de uma forma mais técnica sob o ponto de vista do motor em termos de emissões, consumo e desempenho, enquanto as restantes, que abordam as questões mais laterais à presente investigação, foram selecionadas tendo em conta a sua relevância e o seu carácter de análise mais genérico e eventualmente de revisão.

A forma como foi estruturada a metodologia desta revisão bibliográfica encontra-se esquematizada na figura 2.1, sendo também indicadas as relações entre os diferentes temas identificadas neste

processo, bem como a indicação do grau de importância de cada um desses temas, destacando-se uma área de emissões/desempenho/consumo de combustível como assunto central da pesquisa, onde foi necessária uma análise com maior profundidade. Os temas que se salientam no esquema, são assuntos que embora de alguma forma marginais, tiveram uma abordagem mais detalhada pelo facto de terem implicações importantes para a metodologia de trabalho e para a fundamentação dos resultados obtidos.

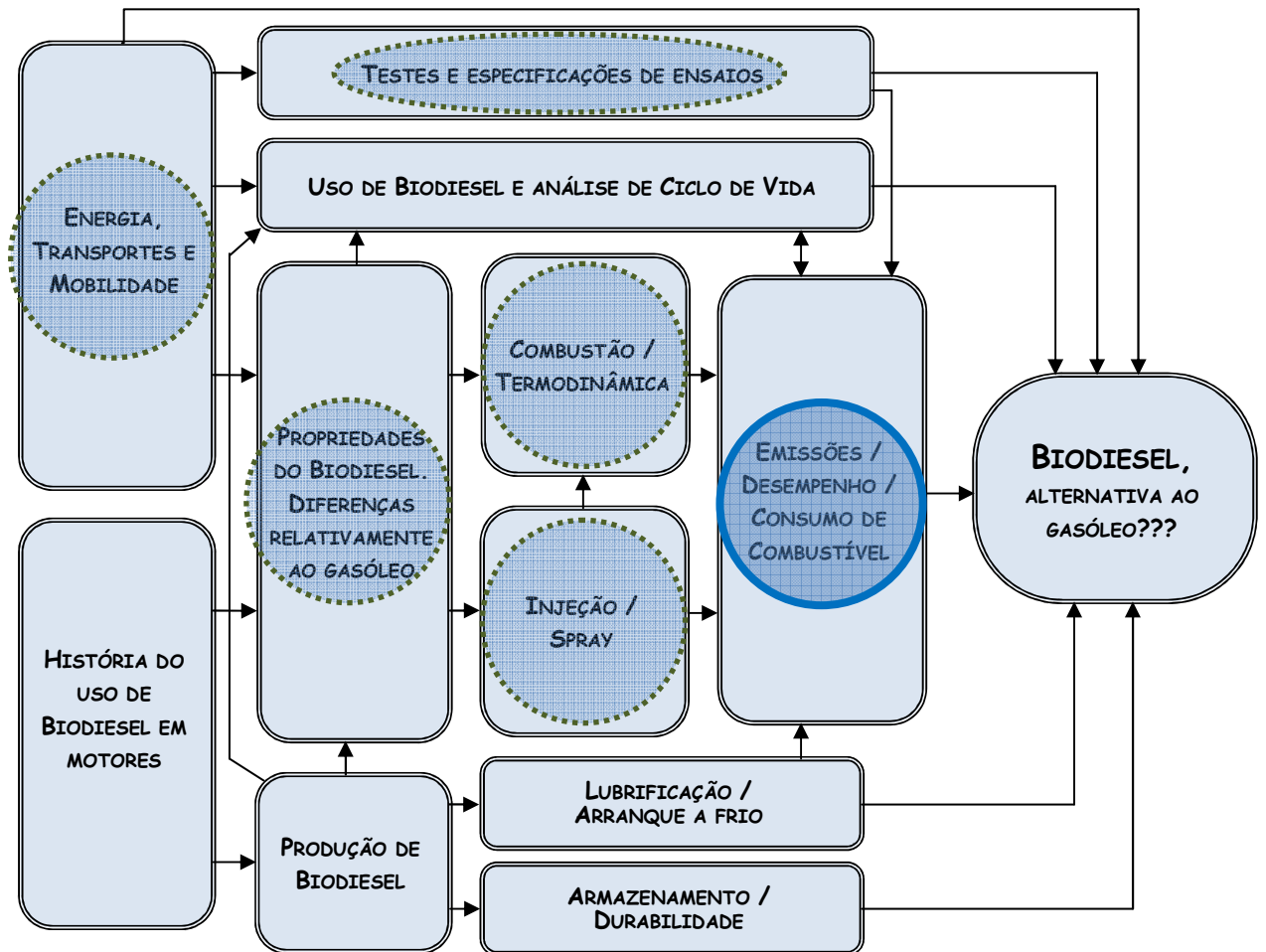


Fig. 2.1 – Estrutura base da organização da revisão bibliográfica

2.1.3 Organização do Capítulo

Este capítulo está dividido em 2 partes com abordagens distintas. Numa primeira fase é estruturada a análise dos assuntos considerados como laterais ao tema principal, tratando estes temas pela conjugação das ideias expressas pelos autores referenciados, organizando uma linha de pensamento que reflete o conhecimento do presente momento relativamente a cada um desses assuntos.

Numa segunda parte foi estabelecida uma abordagem que considera ainda uma divisão em duas secções de modo a permitir uma leitura mais fluida do trabalho, sendo apresentadas em sítios distintos nesta tese. Neste contexto, foi remetida para o Anexo I uma primeira avaliação mais pormenorizada onde é apresentado sob a forma de tabela o resumo de várias publicações que se

consideraram como relevantes para este trabalho, e que representam de alguma forma uma investigação paralela à que se pretende realizar, estabelecendo as bases do conhecimento atual, identificando as várias limitações e problemas, bem como as diferentes perspectivas sobre a utilização de biodiesel em motores ao nível das emissões, do consumo e do desempenho. Este tipo de abordagem, listando os autores e apresentando um breve resumo do trabalho realizado, foi a forma encontrada para lidar com os diferentes tipos de motores, com tecnologias diversas, testados segundo ciclos de ensaios distintos e utilizando variados tipos de combustíveis contendo diferentes quantidades de biodiesel obtido a partir de inúmeras origens.

Na outra parte da divisão estabelecida para esta revisão bibliográfica, foi elaborada uma abordagem resumida e agregadora dos aspetos referidos pelos vários autores mencionados no Anexo I, tirando partido daquilo que deverá constituir uma revisão bibliográfica, estabelecendo as redes de conhecimento que permitem definir os aspetos em que o presente trabalho se poderá constituir como uma contribuição para a evolução do conhecimento científico nesta área, identificando as lacunas, dificuldades, contradições e constatações resultantes do trabalho de outros investigadores.

Esta abordagem permitirá certamente que a leitura deste capítulo forneça uma perceção sobre a problemática em questão, utilizando uma forma menos maçadora porque não tão pormenorizada, possibilitando, em caso de necessidade a busca do pormenor no Anexo I, onde se encontram listadas as referências, associadas ao motor ou veículo utilizado, com a especificação dos testes efetuados e dos combustíveis avaliados, agregados com a correspondente apresentação dos resultados e conclusões mais relevantes de cada trabalho.

Na parte final do presente capítulo será estruturada uma primeira discussão sobre as questões mais significativas para a evolução do conhecimento relativamente à utilização de biodiesel em motores de combustão interna, sendo igualmente apresentada a estrutura de trabalho que se pretende implementar, tendo em vista a seleção das ferramentas e metodologias mais eficientes.

2.2 Utilização de Biodiesel em motores de combustão interna

A utilização de biodiesel em motores de combustão interna com ignição por compressão é uma ideia com a idade do próprio motor, com mais de um século de existência. A primeira declaração pública sobre a utilização de óleos vegetais em motores foi feita pelo próprio criador do motor Diesel, Rudolf Diesel. Vários estudos foram publicados avaliando a interação dos motores de ignição por compressão e a utilização de biodiesel, sendo assinalável que este assunto tenha apresentado um aumento muito significativo na última década.

A análise da bibliografia existente sobre a utilização de biodiesel em veículos, em que são consideradas diversas configurações de motores e diferentes tipos de combustível proveniente de diferentes origens, permite identificar algumas situações pontuais de discrepâncias nos resultados publicados. Numa análise puramente energética será de esperar que o consumo de combustível aumente com a introdução de biodiesel, dado o menor teor energético deste combustível. Contudo, esta assunção não é inteiramente correta, verificando-se uma interação de variados fatores que determinam a eficiência térmica do processo de combustão e conseqüentemente afetam o consumo de combustível, como será possível comprovar mais à frente nesta revisão.

De entre as várias propriedades que distinguem o biodiesel e o combustível de origem fóssil, destacam-se o poder calorífico, já mencionado, mas também a viscosidade, a densidade e o conteúdo em oxigénio, entre outras.

O sistema que é mais influenciado por estas propriedades é o sistema de injeção de combustível. Na realidade, a otimização do sistema de injeção é fundamental para que o funcionamento de um motor seja mais eficiente. A introdução de um combustível como o biodiesel, com características diversas daquelas que foram as que determinaram a otimização do sistema, levam a que o spray de biodiesel seja mais estreito e mais longo que o de diesel petrolífero, implicando uma menor atomização e melhor penetração desse spray no ar aquecido que se encontra no interior do cilindro, devido à maior viscosidade e tensão superficial do biodiesel, implicando um maior tamanho médio da gota de combustível (Kegl 2011).

Por outro lado, o tipo de operação requerido a um motor também afeta o modo como este se relaciona com diferentes combustíveis, pois diferentes modos de funcionamento traduzem-se em variações nos rácios de pressão de injeção, na formação do spray, nas relações ar/combustível e no processo de combustão. A utilização de diferentes proporções de biodiesel acarreta um impacto no funcionamento dos motores que depende fortemente das condições em que este opera e dos tipos de condução a que é sujeito (Fontaras, et al. 2009) (Yanowitz e McCormick 2009).

2.2.1 Especificações relativas a ensaios de motores

Existem variadas formas para efetuar testes em motores: utilizando um banco de ensaios de motores, um dinamómetro de rolos, ou através da realização de testes em estrada em condições reais. Cada uma destas metodologias compreende algumas vantagens e apresenta alguns problemas.

A utilização de um banco de ensaios de motores permite um estudo dos parâmetros de funcionamento do motor em condições bastante controladas, garantindo uma grande precisão e boa repetibilidade de resultados. Contudo, existem algumas restrições na extrapolação direta desses resultados para as condições reais de utilização dos veículos, devido aos condicionalismos associados ao tipo de chassis utilizado, bem como às interferências de utilização por um condutor numa estrada sujeita a determinado tráfego.

A realização de ensaios recorrendo a um dinamómetro de rolos permite incorporar as interferências relativas ao veículo, não sendo possível definir a representatividade de cada ciclo de ensaio imposto relativamente às condições reais de circulação, tendo em conta as perturbações de carácter mais aleatório como são as diferentes situações de tráfego, condições meteorológicas e outras.

Na realidade, os ensaios em estrada são aqueles que permitem indubitavelmente uma maior capacidade para simular as circunstâncias reais de circulação em estrada, quando o veículo está sujeito a determinadas condições ambientais e de tráfego. Todavia as dificuldades de não estar em condições controladas de laboratório são evidentes, razão pela qual este tipo de metodologia tem de ser muito bem avaliada de modo a garantir alguma fiabilidade nos resultados obtidos.

Nos últimos anos, a utilização de ensaios em estrada tem vindo a ser cada vez mais utilizada por vários grupos de investigação, nomeadamente para medição de emissões de gases de escape, análise de desempenho e consumo de combustível, definição de estilos de condução, desenvolvimento de ciclos de ensaios e comparação de diferentes modos de propulsão, porém os sistemas utilizados são normalmente complexos e caros.

Este tipo de metodologia, que ainda se encontra em fase de desenvolvimento, persegue o objetivo de recorrer a sistemas preferencialmente a baixo custo, com a maior fiabilidade e precisão possíveis, permitindo o conhecimento do comportamento do veículo em estrada, obtendo uma resposta bastante mais realista do que a obtida em bancos de ensaios de motores ou em dinamómetros de chassis. É uma questão dominante que os ciclos realizados em dinamómetros, como o ciclo americano FTP (*Federal Test Procedure*, USA) ou europeu NEDC (*New European Drive Cycle*, CE), não possibilitam uma precisa representação do real comportamento do veículo, até porque, sendo importante em termos comerciais a existência de valores baixos de consumo, os construtores de veículos podem parametrizar os motores para que o desempenho nos pontos normativos sejam otimizados. Acresce ainda o facto de estes ciclos terem sido desenvolvidos para a homologação de motores e não para comparação do seu comportamento quando sujeitos a combustíveis com diferentes características.

Por exemplo, relativamente ao ciclo NEDC é reportada a crítica feita por Kageson em 1998, onde se refere que o ciclo europeu de condução (NEDC) tem um perfil de aceleração muito suave, exigindo o funcionamento do motor numa gama de operação muito pequena e, para cumprir os requisitos de emissões, os construtores de veículos apenas têm de se focar nestas zonas (Pelkmans e Debal 2006). Neste pressuposto a realização de ensaios em banco cumprindo o ciclo normativo NEDC e a

realização de medições em estrada em circunstâncias reais de tráfego permitiram confirmar as diferenças nos resultados obtidos pelas diferentes metodologias. No que concerne ao consumo e às emissões de CO₂, foram reportadas diferenças entre 10 a 20%.

A importância da realização de ensaios em condições reais de estrada é salientada pela crescente evolução dos veículos, pela introdução de sistemas de controlo eletrónico e pela utilização de sistemas de tratamento das emissões de escape, sendo importante aumentar a variabilidade das condições exigidas aos motores (Holmén e Niemeier 1998). É demonstrada a tendência para os veículos mais recentes apresentarem diferenças mais significativas entre ensaios em laboratório e em estrada, sendo os veículos atuais mais sensíveis às condições dos ensaios (André, Joumard, et al. 2006).

Também foi identificada a necessidade de desenvolver testes normalizados em bancos de ensaios de motores de veículos pesados de modo a melhor descrever as emissões características de um determinado comportamento destes veículos. Esta é uma lacuna reconhecida nomeadamente para a comparação da utilização de gasóleo e de combustíveis alternativos (Clark, et al. 1999).

A definição de um ciclo de ensaios pode influenciar positiva ou negativamente a comparação de um determinado veículo com outro, uma vez que cada motorização para cada veículo apresenta um comportamento diferente quando sujeito a uma mesma solicitação. Relativamente às emissões, a não contabilização de um fator de ajuste relativamente ao tráfego, pode introduzir desvios significativos, que para motores de ignição por compressão podem atingir até 30% (Joumard, et al. 2000).

Um estudo sobre a influência de diversos fatores no consumo de combustível e nas emissões de gases de escape permitiu detetar que são várias as causas para além da rotação e do binário imposto que efetivamente afetam esses resultados, nomeadamente o tipo de condução e de tráfego a que o veículo é sujeito. (Ericsson 2001).

Pode referir-se, a título de exemplo, o desenvolvimento de um ciclo de ensaios representativo das condições reais de circulação para motores de viaturas pesadas, (Krishnamurthy e Gautam 2006). Utilizando um equipamento portátil embarcado para medição das emissões de escape, foi possível obter informação sobre as condições de funcionamento do motor em contínuo, bem como os respetivos dados relativos às emissões específicas de CO₂ e NO_x. Estes dados foram posteriormente comparados com os resultantes dos ensaios realizados em banco de motores com o ciclo FTP, possibilitando o desenvolvimento de um ciclo mais realista com as condições reais de circulação em estrada. Este foi também o objetivo de um outro projeto a nível europeu com viaturas ligeiras (André 2004). No projeto europeu denominado ARTEMIS (*Assessment and Reliability of Transport Emission Models and Inventory Systems*), foi estabelecida a compatibilidade e integração dos padrões atuais de condução na Europa, desenvolvendo um ciclo considerando as condições reais de circulação em estrada, contabilizando a diversidade nos modos de condução e comportamentos de condutor, veículo e tráfego. Este propósito foi atingido através da utilização de uma metodologia baseada em observações de vários veículos operando em vários circuitos sujeitos a condições reais recorrendo a um sistema de aquisição de dados a bordo, abrangente mas complexo.

Outros grupos de investigação utilizaram métodos similares para obterem comparações entre tecnologias convencionais e alternativas na propulsão de veículos (Martins, et al. 2009), (Alessandrini, et al. 2009), (Villatico e Zuccari 2008).

Utilizando um sistema GPS dedicado e um software comercial foi possível avaliar o potencial de travagem regenerativa de um veículo híbrido com “*plug-in*” quando sujeito a condições reais de circulação real em estrada (Martins, et al. 2009). A metodologia utilizada revelou algumas potencialidades mas são reportados alguns defeitos que para serem corrigidos obrigariam à montagem extra de vários sensores.

São reportados resultados de ensaios em estrada baseados em equipamentos de elevada qualidade, utilizados para medição das emissões de gases de escape, parâmetros de motor e do veículo, quando conduzidos por 20 condutores diferentes percorrendo um mesmo trajeto, utilizando veículos com propulsão híbrida (Alessandrini, et al. 2009). A quantidade de equipamento envolvida representa um peso extra de 250kg para cada veículo que não será fácil de instalar cada vez que seja necessário realizar algum ensaio.

Uma comparação entre um veículo com fuel-cell e outro com um motor de combustão interna foi feita recorrendo a um equipamento desenvolvido no laboratório da equipa de investigação (Villatico e Zuccari 2008). Este sistema permite a monitorização dos veículos através de uma abordagem logística, ambiental e de circulação, recorrendo a um equipamento complexo, caro e que não é adequado para uso frequente.

De facto, existem referências a várias tentativas e diferentes métodos para a construção de ciclos de ensaios em laboratório recorrendo a ensaios em estrada. A utilização da metodologia de perseguição é referida e utilizada para concluir sobre as diferenças nos resultados obtidos entre os ciclos normalizados e os resultados obtidos nos ensaios em circulação real (Hung, et al. 2007) (Wang, et al. 2008).

A utilização de ensaios em estrada para a comparação da utilização de gasóleo ou de uma mistura de gasóleo com 5% de biodiesel foi já realizada por algumas equipas de investigação (Ropkins, et al. 2007) (Karavalakis, Stournas e Bakeas 2009) (Karavalakis, et al. 2009), sendo novamente identificadas diferenças significativas nos resultados obtidos em função das condições de circulação e do ciclo de condução utilizado.

2.2.2 Energia e Transportes – obsessão mundial

As expectativas reveladas por (Schafer e Victor 2000) demonstram que de 1997 a 2050 a mobilidade dos cidadãos mundiais aumentará quatrocentos por cento, o que implicará um significativo impacto energético no setor dos transportes.

De facto a importância do transporte na sociedade tem vindo sucessivamente a aumentar e tudo indica que esse crescimento terá continuidade. De acordo com a análise das tendências contemporâneas (Rodrigue, Comtois e Slack 2006), é facilmente perceptível um aumento nas exigências ao nível do transporte individual e no transporte de mercadorias, aumentando não só a quantidade de pessoas e bens como também as distâncias percorridas. Este processo leva necessariamente a um incremento ao nível das infraestruturas e da busca de novas soluções energéticas, mais eficientes, renováveis e com menor impacto ambiental.

Um estudo de 2008 revela que o setor dos transportes contribuiu com 19% dos gases com efeito de estufa em 1971, mas esta contribuição aumentou para 25% em 2006 (Moriarty e Honnery 2008). Das

emissões de CO₂ emitidas em 2000 pelo setor dos transportes, cerca de 72% são relativas ao transporte rodoviário, evidenciando a importância que este subsector desempenha ao nível da mobilidade mundial (Uherek, et al. 2010).

Apesar da melhoria da eficiência dos veículos de transportes rodoviários, o aumento do número de pessoas que têm carro, principalmente impulsionado pelos países em desenvolvimento como a China e Índia, torna patente o aumento das necessidades energéticas neste setor. É indubitável que o setor automóvel representa um dos maiores crescimentos relativamente ao consumo de energia final e da emissão de gases com efeito de estufa. É também uma ideia globalizada que o setor dos transportes depende do petróleo como fonte de energia quase exclusiva. Uma crise no abastecimento de petróleo poderá conduzir rápida e inevitavelmente a um colapso económico mundial, fundamentalmente devido a esta estreita e obsessiva relação.

A previsão sobre as expectativas de crescimento do transporte automóvel revela um cenário de certo modo intimidante, uma vez que não existindo mudanças e não sendo tomadas medidas rápidas, o crescimento no consumo de energia e na emissão de gases com efeito de estufa será impossível de suportar (Turton 2006).

O diretor executivo da Agência Internacional para a Energia referiu que na ausência de fortes políticas governamentais, projeta-se que a utilização de petróleo nos transportes do mundo praticamente duplicará entre 2000 e 2030, conduzindo a um aumento semelhante dos gases com efeito de estufa (IEA 2004).

Apesar da existência de algumas tentativas no sentido de minimizar a dependência relativamente ao petróleo, é ainda contudo bastante cedo para prever se alguma terá efetivamente eficácia, ou se surgirá ainda alguma novidade tecnológica que demonstre essa capacidade. Até este momento, as tecnologias que são sugeridas para substituir parcial ou totalmente o petróleo, com diminuição das emissões de gases com efeitos de estufa, encontram-se distribuídas por 4 áreas.

- Biocombustíveis
- Eletricidade
- Hidrogénio
- Gás natural

Aquela que nesta fase parece mais preparada é a utilização de biocombustíveis. Atendendo à proximidade das características destes combustíveis face aos combustíveis convencionais, podem ser utilizadas as infraestruturas e as tecnologias existentes para substituir em parte o consumo de petróleo, sem necessidade de alterações nos motores que atualmente equipam os veículos. Esta é na realidade uma vantagem incontornável, sendo suportada pelo estudo que considera os impactos energéticos e ambientais do setor dos transportes rodoviários em Portugal (Batista, et al. 2012). Neste estudo é referido que são necessárias mais de duas décadas para o desenvolvimento de uma nova tecnologia de veículos e que os veículos equipados com essa nova tecnologia constituam uma percentagem significativa no parque automóvel. Neste pressuposto, o facto da utilização de biodiesel poder ser considerada sem que ocorram alterações significativas nos veículos e nas infraestruturas permite que esta fonte de energia tenha primazia face às restantes alternativas, pelo menos numa fase de transição, para além do óbvio e absolutamente necessário aumento da eficiência dos motores de combustão interna.

A eletricidade, não sendo uma fonte de energia, pode ser produzida recorrendo a diferentes métodos. A utilização de tecnologias renováveis através dos recursos hídricos ou do vento é muito provavelmente o modo com menor impacto ambiental, mas também pode ser gerada através de centrais de biomassa, nucleares ou de combustíveis fósseis. Os veículos elétricos podem ser divididos fundamentalmente em dois tipos: os puramente elétricos, utilizando baterias e uma motorização elétrica e os híbridos, integrando a motorização elétrica e um motor de combustão interna. O primeiro tipo apresenta ainda consideráveis problemas de autonomia, uma vez que a quantidade de energia necessária para mover um veículo é bastante considerável e a quantidade de energia armazenável está limitada pelo número, tamanho, peso e capacidade das baterias. A utilização de um motor elétrico e outro de combustão permite ultrapassar a questão da autonomia, mas mantém a necessidade de recurso a fontes fósseis. Tanto uma como outra tecnologia são áreas em que os construtores automóveis apostam para os próximos anos. As maiores vantagens da motorização elétrica são a forte redução das emissões locais e a possibilidade de efetuar travagem regenerativa, acumulando energia do potencial inercial do veículo. Os veículos híbridos permitem ainda selecionar a solução mais adequada e eficiente, entre o motor elétrico e o de combustão, para responder a determinada solicitação.

Do ponto de vista ambiental, as tecnologias existentes ainda não revelam todas as vantagens que seriam esperadas. A eletricidade, não sendo uma fonte primária de energia, quando está a ser produzida, pode implicar a libertação de gases com efeito de estufa, uma vez que não existe ainda potencial para alimentar as necessidades elétricas atuais por intermédio de fontes renováveis, razão pela qual o acréscimo do consumo de energia elétrica só poderá ser suprido pelo recurso ao consumo de energias fósseis. Por outro lado, a produção de baterias tem também um significativo impacto ambiental. A grande vantagem dos veículos elétricos é permitir deslocar as fontes emissoras de poluentes das estradas para as chaminés das centrais de produção de eletricidade. Por esta razão, e pela substantiva diferença na eficiência dos motores elétricos relativamente aos motores de combustão interna em circuitos urbanos, é nestes trajetos que a aplicação destes veículos terá certamente maior aceitação e significado.

O hidrogénio é considerado como o combustível alternativo do futuro. De facto, esta substância que à semelhança da eletricidade não é uma fonte de energia, apresenta a potencialidade de poder ser utilizada nos motores de combustão interna ou em células de combustível (*fuel-cells*).

A utilização de hidrogénio em motores de combustão interna é interessante principalmente porque utiliza uma tecnologia que, mesmo necessitando de alterações, é bastante bem conhecida e as emissões são livres de carbono, libertando-se apenas vapor de água. A utilização de células de combustível considera a produção de energia elétrica no próprio veículo que pode então ser fornecido a um motor elétrico, minimizando o impacto ambiental associado à produção intensiva de baterias e anulando as emissões geradas na produção de energia elétrica através de tecnologias não renováveis, aumentando ainda a autonomia dos veículos.

As maiores dificuldades relacionadas com utilização de hidrogénio consideram o processo de produção, uma vez que esta molécula não está naturalmente disponível na Terra, e o modo como depois de produzida pode ser transportada, armazenada e distribuída. Existem algumas pistas sobre diferentes possibilidades para resolver estes problemas, mas na verdade ainda não há qualquer solução genericamente aceite.

A utilização de gás natural representa a possibilidade de reduzir a dependência dos transportes relativamente ao petróleo, mas ainda assim considera o recurso a um combustível com origem fóssil e por isso um recurso finito que implica uma menor, mas ainda considerável, quantidade de emissões com efeito de estufa. Na realidade, trata-se do recurso a uma tecnologia bastante bem conhecida mas implica um esforço grande ao nível da criação de infraestruturas necessitando de uma rede de distribuição de gás natural.

Alguns cenários identificam os veículos híbridos e elétricos como as mais fortes possibilidades para substituir as tecnologias convencionais que hoje dominam o mercado ao nível do transporte (Turton 2006) (Romm 2006). Sendo reforçado o papel dos transportes na sociedade ao longo do tempo, é salientado que, independentemente das incertezas atuais e futuras, é necessário tomar ações consistentes e rápidas para assegurar a mobilidade de forma sustentável.

A mobilidade é de facto um assunto chave ao nível dos custos económicos e energéticos dos transportes e representará certamente um aspeto fundamental na evolução de soluções energéticas (Litman 2005). A tendência atual e futura revela uma mudança para modos cada vez mais rápidos, o que provoca uma seleção do tipo de serviço de transporte pela celeridade com que assegura a mobilidade e não apenas em função das políticas definidas. Será também importante distinguir entre viagens urbanas e interurbanas (Schafer e Victor 2000).

A utilização de biocombustíveis é promissora e permite uma significativa contribuição para a economia e para o ambiente, contudo não será certamente uma solução universal, sendo essencial investir no aumento da eficiência energética, antes de procurar desesperadamente outras soluções energéticas (Kouroussis e Karimi 2006).

O maior problema na utilização de biodiesel é sem dúvida o custo. A produção de biodiesel pode custar até duas vezes mais que o custo equivalente para o gasóleo, o que é uma diferença significativa, sendo que cerca de 80% do custo global de produção é relativo à obtenção da matéria prima (A. Demirbas 2007 a, a).

Contudo a utilização de biodiesel como combustível alternativo no setor dos transportes não pode ser vista como a única contribuição para um desenvolvimento sustentável. A promoção do uso de biodiesel deve ser potenciada porque pode também contribuir para melhoria da economia, redução da pobreza, segurança energética, preservação da biodiversidade e adaptação às mudanças climáticas (Sukkasi, et al. 2010).

2.2.3 Breve análise histórica da utilização de biodiesel

Recuando ao início do desenvolvimento do motor de ignição por compressão, é possível detetar referências à utilização de óleo vegetal como combustível, feitas pelo próprio Rudolph Diesel. Este pioneiro tentou, a partir do que lhe foi ensinado sobre o ciclo de Carnot, desenvolver um sistema que produzisse energia mecânica utilizando todo o calor proveniente de uma fonte térmica, num processo isotérmico. Apesar de não ter atingido totalmente os seus intentos iniciais, graças ao seu talento e tenacidade, conseguiu o desenvolvimento de um mecanismo que, partindo de uma fonte térmica (combustão), produzia energia mecânica num processo a pressão constante, permitindo eficiências superiores aos motores a vapor que eram vulgares na altura. Também na mesma época

estava em desenvolvimento o motor de ignição por faísca, onde o ar era previamente misturado com o combustível antes de entrar na câmara de combustão. Este tipo de motor, hoje em dia vulgarizado como motor a gasolina ou motor Otto, apresentava eficiência limitada pelo facto de a taxa de compressão não poder ser demasiado elevada. Esse foi precisamente o pensamento de Rudolph Diesel, se a eficiência do ciclo de Carnot aumentava com a taxa de compressão, a existência de um sistema com uma elevada taxa de compressão, teria eficiência superior, como se veio a confirmar (A. Demirbas 2008).

Como visionário, Rudolph Diesel admitiu que a utilização de óleos vegetais como combustíveis, seria uma possibilidade real, sem que houvesse alteração no funcionamento do motor, o que impulsionaria o desenvolvimento da agricultura. Esta ideia surgiu quando, na Feira de Paris em 1900, um pequeno motor funcionou a óleo de amendoim, a pedido do governo Francês que pensou em potenciar esta invenção para que, utilizando os recursos das colónias francesas em África, recorrendo aos recursos agrícolas endógenos, seria mais interessante utilizar a abundância de óleos vegetais nas máquinas industriais e de potência do que transportar petróleo (Knothe, Gerpen e Krahl 2004).

Houve contudo dois aspetos que limitaram a utilização de combustíveis alternativos. Em primeiro o preço do petróleo extremamente baixo e a facilidade em obter gasóleo e gasolina, e por outro lado a aposta inicial dos fabricantes em motores de ignição por faísca, que criavam grandes excedentes em gasóleo.

Na altura da 2ª guerra mundial, houve um novo impulso na procura de combustíveis de origem não petrolífera. Verificaram-se alguns desenvolvimentos de novas soluções para combustíveis, donde se destaca um novo combustível com o nome dos seus inventores Fischer-Tropsch, um combustível líquido obtido partir do carvão. Na Alemanha, durante a 2ª Guerra Mundial, este combustível correspondeu a uma significativa parcela no consumo de combustíveis.

Desde o início do século XX que existem algumas referências sobre trabalhos desenvolvidos na produção e utilização de biodiesel (Borgelt, Kolb e Schumacher 1994) (Knothe, Gerpen e Krahl 2004). Contudo apenas nos anos 70 e 80 houve novo impulso no desenvolvimento e pesquisa de soluções alternativas ao petróleo, devido ao aumento dos preços deste produto mineral e ao início dos problemas com a possível escassez deste recurso. A partir de finais do século XX, houve um novo e decisivo passo na utilização de biodiesel, cujo interesse foi incrementado através da possibilidade da diminuição das emissões de fumo e de dióxido de carbono.

Devido à elevada viscosidade dos óleos vegetais, que implica alguns problemas ao nível da pulverização na câmara de combustão, e problemas de entupimento no sistema de injeção, foi recomendado por J. Walton em 1938 que, para aproveitar corretamente os óleos vegetais como combustível, seria necessário separar os triglicéridos e utilizar os ácidos gordos resultantes (Knothe, Gerpen e Krahl 2004). Esta foi a primeira declaração conhecida onde se anuncia a aplicação de esteres em vez dos óleos diretamente no motor. Existem também registos de uma patente belga com o número 422.87 com a data de 31 de Agosto de 1937, onde é revelado o processo de obtenção daquilo que hoje é reconhecido como biodiesel. O termo biodiesel aparece pela primeira vez num artigo chinês de 1988, seguido de um outro de 1991, crescendo exponencialmente, a partir desta altura até aos nossos dias, o número de publicações tratando este produto (Knothe 2001).

No início do século XX, tal como agora, era válida a expressão de Rudolf Diesel, citada num registo bibliográfico escrito por Nitske e Wilson em 1965 (Knothe 2001), onde é referido que o destino e âmbito do motor de combustão interna dependerão do combustível ou combustíveis presentes.

2.2.4 Produção

O processo mais comum para a obtenção de biodiesel é o da transesterificação de óleos gordos. Este é um processo conhecido e dominado há bastante tempo, havendo registos de que Duffy e Patrick efetuaram uma transesterificação em 1853, podendo afirmar-se que o biodiesel existiu mesmo antes da existência do motor de ignição por compressão, cuja história revela que apenas em 1893, 40 anos após o trabalho de Duffy e Patrick, foi revelado por R. Diesel o princípio de funcionamento teórico do motor de combustão a funcionar segundo o ciclo com o nome do seu inventor (A. Demirbas 2008).

A produção de biocombustíveis está muito dependente dos aspetos económicos. Um estudo revela que o preço de produção dos biocombustíveis está muito condicionado ao preço das matérias-primas, que pode ter muitas oscilações e que dependerá também das condições e locais de cultivo (Bridgewater e Double 1994).

Para além da transesterificação, existem outras formas de obtenção para diminuir a viscosidade dos óleos, que é em sentido restrito o intuito deste processo. A utilização direta de óleos implica a existência de problemas graves como a combustão incompleta, a rápida degradação dos óleos e o entupimento dos sistemas de injeção. Também é referido por alguns trabalhos de investigação o recurso a micro-emulsões, normalmente recorrendo a álcoois. Este processo envolve também algumas desvantagens de que são exemplo a injeção irregular, excessivo depósito de carbono, combustão incompleta e aumento da viscosidade do óleo lubrificante. Um outro processo conhecido e tentado por alguns investigadores consiste na quebra térmica molecular (pirólise), utilizando calor ou através de um catalisador. Este processo revela-se bastante dispendioso, produzindo uma substância com menor teor em oxigénio, mais parecida com a gasolina do que com o gasóleo (Ma e Hanna 1999).

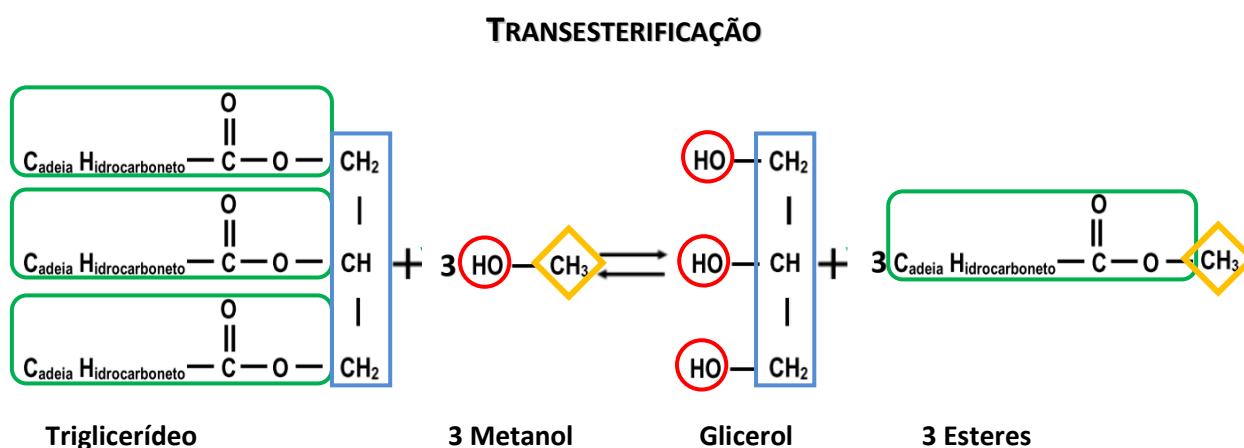


Fig. 2.2 – Esquema representativo do processo de transesterificação

A transesterificação é o processo utilizado para produzir biodiesel de acordo com as normas europeias e americana, onde o óleo vegetal ou a gordura animal é sujeita a uma reação com um álcool na presença de um catalisador, produzindo outro álcool (glicerol) e um éster metílico ou etílico, dependendo do álcool utilizado como reagente seja metanol ou etanol, respetivamente. Este processo é afetado pelas condições da reação, pelo rácio molar entre o álcool e o óleo, pelo tipo de álcool, tipo e quantidade de catalisador, tempo de reação e temperatura e pureza dos reagentes (Meher, Sagar e Naik 2006), (A. K. Aggarwal 2007). É ainda importante detalhar que as propriedades do biodiesel vão logicamente depender fortemente da matéria-prima utilizada e da exigência do processo, que está associada ao tipo de controlo da reação. Existem variadas ferramentas para controlar e monitorizar a reação de transesterificação, sendo este um fator essencial para que o produto final seja caracterizado por propriedades que permitam a sua utilização no motor de um veículo automóvel (Kralova e Sjoblom 2010).

Uma das formas mais comuns para obter biodiesel é com óleo de soja e girassol. É claro que o recurso a produtos alimentares torna o custo deste produto bastante elevado e introduz problemas ao nível da cadeia alimentar (Demirbas e Balat 2006).

O maior condicionamento à utilização de biodiesel é o aspeto económico. Na realidade, os custos da obtenção da matéria-prima, do seu transporte e da produção do biodiesel, tornam o seu preço superior ao do gasóleo. Terá ainda de ser contabilizado o aproveitamento obrigatório dos subprodutos, nomeadamente do glicerol e a otimização de todo o processo de produção (Muniyappa, Brammer e Nouredini 1996) (IEA, Eisentraut, et al. 2011).

Verifica-se ainda que o tipo de catalisador e aditivos utilizados na transesterificação tem efeitos muito limitados sobre a combustão e desempenho do motor, não sendo por isso fatores determinantes para a qualidade do biodiesel do ponto de vista da sua utilização em motores (Basha e Gopal 2012).

O biodiesel como é hoje industrialmente produzido, através de matérias-primas como a colza, o girassol, a soja, a palma ou a canola, é denominado por “biodiesel de 1ª geração” ou “biodiesel convencional”. Existe um esforço bastante grande de modo a encontrar alternativas que permitam a sustentabilidade na produção de biodiesel, recorrendo a matérias-primas que não afetem a cadeia alimentar mundial, seja pela utilização de fontes não alimentares, seja pela eliminação da necessidade de utilização intensiva de terrenos unicamente para culturas energéticas. Deste modo, a utilização de processos produtivos avançados, recorrendo a outras matérias-primas como resíduos lenhosos recorrendo a processos de biomassa para líquido (BtL), ou transesterificação com algas, ou ainda com novos processos como o de hidrogenação dos óleos vegetais (A. Demirbas 2007, b) (Vijayaraghavan e Hemanathan 2009), (IEA, Eisentraut, et al. 2011), (Demirbas e Demirbas 2011). Este combustível cuja denominação corrente é “biodiesel de 2ª geração” ou “*advanced biodiesel*” poderá permitir minimizar a dependência energética do setor dos transportes relativamente ao petróleo, sem implicar outro tipo de problemas económicos, ambientais ou mesmo sociais.

2.2.5 Propriedades

A invenção dos motores de ignição por compressão e os inúmeros desenvolvimentos subjacentes tiveram na sua essência as propriedades do combustível que iriam utilizar. Estas propriedades

condicionam definitivamente o funcionamento e o rendimento dos motores, razão pela qual se torna tão difícil encontrar alternativas, dado que os motores foram evoluindo em função direta dos desenvolvimentos dos combustíveis, ou no caso dos motores de ignição por compressão, dos avanços no processo de obtenção do gasóleo e respetivos aditivos. A procura da substituição em parte ou no todo desse combustível, mantendo a tecnologia existente nos motores atuais, mas utilizando um combustível com propriedades intrinsecamente diferentes, debate-se com uma tarefa bastante delicada, uma vez que a sua origem é completamente diferente também. Diferentes tamanhos e graus de saturação das moléculas existentes nos combustíveis obtidos a partir de diferentes matérias-primas e destes para o gasóleo determinam distintas propriedades que afetam o comportamento dos motores de combustão interna.

Analisando a situação do gasóleo, já de si existem diversas diferenças relativamente à qualidade desse produto requerida em diferentes partes do mundo, quer pela origem do crude, quer pela exigência normativa local. Um exemplo claro destas diferenças é o valor mínimo para o número de cetano requerido nos Estados Unidos da América (47) e na Europa (51). Para além do índice de cetano, várias são as propriedades do combustível que são críticas para o melhor funcionamento do motor. Este assunto encontra-se bastante bem analisado num estudo publicado em dois artigos, um realizado por Fanick (Fanick 2008) e outro por Hoekman et al. (Hoekman, et al. 2012), a partir dos quais se descrevem abaixo em resumo as propriedades mais relevantes e o respetivo significado.

Número de Cetano: medição da qualidade de ignição, o que indica a capacidade que o combustível apresenta para que ocorra o início da combustão quando é injetado na câmara de combustão. Ocorrem variações no número de cetano em função da matéria-prima do biodiesel, mas quase todos ficam acima do índice 51 exigido pela norma europeia EN 14214 (EN 14214 2008).

Densidade: valor tornado adimensional pelo quociente entre a massa volúmica da substância em causa com a massa volúmica da água a 4°C e 1 atm (1000kg/m³). Quanto maior for a densidade, maior massa a substância apresenta para um mesmo volume. O biodiesel é mais denso que o gasóleo, apresentando poucas variações em função da sua origem, oscilando tipicamente entre 0,873 e 0,883.

Viscosidade: medida da resistência ao escoamento de um fluido. Maior viscosidade implica maior resistência ao escoamento, o que pode ser traduzido numa maior dificuldade na operação da bomba de combustível, pior atomização, maior projeção e menor abertura do spray de combustível. O biodiesel é mais viscoso que o gasóleo, apresentando tipicamente viscosidades entre 4 a 5 mm/s² o que se enquadra na gama 3,5 a 5 mm/s² aceite pela normativa europeia EN14214 (EN 14214 2008).

Ponto de turvação: temperatura a partir da qual se começa a notar a cristalização de algumas ceras no combustível, quando este sofre um arrefecimento. Este parâmetro é importante na utilização dos combustíveis a baixas temperaturas, uma vez que a formação destes cristais afetam o seu escoamento, podendo levar ao entupimento de filtros ou mesmo à interrupção do abastecimento de combustível ao motor. O ponto de turvação é mais elevado no biodiesel do que no gasóleo.

- Ponto de fluidez:* temperatura a partir da qual o combustível deixa de escorrer, quando se arrefece o combustível, este processo decorre pelo aumento da cristalização que impede a circulação e conseqüente fornecimento de combustível ao motor. Associado a este conceito, cada vez mais se tem utilizado o ponto de entupimento dos filtros (CFPP), utilizando como referência o ponto a partir do qual o combustível deixa de fluir através de um filtro constituído por uma malha com uma abertura específica. O ponto de fluidez do biodiesel é mais elevado que o do gasóleo.
- Ponto de inflamação:* temperatura a partir da qual a quantidade de vapor libertada é suficiente para provocar uma inflamação, num processo de aquecimento do combustível. É um parâmetro importante no processo de combustão e na definição de parâmetros de segurança para transporte, manipulação e armazenamento. O ponto de inflamação (fulgor) do gasóleo é mais baixo que o do biodiesel.
- Volatilidade:* capacidade do combustível para vaporizar quando sujeito a um aquecimento. Este parâmetro é muito importante na operação de um motor. Uma menor volatilidade pode indiciar um aumento das emissões de HCs e CO bem como uma ligeira diminuição de NOx. O gasóleo é mais volátil que o biodiesel, sendo que a curva de destilação que permite avaliar a volatilidade dos combustíveis, se inicia a uma temperatura mais baixa para o gasóleo, embora a temperatura de destilação final seja muito próxima para os dois tipos de combustíveis. O biodiesel caracteriza-se pela curva de destilação corresponder a uma gama de temperaturas bastante estreita.
- Lubricidade:* associada à viscosidade do combustível, representa a capacidade deste para lubrificar os componentes mecânicos com que interage. O biodiesel apresenta maior lubricidade que o gasóleo.
- Índice de iodo:* representa o grau de saturação do combustível. Este parâmetro tem especial importância na qualidade do biodiesel, uma vez que o índice de iodo do gasóleo é 0, ou seja totalmente saturado. À medida que a constituição molecular do combustível aumenta o teor em ligações duplas ou mesmo triplas, traduzida por um menor grau de saturação, este combustível é também mais facilmente oxidado, aumentando a capacidade de degradar componentes metálicos, pela maior acidificação a que essa oxidação conduz.
- Teor em Oxigénio:* equivale à quantidade de oxigénio presente no combustível. Uma vez que o gasóleo não tem qualquer teor em oxigénio, este é um aspeto relevante e que distingue consideravelmente os dois tipos de combustíveis, sendo espectável que o biodiesel tenha entre 10 a 12% de oxigénio (Yamane, Ueta e Shimamoto 2001) (Ozsezen e Canakci 2011).
- Poder Calorífico:* representa a quantidade de energia armazenada no combustível e que este pode libertar no processo de combustão. É um parâmetro essencial na comparação dos combustíveis uma vez que a eficiência do processo de combustão tem diretamente a ver com a quantidade de energia aproveitada a partir da quantidade de energia disponível, que é representada pelo poder calorífico do combustível. O gasóleo apresenta um poder calorífico numa base

mássica mais elevado que o biodiesel em 10 a 14% (Lapuerta, Armas e Rodriguez-Fernández 2008 a), (A. K. Aggarwal 2007), essencialmente devido à presença de oxigénio na constituição deste último. Ocorre alguma diversidade na caracterização deste parâmetro, sendo muitas vezes utilizada a noção de poder calorífico inferior (PCI) e outras vezes a noção de poder calorífico superior (PCS). São noções correspondentes, apenas diferenciadas pela consideração do estado físico da água nos produtos da combustão (vapor no PCI e água líquida no PCS), mas deverá ter-se em atenção se na comparação dos valores entre combustíveis a noção utilizada é a mesma.

Módulo elasticidade: relaciona a variação de pressão sofrida pelo combustível com a correspondente alteração no volume. Em regra considera-se que os líquidos são incompressíveis, ou seja, que a variação de pressão não implica qualquer alteração no volume ocupado. Tendo em conta as elevadas pressões do sistema de injeção de combustível, esta propriedade dos combustíveis torna-se relevante, afetando o comportamento do injetor. Esta noção pode muitas vezes estar também associada a outras designações como o módulo ou coeficiente de compressibilidade. O biodiesel é mais incompressível que o gasóleo.

Tensão superficial: refere-se à propriedade exibida nas fronteiras de um combustível quando interage com outra substância, seja o ar ou sejam os componentes metálicos do sistema de injeção. A maior relevância desta propriedade manifesta-se no processo de formação do spray na injeção do combustível na câmara de combustão. Uma tensão superficial elevada dificulta o processo de atomização. O biodiesel apresenta uma tensão superficial mais elevada que o gasóleo, pelo que as gotas de combustível tendencialmente serão maiores, a que corresponderá uma pior atomização e uma mais difícil vaporização.

A revisão bibliográfica abaixo descrita apresenta uma breve discussão sobre o entendimento de diversos investigadores relativamente às diferenças existentes entre o gasóleo e o biodiesel obtido de diversas fontes de matéria-prima e com diferentes proporções de incorporação.

Em meados dos anos 80 ressurgiu o interesse na utilização de biodiesel principalmente nos Estados Unidos da América, podendo citar-se como exemplo o trabalho de Wagner, Clark e Schrock (Wagner, Clark e Schrock 1984). Um dos primeiros estudos europeus sobre o impacto das diferentes propriedades dos combustíveis, quando fornecidos a motores de ignição por compressão foi realizado por Claus Breuer (Breuer 1995), considerando a utilização de óleo vegetal de colza e o respetivo éster metílico em comparação com o gasóleo. No estudo europeu realizado foi analisada a divisão das duas fases de combustão, pré-mistura e difusão e quais os impactos que as diferentes propriedades físicas e químicas oferecem nesse processo. Foi concluído que essas fases são divididas fundamentalmente pelas características de evaporação do combustível e pela sua viscosidade. A primeira fase de pré-mistura, que ocorre nas zonas onde foi injetado o combustível e onde este teve já tempo para se misturar com o ar, é bastante dominada pelo número de cetano. A segunda fase, que corresponde à combustão por difusão, é bastante influenciada pela quantidade de combustível disponível e pelas condições em que ocorreu a fase de pré-mistura, estando bastante dependente da curva de destilação característica desse combustível.

Em 1996 foi realizado um estudo bastante completo (Schimdt e Gerpen 1996), onde foram utilizados vários tipos de biodiesel, tendo em consideração diversas matérias-primas e diversas proporções de biodiesel misturado em gasóleo, tendo sido possível concluir sobre a influência do número de cetano nas emissões produzidas por um motor de ignição por compressão, estando esta propriedade associada ao tamanho da cadeia da molécula de combustível e ao correspondente grau de saturação. Também o conteúdo em oxigénio do combustível foi avaliado, tendo sido identificado como responsável pela diminuição das emissões de partículas verificada quando se utiliza biodiesel.

A qualidade do biodiesel, um dos aspetos essenciais para que este combustível possa efetivamente ser utilizado com fiabilidade nos motores foi tratada por Mittelbach (Mitteelbach 1996), tendo sido analisados fundamentalmente dois aspetos que são introduzidos pelos biocombustíveis relativamente ao gasóleo, como a elevada capacidade higroscópica do biodiesel que aumenta a probabilidade de introduzir água no sistema de injeção de combustível, e o grau de saturação das moléculas de biodiesel que é representado pelo número de iodo. É referido neste estudo (Mitteelbach 1996) que a quantidade de água incorporada no biodiesel pode ir até 1000ppm, estando este valor associado ao processo de produção e às condições e tempo de armazenamento, enquanto o número de iodo depende essencialmente do tipo de matéria-prima utilizado para produzir o biodiesel e representa a maior ou menor tendência de oxidação do biodiesel. Quanto mais insaturado for o biodiesel, maior será o número de iodo e maior será a propensão para ser oxidado. É ainda de salientar, relativamente às conclusões do estudo, a correlação do ponto de inflamação com o teor em metanol utilizado no processo de fabrico e ainda a correlação entre a viscosidade e o teor em triglicerídeos remanescentes no interior do biodiesel, reforçando a importância do processo de produção para as características do biodiesel.

Também Monyem, Canakci e Gerpen (Monyem, Canakci e Gerpen 1999) estudaram a degradação da qualidade do biodiesel com o tempo, nomeadamente o grau de acidificação do biodiesel por efeito da sua oxidação e descobriram uma relação interessante entre o aumento da viscosidade à medida que aumenta essa acidificação. Foi também possível estabelecer uma relação inversa entre a quantidade de biodiesel incorporado em gasóleo e esse grau de oxidação que indiretamente dá uma medida do grau de degradação do combustível, especificamente porque quanto maior a acidez do combustível, maior será o ataque às superfícies metálicas dos componentes dos sistemas de injeção.

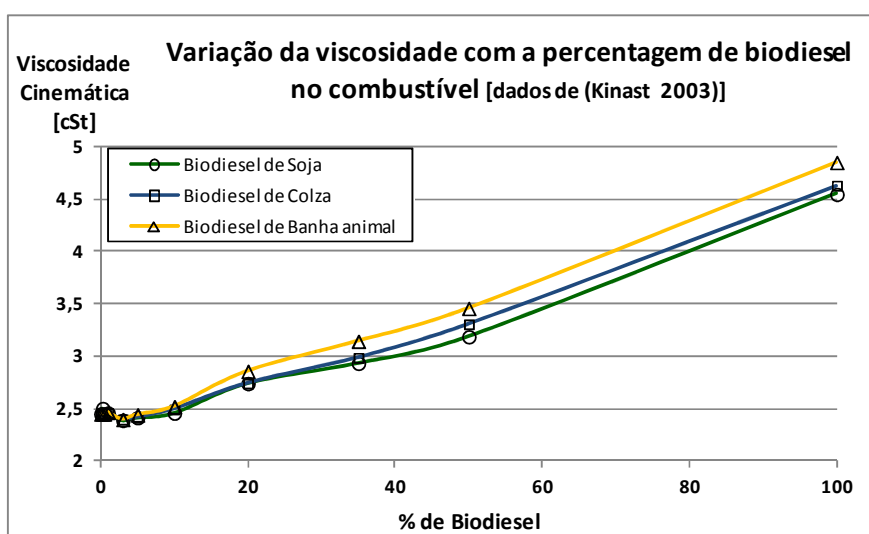


Fig. 2.3 – Variação da viscosidade em função da quantidade de biodiesel presente no combustível (Kinast 2003).

Um relatório apresentado (Kinast 2003) revela que algumas propriedades variam de modo não intuitivo, apresentando um comportamento não linear no que diz respeito à quantidade de biodiesel incorporado em gásóleo. Relativamente à viscosidade, conforme patenteado na figura 2.3, é visível o comportamento não linear para pequenas concentrações de biodiesel. Os problemas associados à operação a baixas temperaturas são também objeto de análise, sendo constatado que a evolução das propriedades que afetam o escoamento do combustível representam um aspeto fundamental, principalmente em utilizações em climas mais frios. É referido que o escorregamento do biodiesel deixa de ocorrer em condições de temperaturas mais elevadas do que acontece com o gásóleo, pelo que a utilização da mistura correta e a utilização de aditivos é fundamental para evitar esses problemas. É ainda assinalada a importante contribuição da viscosidade para o desempenho do injetor e do spray de combustível formado.

Através de um estudo utilizando 4 diferentes tipos de combustível (Lin e Lin 2006), foram comparadas as propriedades destes e os efeitos sobre o desempenho e as emissões resultantes da combustão num motor de ignição por compressão, considerando especificamente o efeito da produção de biodiesel, recorrendo a um processo adicional de peroxidação, que altera as propriedades do biodiesel obtido. O processo de peroxidação é utilizado para reduzir os compostos com maior peso molecular o que provoca uma diminuição da viscosidade e um aumento do teor em oxigénio e o grau de saturação do combustível, diminuindo o índice de iodo.

Uma das propriedades em que mais se destaca a diferença entre o gásóleo e o biodiesel é o conteúdo de oxigénio (não existe no gásóleo e representa cerca de 10-12% do biodiesel). Com este intuito foi feito um estudo (Zannis, Hountalas e Kouremenos 2004), onde foram identificadas as diferenças entre a introdução de 3% de oxigénio por meio de aditivos e a existência de oxigénio devido à utilização de 30% de biodiesel misturado em gásóleo. Também se identificam alguns trabalhos posteriores (Bhale, Deshpande e Thombre 2009) (Hamdan e Khalil 2010) (Hansen, Zhang e Lyne 2005) (D. Rakopoulos, C. Rakopoulos e E. Kakaras, et al. 2008) (Sayin, M. Ilhan, et al. 2009) onde foi analisada precisamente a oxigenação do combustível recorrendo a etanol, metanol e outros compostos, com efeitos ao nível da viscosidade, ponto turvação e ponto de escorregamento. São ainda de destacar as diferenças encontradas quer no que diz respeito às emissões, quer no que diz respeito ao desempenho.

Mustafa Balat efetuou um trabalho de revisão interessante (Balat 2006) onde destacou as diferenças entre a utilização de óleos vegetais ou animais e a utilização do biodiesel partindo dos óleos sujeitos a um processo de transesterificação. Destaca-se a demasiado elevada viscosidade dos óleos vegetais que impossibilita a sua utilização em motores em contraponto com o muito menos viscoso biodiesel, mesmo assim com valores de viscosidade superiores ao dobro da viscosidade normal do gásóleo. É ainda referido que os valores de poder calorífico do biodiesel em base mássica são 9 a 13% inferiores aos do gásóleo e os pontos de turvação e de escorregamento do biodiesel são também consideravelmente superiores aos dos correspondentes ao gásóleo. Importa ainda realçar as diferenças entre os esteres metílicos e os esteres etílicos. Segundo o estudo de Mustafa Balat, os esteres etílicos, quando utilizados em motores, produzem menor opacidade, temperaturas de escape mais baixas e pontos de escorregamento inferiores do que os esteres metílicos, apresentando a adversidade de aumentarem a tendência dos injetores para entupirem.

As propriedades básicas das misturas de biodiesel em gásóleo foram avaliadas através do estudo realizado com biodiesel de óleo de palma (Benjumea, Agudelo e Agudelo 2008). É enunciada a

importância do conhecimento das propriedades da mistura utilizada de modo a potenciar essa utilização e prever o comportamento do motor. Conclui-se que, apesar da maior densidade do biodiesel, a temperatura final de evaporação do biodiesel de palma é mais baixa que a do gasóleo. Foi também possível definir que as misturas de biodiesel com gasóleo correspondem a uma mistura de duas substâncias com semelhante estrutura molecular, não sendo prevista qualquer interação entre elas e assumindo que ambos os líquidos são não polarizados, completamente miscíveis e quando misturados os seus volumes podem ser praticamente aditivos. Contrapondo alguns resultados de outros estudos, neste trabalho é possível estabelecer uma boa correlação entre a evolução das propriedades em função da quantidade de biodiesel incorporado, sendo evidenciado que os resultados experimentais obtidos apresentam desvios muito pequenos relativamente às leis simples de misturas, na previsão das propriedades básicas do biodiesel de óleo de palma.

Assumindo o importante papel que a viscosidade desempenha no comportamento de um combustível e o conseqüente funcionamento do motor ao qual é fornecido esse combustível, foi elaborado um estudo (Candeia, et al. 2007) onde é analisado o comportamento de várias misturas de biodiesel de óleo de soja em gasóleo. Foi evidenciado que as misturas testadas, B5, B15 e B25, bem como o combustível constituído apenas por gasóleo exibiram um carácter virtualmente newtoniano. A mais elevada viscosidade das misturas com maior teor em biodiesel é causada pela maior massa molecular dos triglicerídeos contendo cadeias longas de ácidos gordos. Na obtenção do biodiesel através da transesterificação a massa molecular dos compostos é diminuída, o que justifica a menor viscosidade do biodiesel face ao óleo original.

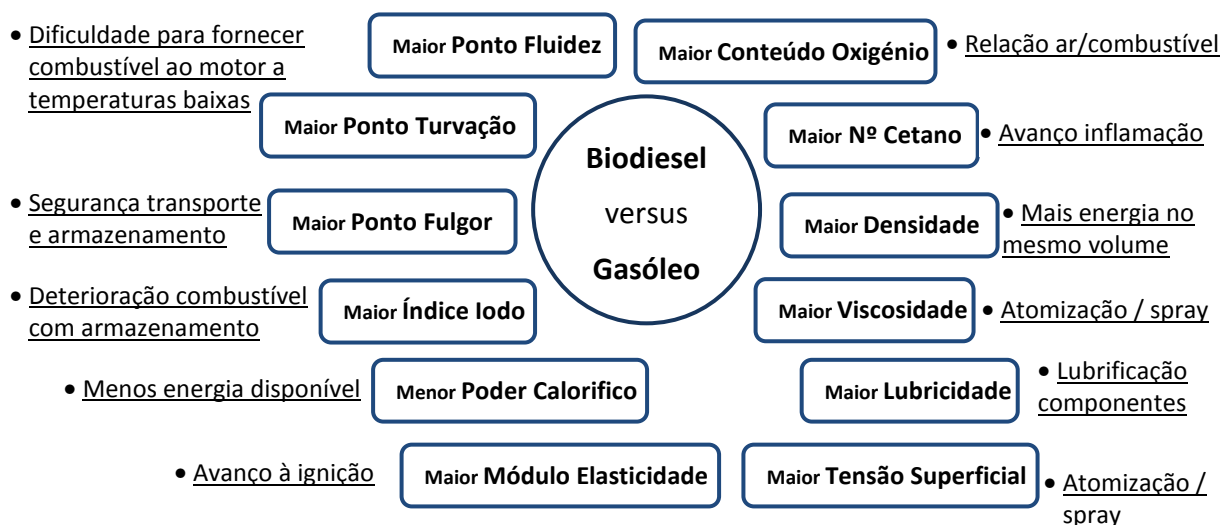


Fig. 2.4 – Esquema que relaciona as propriedades do combustível com os possíveis efeitos no motor.

Foi realizado um estudo sobre as propriedades do biodiesel obtido a partir de 4 tipos diferentes de óleos vegetais (rícino, soja, algodão e canola) (Albuquerque, et al. 2009), especificamente ao nível da viscosidade, massa específica e índice de iodo e do cumprimento das especificações europeias (EN 14214 2008). Foi possível concluir que o biodiesel obtido a partir de óleo de rícino não cumpre com os parâmetros de viscosidade e massa específica definidos na Europa, sendo também identificada a necessidade de misturar compostos no biodiesel de soja de modo a diminuir o índice de iodo para que este cumpra com os limites definidos. Ainda foi estabelecida uma estreita correlação entre as propriedades do biodiesel e a estrutura química das substâncias oleaginosas de base, principalmente

ao nível dos grupos hidróxilo e insaturados do óleo de rícino e das ligações duplas das moléculas do óleo de soja.

Atendendo à associação tão estreita das propriedades do biodiesel com o óleo que esteve na sua origem, vários têm sido os trabalhos que têm sido feitos com o intuito de prever as propriedades do biodiesel partindo do conhecimento existente dos óleos (Gopinath, Puhan e Nagarajan 2009), (Yuan, Hansen e Zhang. 2009), (Anand, Ranjan e Mehta 2010), (Shu, et al. 2011), (Anand, Sharma e Mehta 2011) (Tesfa, et al. 2010).

2.2.6 Armazenamento e durabilidade do Biodiesel

Uma das questões mais críticas na utilização de biodiesel como combustível é a maior tendência revelada para oxidar quando armazenado. Este efeito promove algumas alterações nas propriedades do combustível, nomeadamente ao nível da viscosidade e da acidez, tendo este assunto vindo a ser tratado por diferentes equipas de investigação.

A utilização de biodiesel oxidado e não oxidado foi avaliada num motor John Deere 4276T e produziu efeitos muito semelhantes, havendo apenas ligeiras alterações ao nível das emissões de CO e HC (Monyem e Gerpen 2001).

A análise das propriedades de várias amostras de biodiesel obtido a partir de diferentes fontes de matéria-prima, revela que o biodiesel, quando sujeito a um armazenamento por um período de um ano, não demonstra variações significativas das suas propriedades, exceto ao nível da viscosidade que patenteava uma ligeira redução ao longo do tempo, não sendo ainda assim uma alteração expressiva (Bondioli, et al. 2003).

A influência dos componentes insaturados dos ácidos gordos afeta bastante a estabilidade oxidativa do biodiesel. A utilização de biodiesel oxidado num motor monocilíndrico aumenta a pressão e temperatura de combustão o que implica um aumento nas emissões de NOx (Yamane, et al. 2007).

As considerações sendo coerentes ao nível das propriedades afetadas pelo processo de oxidação, não são contudo completamente consensuais ao nível da magnitude dessas alterações. É referido que o processo de auto-oxidação do biodiesel durante o armazenamento é facilmente provocado pelo ar e reduz a qualidade do biodiesel, afetando a viscosidade e o índice de acidez. Existem todavia alguns aditivos que podem anular ou minorar esta oxidação e que não introduzem diferenças no processo de combustão (Ryu 2009).

Alguns testes com biodiesel sujeitando-o a um processo severo de oxidação, revelaram a existência de significativas alterações nas propriedades físicas e químicas, não tendo contudo provocado problemas para o funcionamento do motor na utilização em testes de longa duração, exceto o entupimento de filtros (Terry, McCormick e Natarajan 2006).

Na realidade, o problema da oxidação do biodiesel, que está associado ao transporte e armazenamento, preocupa os construtores de automóveis e de sistemas de injeção de combustível, dado que este parâmetro não era crítico no gasóleo, mas apresenta alguns problemas novos com a utilização de biodiesel, devido à acidificação do combustível, que pode afetar a fiabilidade e durabilidade dos componentes dos sistemas de abastecimento e injeção dos veículos (*Fuel Injection Equipment Manufacturers 2009*). Na realidade a estabilidade oxidativa tem vindo a ser um dos

problemas estudados, quer ao nível da seleção de métodos adequados para avaliar essa propriedade, quer através da utilização de aditivos que permitam assegurar essa estabilidade (Bondioli, et al. 2003) (McCormick e Westbrook 2010).

2.2.7 Lubrificação e Arranque a frio

A utilização de um combustível com origem e propriedades distintas das do gasóleo introduz várias questões inovadoras relativamente ao comportamento e durabilidade do sistema de injeção de combustível e à correspondente lubrificação desses componentes. Também existem interações do biodiesel e dos correspondentes produtos de combustão com o óleo lubrificante, pelo que também ao nível da lubrificação dos componentes do motor podem ser verificadas alterações.

Relativamente à lubrificação dos componentes dos sistemas de injeção, considerando a maior viscosidade do biodiesel e maior poder dispersante, será natural que os componentes fiquem melhor lubrificados e mais limpos quando utilizam biodiesel. Pode mesmo afirmar-se que quando se misturam pequenas quantidades no gasóleo, pode ser entendido como um aditivo que melhora as características lubrificantes do combustível convencional (Knothe e Steidley 2005). A análise da utilização de biodiesel puro (B100), permite concluir mesmo que os componentes mais críticos, como as agulhas do injetores, são melhor lubrificados, não sendo visíveis aumentos de depósitos de carbono na câmara de combustão, relativamente à utilização de gasóleo (Pehan, et al. 2009).

A possibilidade de formação de depósitos no bordo do pistão foi contudo notoriamente comprovada pela realização de testes num motor utilizando apenas biodiesel (B100), lubrificado por óleos minerais, não existindo registos destes depósitos quando se utilizavam óleos lubrificantes sintéticos aditivados (Sem 2004).

Relativamente ao desgaste dos componentes do motor e aos efeitos no óleo lubrificante do uso de biodiesel, que poderá afetar esse desgaste, pode referir-se que a quantidade de metais presentes no óleo de vários veículos na altura definida para a muda de óleo não foi estatisticamente diferente da que seria expectável se tivesse sido utilizado gasóleo. Na realidade nota-se uma ligeira redução nos teores de alumínio, aço, crómio e chumbo. Pode, deste modo, ser concluído que a utilização de biodiesel não implica um aumento do desgaste dos componentes do motor (Shumacher, Peterson e Gerpen 2001). Verifica-se que a presença de biodiesel poderá ser ligeiramente mais corrosiva para alguns componentes do motor, contudo as evidências até ao momento não permitem afirmar se esse grau de aumento da corrosão provocará limitações para lá do que será razoável ao funcionamento e durabilidade desses componentes (Haseeb, et al. 2011). A origem dessa maior propensão corrosiva está associada à auto-oxidação, à natureza higroscópica, à elevada condutividade elétrica, à polaridade e solvência patenteadas pelo biodiesel, que promovem maior corrosão de metais e ataque aos elastómeros (Fazal, Haseeb e Masjuki 2011).

Devido à maior viscosidade do biodiesel, devem ser tomados especiais cuidados quando este é utilizado em climas frios e principalmente no arranque. Situações de temperaturas muito baixas podem inviabilizar a circulação correta do combustível e implicar entupimentos no filtro de combustível ou problemas na injeção (Kegl 2008 a).

2.2.8 Spray e Injeção

A ignição representa todo o processo de transição que ocorre desde a evaporação do combustível até à sua combustão (S. Aggarwal 1998). Este processo é algo complexo e depende bastante das propriedades dos combustíveis. O atraso da ignição é o tempo que decorre desde que se cria uma mistura de combustível com ar até ao aparecimento de uma chama (S. Aggarwal 1998), existindo vários investigadores que ainda definem dois tipos de atraso: o físico, relacionado com a atomização, evaporação, e a mistura do combustível com o ar; e o químico relacionado com a atividade química de alterações moleculares e libertação de calor que promove o aparecimento de uma chama.

Para que melhor se entenda o modo como as propriedades do biodiesel podem afetar o processo de ignição, foi estruturada a síntese bibliográfica apresentada seguidamente. Nesta análise pretende-se apresentar o modo como diferentes investigadores estudaram a influência que pode ser introduzida no processo de injeção de combustível e início da combustão, pelo facto de se estar a utilizar um combustível com características diversas daquelas para as quais o motor foi desenvolvido e testado.

É demonstrado que as diferenças entre as propriedades do biodiesel e do gasóleo afetam fortemente a pressão de injeção, a razão de injeção e as características do spray (Yamane, Ueta e Shimamoto 2001). Neste estudo é realçada a diferença muito relevante verificada no comportamento da pressão de injeção cujo pico é maior quando se utiliza biodiesel a pressões baixas e a temperaturas também baixas. Contudo, quando a pressão de injeção atinge valores mais elevados e a temperatura se torna também mais alta, o pico de pressão atingido com biodiesel e gasóleo é muito similar. Este comportamento é extremamente importante na análise do comportamento do motor quando utiliza biodiesel, em regimes de carga diferentes. Neste estudo (Yamane, Ueta e Shimamoto 2001) foi ainda verificada a diferença ao nível da formação do spray que se revelou menos penetrante no biodiesel do que no gasóleo, o que produz implicações ao nível da mistura de combustível com o ar e consequentemente afeta os níveis de emissões.

O trabalho de Hyun e Oguma (Hyun e Oguma 2002) apresenta uma análise visual sobre o modo como diferentes combustíveis produzem diferentes tipos de jatos no processo de injeção. Num interessante trabalho realizado em 2006 (Rakopoulos, Antonopoulos e Rakopoulos 2006 b) foi avaliado, experimental e numericamente, o desenvolvimento do spray de diferentes combustíveis. É concluído que de facto as diferentes propriedades dos combustíveis afetam muito a formação do spray e eventualmente o mecanismo de combustão e a formação de emissões. Alguns dos factos estudados revelam que a existência de áreas com riqueza elevada é limitada pela utilização de biodiesel devido à existência de oxigénio na estrutura molecular que se vai libertando com a vaporização do combustível. Também é revelado que o diâmetro médio das gotas de combustível será maior para o biodiesel do que para o gasóleo, essencialmente devido às diferenças ao nível da viscosidade e da tensão superficial.

O diâmetro da gota, a temperatura e fração mássica dos combustíveis no momento da injeção são fortemente dependentes das propriedades desses combustíveis. Num estudo comparativo entre biodiesel de colza e gasóleo verificou-se que estes exibem condições evaporativas similares, indicando que o biodiesel de colza pode ser utilizado com sucesso em sistemas de chamas de difusão (Barata 2008). Contudo, verificou-se que para que a evaporação do biodiesel fosse semelhante à preconizada pelo gasóleo seria necessário aumentar a sua temperatura em cerca de 150K, sendo reconhecida a dificuldade em implementar esta situação na prática.

A análise dos efeitos de várias propriedades de diferentes combustíveis no processo de injeção (Boehman, et al. 2003) revela claramente que o elevado módulo de elasticidade do biodiesel promove um avanço à injeção o que por sua vez contribui para um aumento ligeiro das emissões de NOx. Na análise visual do processo de combustão utilizando gasóleo e biodiesel são perceptíveis pequenas alterações na luminosidade, no spray e na estrutura da chama, provando também a existência de diferenças ao nível do tempo de injeção e do atraso na ignição que são confirmados pela avaliação de comportamento da agulha do injetor e da pressão no interior do cilindro.

Um estudo numérico, onde foi analisado o efeito das diferentes proporções de biodiesel de colza em gasóleo (Kegl 2006, a), revelou diferentes expressões que permitem prever o comportamento dos combustíveis em diferentes condições de pressão e temperatura. Foi notório o aumento da pressão de injeção com o aumento do teor em biodiesel no combustível. Este aumento foi associado ao aumento da densidade, viscosidade e módulo de elasticidade. Também o aumento da quantidade de biodiesel incorporada no combustível traduz-se num avanço da ignição quando se utiliza biodiesel.

A avaliação do comportamento do sistema de injeção com biodiesel (Szybist e Boehman 2003) confirma o efeito do avanço da injeção com o aumento do teor em biodiesel no combustível. Revela também que a duração da injeção é encurtada com a introdução de biodiesel, efeito que se vai evidenciando à medida que a quantidade de biodiesel presente na mistura de combustível fornecida é também aumentada. O avanço na injeção e na ignição provoca um aumento da temperatura máxima no processo de combustão que poderá estar na origem das maiores emissões de NOx.

As características consideradas mais importantes no processo de injeção são a pressão a que é feita, a duração, o instante em que é realizada relativamente à rotação da cambota, o caudal de combustível fornecido e o processo histórico da relação de pressões (Kegl e Hribernik 2006). De acordo com este estudo, o incremento na quantidade de biodiesel misturada em gasóleo aumenta a quantidade de combustível injetado, o tempo de duração da injeção, e a pressão de injeção em quase todos os regimes. Contudo, é possível verificar que este efeito não é constante e varia de acordo com os regimes e a quantidade de biodiesel incorporada. De facto, para incorporações de 25% de biodiesel é possível verificar uma diminuição de cerca de 1% no caudal de combustível, quase independente do regime de funcionamento. O que em todos os regimes e para todas as misturas contendo biodiesel se verifica é um aumento da pressão máxima e do avanço da injeção. Esta é a causa provável indicada para o aumento de emissões de NOx verificada com a utilização de biodiesel.

O efeito da carga sobre o comportamento do motor quando utiliza biodiesel ou gasóleo é também focado (Zannis, Hountalas e Papagiannakis 2007), sendo possível discernir que, a 60 e 80% da carga, o aumento da viscosidade resulta num aumento abrupto da pressão de injeção aumentando consecutivamente o pico de pressão de injeção. A cargas baixas o efeito das propriedades dos diferentes combustíveis na pressão de injeção é praticamente imperceptível. Este facto é atribuído ao efeito da viscosidade ser potenciado com o aumento da carga do motor. É também referido que o efeito das propriedades dos combustíveis não provocam variações significativas para diferentes rotações do motor. O aumento da viscosidade e densidade provocado pela incorporação de biodiesel no gasóleo é apontado como razão para uma ligeira redução do melhor consumo específico de combustível (bsfc).

A avaliação comparativa das características do spray de combustível num processo de injeção utilizando biodiesel e gasóleo foi efetuada para verificar o papel desempenhado pelas diferentes propriedades dos combustíveis na injeção, atomização e rendimento de combustão (He, et al. 2008).

O facto de o biodiesel apresentar maior viscosidade, densidade e módulo de elasticidade justifica uma maior penetração do jacto. Embora inicialmente a velocidade de penetração seja menor devido à maior viscosidade, vai contudo acelerando devido à maior densidade, acabando por apresentar um jacto mais longo. Este efeito é justificado pelo facto das gotas de combustível sendo mais pesadas, apresentarem uma maior inércia e por isso fazerem um percurso maior. O efeito da maior viscosidade impede uma maior liberdade ao movimento, promovendo algum atraso no fluxo de combustível, contribuindo também para a formação de gotas de maior dimensão. Também o cone do spray é aumentado comparativamente ao do gasóleo.

O efeito provocado no spray foi também avaliado por outros investigadores (Li, et al. 2006) (Kegl e Pehan 2008) que obtiveram resultados semelhantes aos já indicados, embora seja possível encontrar algumas divergências. É confirmada a maior penetração do jacto quando se utiliza biodiesel mas o ângulo desse jacto fica mais estreito para quase todos os regimes de operação testados. Também é revelado que o diâmetro médio das gotas de combustível que compõem o spray são maiores no caso do biodiesel do que no gasóleo, mas não tão grandes quanto esperado devido ao efeito da maior pressão de injeção que tende a favorecer a atomização. Confirma-se neste trabalho que a utilização de biodiesel aumenta a duração, o avanço e a pressão da injeção.

A tentativa de otimização do motor para utilizar biodiesel permitiu evidenciar que essa otimização é muito dependente das propriedades do combustível e um motor desenvolvido e parametrizado para consumir gasóleo não consegue ser tão eficiente quando é abastecido com biodiesel (Kegl, Kegl e Pehan 2008). Em condições otimizadas, considerando a utilização de um único tipo de combustível, revela-se que o consumo de biodiesel pode ser ligeiramente menor que o de gasóleo para as mesmas condições de operação do motor. Na análise do spray é patenteado que a solução ideal passa por ter um jacto longo e estreito com uma boa atomização, ou seja onde as gotas tenham um tamanho o mais próximo possível da escala molecular. O desenvolvimento de um spray com estas características contribui decisivamente para melhorar o desempenho de um motor, reduzindo o consumo de combustível e as emissões. De facto confirma-se a existência de um spray mais longo e estreito com biodiesel mas cujas gotas apresentam um tamanho demasiado elevado, essencialmente devido à viscosidade e à tensão superficial mais elevada características deste combustível alternativo.

Um trabalho realizado numa instalação experimental, onde através de um fluxo de ar em contracorrente se injetava o combustível, sendo feita a avaliação do comportamento do jacto, revelou que a injeção de biodiesel de óleo de canola permitia maiores taxas de evaporação do que as obtidas com gasóleo (Erazo Jr., Parthasarathy e Gollahalli 2010). A justificação para este facto dever-se-ia, segundo os investigadores, ao menor tamanho das gotas de combustível formadas quando se utiliza biodiesel. Também é referido neste estudo que estas gotas apresentam maiores velocidades axiais e menores velocidades radiais nas zonas afastadas do ponto de injeção, quando se utiliza biodiesel, o que provoca um jacto mais longo e menos largo, conforme já referenciado em outros casos.

Um estudo baseado numa simulação numérica recorrendo a uma ferramenta comercial de Dinâmica de Fluidos Computacional permitiu obter dados interessantes relativamente ao comportamento de um spray e das propriedades que o afetam (Som, et al. 2010). São revelados mecanismos que ocorrem no interior do injetor que indiciam o importante papel dos níveis de turbulência e cavitação que são menores quando se utiliza biodiesel correspondentes a uma menor pressão de vapor deste combustível. Também a velocidade de injeção, o coeficiente de descarga e o caudal mássico de

combustível são menores no caso do biodiesel devido à sua maior viscosidade. De acordo com os resultados encontrados, o biodiesel exibe pior atomização, correspondendo a um jacto com maior penetração, com tamanho médio de gotas também mais elevado, sendo a dispersão dessas gotas mais contida e realizada num ângulo mais apertado. Estes dados são de facto consistentes com a bibliografia experimental já referida. Também é revelada a importância das propriedades de vaporização, como o ponto superior de vaporização mais elevado no biodiesel, que pode ser mais significativo que a viscosidade, densidade e tensão superficial no comportamento do spray. São ainda sugeridas alterações nos injetores de modo a potenciar a utilização de biodiesel.

Num estudo experimental onde foi analisado o ponto ótimo de injeção quando se substitui gasóleo por biodiesel de óleo de colza (Kegl 2006, b), foi possível avaliar como diferentes instantes de ignição, obtidos pela utilização de biodiesel, introduzem diferenças ao nível das emissões e do comportamento do motor. De facto, o ajuste otimizado do ponto de injeção para o consumo de biodiesel num motor MAN de 6 cilindros com sistema de injeção direta tipo M, permitiu diminuir na generalidade as emissões de CO, HC, NOx e fumo. Efetivamente, o atraso na injeção em 4º de cambota (23º APMS com gasóleo para 19º APMS para Biodiesel), permitiu manter aceitáveis os níveis de performance do motor quando abastecido por biodiesel, diminuindo as emissões.

À semelhança do que foi referido anteriormente, torna-se imperioso concluir que a utilização de biodiesel em motores de combustão interna implica várias alterações no comportamento do sistema de injeção, na formação do spray de combustível, na mistura do combustível com o ar, no processo de vaporização do combustível, no instante de ignição, no processo de combustão, na libertação de energia e na geração de emissões. Todos estes processos implicam a interação e combinação de vários mecanismos cujos efeitos são algumas vezes cumulativos, outras vezes contraditórios, dependendo das condições de operação do motor e das propriedades dos combustíveis, não podendo ser atribuídos exclusivamente a uma única propriedade (Park, Yoon e Lee 2011). A acrescentar alguma complexidade a estes processos, terá de ser associada a forma como o controlo eletrónico, os sistemas *common-rail* e os processos de injeção múltipla interpretam estas alterações, introduzidas pela utilização de combustíveis com diferentes características. Existem já dados que permitem avaliar que a utilização das potencialidades dos sistemas atuais podem de facto permitir melhorar o desempenho de motores quando alimentados por biodiesel (Park, Yoon e Lee 2011). Também existe ainda a possibilidade de alterar as propriedades dos combustíveis, ajustando as condições de temperatura e pressão com que estes são fornecidos ao motor, como já referido por Som e restante equipa de investigação (Som, et al. 2010) (Barata 2008) e já testado com bons resultados utilizando um pré-aquecimento do biodiesel de jatropa (Rao 2011).

2.2.9 Combustão

O processo de combustão no interior de um motor de ignição por compressão é extremamente complexo. Trata-se de um processo tridimensional, transiente, sendo caracterizado por um meio bastante heterogéneo constituído por uma mistura de ar e combustível dominado por elevada turbulência (Heywood 1988). Dada a extrema complexidade do fenómeno da combustão, é muito difícil efetuar essa análise experimentalmente, pelo que uma das melhores ferramentas para fazer essa avaliação é recorrendo a métodos numéricos (Rakopoulos, et al. 1995), (Lapuerta, Armas e Hernández 1999), (Lapuerta, Armas e Bermúdez. 2000). É possível identificar estudos do fenómeno

da combustão envolvendo a utilização de combustíveis de origem vegetal (Wibulswas 1999). É importante destacar que o processo de combustão depende das características do combustível, do desenho da câmara de combustão e do sistema de injeção e das condições de funcionamento do motor (Heywood 1988).

A combustão num motor de ignição por compressão pode normalmente dividir-se em 3 fases. A primeira fase corresponde ao instante em que ainda não existe de facto combustão, decorre entre o momento em que se injetam as primeiras gotas de combustível que se evaporam e misturam com o ar até que ocorra a ignição, correspondendo este período ao designado atraso na ignição, dependendo do número de cetano e das temperaturas do ar e do combustível. A segunda fase decorre de seguida e está associada a um período em que o restante combustível que entretanto foi injetado está misturado no ar e permite a combustão rápida e mais violenta, e que apresenta um maior incremento da pressão e uma maior taxa de libertação de energia. Esta fase corresponde a um período designado por combustão de pré-mistura. A terceira e última fase, denominada por fase difusiva, compreende uma fase de combustão mais controlada, que depende essencialmente do caudal de combustível injetado que vai reagindo com o ar mais facilmente dada a presença de uma chama e de condições de elevada pressão e temperatura (Ferguson e Kirkpatrick 2001) (Rao 2011) (Knothe, Gerpen e Krahl 2004). É reportada em alguma bibliografia a distinção de uma 4ª fase que ocorre na parte final do processo de combustão sendo mais fraca e tardia, que corresponde à reação do combustível restante e à libertação de energia dos fumos e das zonas de mistura rica, ocorrendo já durante o processo de expansão (Heywood 1988) (Stone 1992).

As emissões e o desempenho num motor de combustão interna estão dependentes da forma como decorre o processo de combustão e da quantidade de combustível que é queimada em cada uma das fases. Essa definição depende não só do desenho do motor e do sistema de injeção, mas também é fortemente influenciada pelas características do combustível e da carga imposta ao motor. Ao *ralenti*, a maior parte do combustível é queimado na fase da pré-mistura, o aumento da carga implica sucessivos incrementos na quantidade de combustível, dilatando o tempo de injeção, o que irá aumentar o tempo da fase de difusão relativamente à fase de pré-mistura (Ferguson e Kirkpatrick 2001).

Num motor de ignição por compressão, o maior desafio é a obtenção rápida de uma mistura de combustível e ar de modo a que ocorra uma combustão completa no intervalo de tempo apropriado, num ponto de rotação próximo do ponto morto superior (Heywood 1988). A variação da carga do motor corresponde a um caudal de ar sempre constante, variando apenas a quantidade de combustível injetado. Deste modo o aumento da carga de um motor implica uma mistura cada vez menos pobre, devendo ser assinalado que, por motivos de controlo da emissão de fumos, a quantidade de ar deverá ser sempre superior pelo menos a 20% da quantidade de ar estequiométrica.

Face ao exposto anteriormente e atendendo à complexidade da análise da combustão nos motores diesel, não é fácil encontrar formas de analisar esse processo. Um modo utilizado para tentar obter respostas relativamente ao comportamento comparativo de biodiesel e gasóleo ao nível da combustão é a utilização de métodos numéricos apoiados em dados experimentais (Canakci 2007). É deste modo possível constatar que é na alteração da fase de atraso da ignição que se centram as principais diferenças ao nível da combustão, essencialmente devido ao maior índice de cetano do biodiesel, o que depois tem implicações no restante processo de combustão.

De modo a verificar como é que a utilização de biodiesel afeta a combustão, existem estudos que avaliam a combustão em ambiente aberto comparando, nas mesmas condições, a temperatura máxima de chama obtida com gasóleo e com biodiesel (Jha, Fernando e To 2008). Embora as condições deste estudo sejam distintas das que ocorrem no interior da câmara de combustão do motor, os resultados indiciam que, apesar do menor poder calorífico do biodiesel, é o teor em oxigénio e o grau de saturação do combustível que promovem um aumento da temperatura de chama. Esta poderá ser a explicação para o aumento de emissões de NOx associado à utilização de biodiesel, que mesmo com menor energia disponível consegue promover uma maior libertação de energia devido ao conteúdo em oxigénio. A presença de moléculas saturadas e com maiores cadeias conduzem a temperaturas de chama mais baixas, o que é importante na avaliação de diferentes fontes para produção de biodiesel.

A utilização de um modelo de combustão permitiu avaliar comparativamente a combustão de gasóleo e de biodiesel de colza (Golovitchev e Yang 2009). Esta avaliação demonstra que teoricamente é possível efetuar a combustão de biodiesel de colza com menores emissões simultâneas de NOx e fumos do que quando se utiliza gasóleo, se forem utilizadas quantidades moderadas de recirculação de gases de escape (EGR).

Experimentalmente, podem ser medidos alguns parâmetros que dão algumas indicações sobre o modo como se processa a combustão no interior do motor. O caso mais utilizado é o da medição da pressão, que permite determinar o pico máximo de pressão e a taxa de libertação de calor (*heat release rate*) e ainda o instante onde ocorre a ignição, o que conseqüentemente possibilita a determinação do atraso na inflamação. Este processo, embora seja muito limitado em termos das variáveis controladas, permite ainda assim efetuar uma análise comparativa interessante para avaliar dois ou mais combustíveis com propriedades distintas. Partindo deste método e utilizando 3 tipos diferentes de biodiesel (Jatrofa, Karanja e Polanga) em misturas com gasóleo em diferentes proporções (20, 50 e 100% de biodiesel) (Sahoo e Das 2009), foi possível identificar a tendência consistente para a ocorrência de picos de pressão superiores quando se utiliza biodiesel (4 a 6%) e que esta tendência decrescia com o teor em biodiesel e com a diminuição da carga do motor. Também os atrasos na ignição são menores para os 3 tipos de biodiesel e também estes diminuem com o aumento da quantidade de biodiesel incorporada no gasóleo. Uma explicação encontrada para o menor atraso na ignição prende-se com a estrutura molecular do biodiesel que no processo de injeção num ambiente com uma temperatura elevada conduzirá à quebra dessas moléculas potenciando a formação de gases com menor peso molecular. A rápida gasificação destes compostos mais leves permite uma ignição mais rápida reduzindo o atraso na ignição.

A utilização de uma técnica numérica para simular o perfil de temperaturas no pistão de um motor Diesel, considerando operações a diversas cargas e várias misturas de biodiesel em gasóleo, conduziu à evidência de que, para o mesmo regime de funcionamento do motor, não se verificam quaisquer alterações na temperatura e pressão da câmara de combustão, nem no perfil transiente ou estacionário da temperatura do pistão (Colaço, Teixeira e Dutra 2010). Este facto implica que o menor poder calorífico do biodiesel será compensado pelo maior consumo de combustível, o que nem sempre ocorre experimentalmente.

Através da análise experimental de biodiesel de algodão, óleo vegetal da mesma fonte e gasóleo, todos utilizados na forma pura, foi possível avaliar o modo como a combustão dos três diferentes combustíveis ocorria quando fornecidos a um motor de ignição por compressão, monocilíndrico de

injeção direta Ricardo-Hydra (C. Rakopoulos, D. Rakopoulos, et al. 2010). Os resultados obtidos permitem concluir que o atraso na ignição é pouco afetado pela utilização dos vários combustíveis considerando um regime de funcionamento a uma rotação fixa (2000rpm) e a dois tipos de carga (média e alta). A utilização de biodiesel implica um ligeiro aumento da pressão máxima na câmara de combustão e a relação de pressões é também ligeiramente mais alta para este combustível. A temperatura do cilindro é de facto inicialmente mais elevada mas diminui na parte final do processo. A utilização de biodiesel provoca uma combustão um pouco mais pobre.

2.2.10 Utilização de biodiesel e avaliação de ciclo de vida

A utilização de biodiesel em veículos tem de ser considerada não apenas ao nível da sua utilização direta mas também integrando os aspetos que estão numa fase prévia a essa utilização como sejam o cultivo das matérias-primas, o transporte desses produtos para a refinaria e à produção propriamente dita. Na verdade, quando se diz que a utilização de biodiesel pode ajudar na redução das emissões de gases com efeito de estufa, nomeadamente do dióxido de carbono (CO₂), esta situação só pode ser entendida quando é feita numa abordagem global a todo o ciclo de utilização de biodiesel como combustível. Desde a fase agrícola de plantação e crescimento da planta que dá origem ao óleo, onde a planta capta CO₂ para o seu crescimento, até à fase de combustão no interior do motor, onde liberta uma quantidade de CO₂ muito semelhante à que seria libertada se fosse utilizado gasóleo, existem emissões diretas e indiretas de CO₂ que têm de ser contabilizadas. As emissões de CO₂ do biodiesel podem representar reduções entre 36 a 83%, quando comparadas com as emissões equivalentes utilizando gasóleo (Ryan, Convery e Ferreira 2006). Um outro estudo apresenta valores de redução entre 41 e 78% (Frondel e Peters 2007), parecendo claro que, independentemente da fonte e do método de determinação das emissões globais de CO₂, existirá de facto uma diminuição significativa destas emissões.

Conforme revelado por Malça e Freire (Malça e Freire 2010)(Malça e Freire 2011) existem vários parâmetros que afetam a avaliação de ciclo de vida da utilização do biodiesel, verificando-se uma grande variabilidade de resultados. Realça-se a importância de avaliar a incerteza desses resultados, destacando-se que a incerteza associada aos cenários utilizados é mais significativa na determinação da eficiência energética, embora no cálculo das emissões de gases com efeito de estufa, seja mais relevante a análise de incertezas associadas aos vários parâmetros intervenientes no processo de obtenção do biodiesel, com especial incidência no tratamento de coprodutos e nos modelos de uso da terra. É ainda destacada a importância da utilização de cenários que permitam avaliar o ciclo de vida numa vertente poço-roda, embora a grande maioria dos estudos existentes se focalizem numa análise mais restrita poço-tanque, não incluindo as diferentes interações associadas à utilização dos combustíveis nos veículos.

No processo produtivo e na utilização de biodiesel, desconsiderando a absorção de CO₂ da atmosfera no processo de crescimento da planta, a parte dominante das emissões de CO₂ corresponde ao processo de combustão nos motores, tal como acontece no caso do gasóleo. Tomando por exemplo a utilização de biodiesel de soja em autocarros (Sheehan, et al. 1998), a combustão produz 84,43% das emissões de CO₂, as restantes estão associadas ao processo agrícola, processamento da soja até à obtenção do óleo e respetiva transesterificação. Considerando a utilização nas mesmas circunstâncias de gasóleo, 9,6% das emissões de CO₂ correspondem ao processo de refinação,

enquanto 86,54% das emissões totais são responsabilidade do processo de combustão, saindo pelo escape.

É defendido por vários investigadores que a utilização de misturas contendo uma dada percentagem de biodiesel em gasóleo implicará uma redução percentual nas emissões de CO₂, correspondente ao teor de biodiesel incorporado. Por exemplo se a utilização de biodiesel (B100) se traduzir numa redução global em 78% numa análise de ciclo de vida relativamente ao gasóleo, a incorporação de 20% de biodiesel em gasóleo (B20) implicaria uma redução de apenas 15,6% (Tyson e McCormick 2006).

A utilização de um indicador de eficiência ecológica (Coronado, et al. 2009) que avalia o impacto ambiental causado pela globalidade das emissões de um motor de combustão interna por cada quilograma de combustível utilizado, permite comparar de modo efetivo a utilização de vários combustíveis. Neste trabalho, considerando uma eficiência térmica de 30% no motor, foi possível encontrar uma eficiência ecológica de 86,75% para o biodiesel (B100), 78,79% para B20 e 77,34% para o gasóleo.

Os resultados existentes não são contudo consensuais, para diferentes proporções de biodiesel são apresentados resultados discordantes ao nível das emissões (Pinto, et al. 2005). Também dependendo do histórico relativo à obtenção do biodiesel até à utilização deste no motor, pode haver implicações negativas ao nível das emissões de gases com efeito de estufa (Reijnders 2011).

Para além disto ainda existem outros fatores económicos, sociais e ambientais que devem ser considerados. Alguns desses impactos serão positivos, como a redução da dependência energética dos países importadores de petróleo, a criação de emprego nomeadamente no sector primário e em zonas rurais, a utilização de terrenos agrícolas desaproveitados, entre outros. Mas existirão outros impactos com consequências menos vantajosas, como a destruição de floresta para plantação de culturas energéticas, a utilização intensiva de fertilizantes e pesticidas que podem contaminar fontes de água potável (Franke e Reinhardt 1998), a utilização intensiva de terrenos com culturas que provoquem alterações nos ecossistemas e a interação das culturas energéticas com a cadeia alimentar mundial. Todos estes aspetos devem ser considerados quando é feita uma abordagem sobre a utilização de biodiesel e apenas com medidas que garantam a sustentabilidade de todo o processo, será possível que este recurso possa trazer vantagens relativamente ao gasóleo.

De facto, o recurso a combustíveis alternativos obtidos a partir de fontes de energia renovável só pode ser visto como passível de sucesso se acompanhado de aumento da eficiência energética, com o desenvolvimento de tecnologias sustentáveis, evitando erros do passado. No caso do biodiesel, a utilização indiscriminada de tecnologias e recursos, pode implicar níveis de emissões de CO₂ superiores às que existiriam se fosse consumido gasóleo (Earley e Mckeown 2009).

A possibilidade de diminuição da taxa de crescimento da população mundial e a eficiência dos processos de produção agrícola permitem esperar pela disponibilização de terrenos férteis que podem ser aproveitados para a plantação sustentável de culturas energéticas, bem como a utilização de processos de aproveitamento dos resíduos lenhosos para produção dos chamados biocombustíveis avançados, abrem uma perspetiva real sobre a sua utilização sustentada com evidentes benefícios ambientais e económicos (Bartle e Abadi 2010).

2.3 Análise conclusiva sobre o desempenho, emissões e consumo de biodiesel comparativamente ao gasóleo

2.3.1 Introdução

Atendendo ao interesse científico dado nos últimos anos ao tema da utilização de biodiesel em motores, foram publicados alguns trabalhos de revisão sobre esta temática, versando sobre a influência deste combustível nas emissões, consumo e desempenho dos motores.

Dos trabalhos publicados que efetuam de algum modo uma análise sumária sobre a utilização de biodiesel em motores de ignição por compressão salienta-se o trabalho de Graboski e McCormick (Graboski e McCormick 1998), sendo bastante referenciado, apresentando talvez o título de um dos artigos mais citados pelos autores que têm desenvolvido trabalho nesta área da ciência.

Nos últimos anos têm surgido vários trabalhos de revisão que tratam das temáticas mais sensíveis sobre a utilização de biodiesel, estabelecendo um estado da arte relativamente à evolução do conhecimento nesta área, verificando-se um registo médio anual de uma a duas publicações deste género desde 2007 até 2011 (A. K. Aggarwal 2007); (Szybist, Song, et al. 2007); (Lapuerta, Armas e Rodriguez-Fernández 2008 a); (Yanowitz e McCormick 2009); (Ng, Ng e Gan 2010) (Sun, Caton e Jacobs 2010); (Xue, Grift e Hansen 2011); (Pelkmans, et al. 2011). Aquilo que nesta secção do presente trabalho se pretende efetuar é uma comparação crítica sobre as conclusões e problemas detetados pelos vários autores, traçando de algum modo as pistas para o trabalho experimental que se pretende realizar e definindo expectativas sobre os resultados a obter.

2.3.2 Emissões de monóxido de carbono (CO)

O Monóxido de Carbono (CO) é um gás inodoro e incolor, com uma densidade cerca de 3% inferior à do ar. É extremamente tóxico para todos os animais de sangue quente e para outras formas de vida. Quando inalado combina-se com a hemoglobina evitando a absorção de oxigénio, promovendo asfixia (Atkins 2009).

Uma quantidade de 0,25% em volume no ar pode provocar a morte em apenas 30 minutos. Os primeiros sintomas são náuseas, cefaleias e sensação de fadiga, o passo seguinte pode ser a perda de consciência e a morte. Um veículo a funcionar ao *ralenti* num espaço fechado pode em poucos minutos emitir teores de CO suficientes para causar a morte (Atkins 2009).

Este gás é formado pela reação de combustão incompleta, que tendencialmente formaria CO₂. As razões que motivam a sua formação têm a ver com a falta de oxigénio, ou com a falta de tempo para que se conclua a reação de combustão, o que na prática ocorre devido a misturas ricas e/ou rotações elevadas do motor. De facto, o parâmetro que mais condiciona a existência de moléculas de monóxido de carbono nas emissões de gases de escape de um veículo é a relação ar/combustível (Heywood 1988). Em misturas ricas haverá maior dificuldade em encontrar oxigénio para oxidar os átomos de carbono, pelo que se torna evidente a emissão de elevados níveis de CO (J. Martins 2006). Com misturas pobres a produção de CO é bastante baixa, não variando significativamente com a alteração da relação ar/combustível, apresentando sempre valores de fração molar da ordem de 10⁻³

nos gases de escape. A ocorrência de maiores emissões de CO em misturas pobres pode ocorrer na combustão de pré-mistura por dissociação do CO₂, ou na combustão por difusão devido à lentidão da combustão, que promove uma oxidação parcial ou pela existência de zonas localizadas de mistura rica, principalmente quando os tempos de residência na câmara de combustão são muito curtos, impedindo que a combustão seja completa, mesmo na presença de oxigênio em excesso (Coelho e Costa 2007).

Considerando que os motores de ignição por compressão operam sempre com misturas bastante pobres, esta não é uma preocupação maior neste tipo de motores, apenas deverá ser avaliada quando os motores operam a cargas baixas. Este efeito é associado ao facto de a injeção de combustível não potenciar de forma adequada a mistura com o ar e apesar de haver excesso de ar, as reações de combustão não se completam, o que ainda é reforçado pela ocorrência de temperaturas mais baixas que também não favorecem a reação do CO com O₂ para formar CO₂ (Borman e Ragland 1998). Na realidade, esta reação é bastante sensível à temperatura e à pressão, de tal modo que a abertura da válvula de escape é suficiente para impedir a continuidade desta reação, não havendo mais alterações nas concentrações do CO nos gases de escape após esse momento (Heywood 1988).

Os motores de ignição por compressão não têm como aspeto crítico as emissões de CO, contudo a utilização de combustíveis oxigenados como é o caso do biodiesel produz grandes reduções nas emissões desta substância (Graboski e McCormick 1998). Este efeito é justificado pela existência de oxigênio do combustível o que promove a existência de reações de combustão mais completas, diminuindo as emissões de CO em cerca de 30%, dependendo do tipo e idade do motor, das condições atmosféricas e do sistema de controlo de emissões utilizado (A. K. Aggarwal 2007).

A maioria dos investigadores refere efetivamente a ocorrência de uma redução nas emissões de CO quando é utilizado biodiesel, conforme é possível de comprovar da análise constante no anexo I, sendo também notório que alguns, embora poucos, referem efeitos nulos ou mesmo de crescimento. Estas diminuições podem ser bastante ligeiras ou atingir 50%, sendo ainda reportadas reduções que podem atingir os 94% (Raheman e Phadatare 2004).

Os efeitos diversos verificados podem ter explicação pelos diversos tipos de biodiesel utilizado, mas serão fundamentalmente justificados pelas diferenças ao nível das especificações de ensaio. Efetivamente, em cargas baixas ou parciais, a relação ar/combustível é mais elevada, a existência extra de oxigênio no combustível não apresenta grande vantagem na oxidação do CO e no sentido de promover uma combustão mais completa (Ng, Ng e Gan 2010).

Para além da existência de oxigênio no combustível, outra razão apontada para o efeito de redução nas emissões de CO com a utilização de biodiesel é o mais elevado número de cetano, uma vez que este permite um avanço da inflamação da mistura diminuindo a possibilidade de existência de zonas de mistura rica (Xue, Grift e Hansen 2011). Uma vez que o número de cetano depende do grau de saturação do biodiesel, também as emissões de CO ficam dependentes deste parâmetro associado à origem do biodiesel. Atendendo a esta situação, as emissões de CO são mais notoriamente reduzidas quando provenientes da combustão de biodiesel com maior grau de compostos saturados (Lapuerta, Armas e Rodriguez-Fernández 2008 a).

2.3.3 Emissões de hidrocarbonetos (HC)

Os hidrocarbonetos (HC) abrangem uma grande quantidade de compostos orgânicos que podem ser encontrados nas emissões de gases de escape de motores de combustão interna. A origem destes compostos está normalmente associada a um fenómeno de combustão incompleta, à semelhança do que sucede com o monóxido de carbono. Deste modo, o combustível não queimado ou parcialmente queimado constitui em grande parte os chamados hidrocarbonetos. Para além destes HC provenientes diretamente de deficiências do processo de combustão, existe ainda uma percentagem que está associada ao óleo lubrificante, que pode aceder à câmara de combustão pelas paredes do cilindro, especialmente quando se verifica alguma deficiência ao nível do desempenho dos segmentos do motor (J. Martins 2006).

De entre as emissões de HC é possível identificar os compostos de cadeia linear saturados (alcanos) ou insaturados (alcenos e alcinos), bem como uma série de compostos aromáticos, grande parte deles caracterizados por terem uma ou várias cadeias cíclicas. Os compostos de cadeia linear que sofreram uma oxidação apenas parcial, apresentam o problema ambiental da toxicidade associada ao derramamento para a atmosfera de um combustível, com impactos também para o efeito de estufa, salientando-se o acetileno e o etileno, de entre outros, como moléculas comuns de combustível do metano ao hexano ou octano. Acresce ainda o problema da emissão de outro tipo de HC, os chamados hidrocarbonetos aromáticos, como o benzeno, o tolueno, os aldeídos e as cetonas entre outros, que têm impacto direto sobre a saúde humana, uma vez que para além de terem um odor característico normalmente desagradável, provocam irritação, problemas respiratórios e alguns apresentam ainda efeitos carcinogénicos (Dietsche e Klingebiel 2007).

As emissões de HC em motores de ignição por compressão são mais notórias em regimes de funcionamento do motor correspondentes a cargas reduzidas ou ao ralenti. Uma das possíveis causas para elevados níveis de emissão de hidrocarbonetos é também em situações de aumento local da riqueza da mistura, como acontece por exemplo na ponta do injetor de combustível (Heywood 1988). Em resumo, as características de injeção de combustível e da mistura do combustível no ar são parâmetros essenciais na formação de HC, dada a contribuição destes efeitos para a ocorrência de pirólise e oxidação parcial do combustível (Turns 1996), surgindo também a desabsorção de combustível pelo óleo e fuga de mistura pela válvula de escape como outras possíveis fontes de HC não ligadas diretamente ao processo de combustão (Ng, Ng e Gan 2010) (J. Martins 2006).

De acordo com a análise de grande parte dos autores, a utilização de biodiesel promove uma redução significativa das emissões de HC, embora se verifiquem também alguns resultados de outros autores que conduzem a algum aumento ou inexistência de alterações significativas a este nível (Sharp, Howel e Jobe 2000 a) (Lapuerta, Armas e Rodriguez-Fernández 2008 a) (Xue, Grift e Hansen 2011).

Aquilo que é apontado como potenciador da redução da emissão de HC devido à utilização de biodiesel está relacionado com o efeito combinado da existência de oxigénio no combustível e do número de cetano. O avanço da injeção na combustão favorece esta redução (Lapuerta, Armas e Rodriguez-Fernández 2008 a) (Xue, Grift e Hansen 2011). Embora o biodiesel seja menos volátil que o gasóleo, a temperatura final de destilação do gasóleo é ligeiramente superior, o que pode representar um argumento válido para justificar a maior emissão de HC quando se utiliza gasóleo,

devido à maior dificuldade em vaporizar os compostos mais pesados (Lapuerta, Armas e Rodriguez-Fernández 2008 a).

A influência da quantidade de biodiesel misturada no gasóleo sobre as emissões de HC é um fator que divide os vários investigadores. Se, por um lado, existem vários registos que referem uma influência aproximadamente proporcional, também vários autores referem um outro comportamento (Luján, et al. 2009) (Kegl 2007) (Sahoo, Das e Babu, et al. 2009). Alguma discussão surge também relativamente ao efeito do tipo de álcool que originará um éster metílico ou etílico o que, para alguns, não terá efeito nas emissões, mas para outros será um fator com influência (Xue, Grift e Hansen 2011).

Algumas das divergências apontadas estarão certamente associadas ao tipo de ensaio utilizado. A variação das emissões de HC com o regime de funcionamento do motor e com o tipo de combustível utilizado é uma certeza apontada por vários autores (Ng, Ng e Gan 2010) (Xue, Grift e Hansen 2011). Para citar um exemplo em concreto sobre as diferenças verificadas, pode-se referenciar o estudo de Fontaras et al (Fontaras, Karavalakis, et al. 2009), onde a utilização de biodiesel afetou negativamente as emissões de HC, quando os veículos foram sujeitos a vários ciclos de ensaio segundo a regulamentação europeia. Contudo, quando foi testado B100 utilizando o ciclo europeu (NEDC), verificou-se um aumento de 58% neste tipo de emissões. Esta situação ilustra bem o efeito cumulativo de diferentes quantidades de biodiesel e diferentes regimes de funcionamento do motor sobre os resultados às vezes não concordantes nas emissões de HC. Outra situação que pode conduzir a divergências nos resultados é a metodologia de ensaio, uma vez que os hidrocarbonetos após saírem da câmara de combustão, continuam a reagir e a condensar, pelo que o método de recolha e análise dos gases é um parâmetro bastante influente nos resultados obtidos. Esta influência torna-se ainda mais significativa quando se utiliza biodiesel, uma vez que os tipos de analisadores de gás utilizados convencionalmente para medir HC, os chamados FID (*flame ionization detectors*), podem apresentar uma menor sensibilidade na deteção de compostos oxigenados, que são mais frequentes nas emissões de combustíveis oxigenados como o biodiesel (Lapuerta, Armas e Rodriguez-Fernández 2008 a).

2.3.4 Emissões de fumos

Aquilo que normalmente é designado por fumo pode em rigor ser cientificamente reconhecido como partículas ou fuligem, embora o termo partículas seja o mais abrangente e por isso mais correto. A esmagadora maioria destas partículas é gerada pela combustão incompleta, embora uma das possíveis fontes possa também ser o óleo lubrificante (Heywood 1988). Estas partículas no estado sólido onde se dissolvem muitos hidrocarbonetos surgem dispersas nos restantes gases de escape, apresentando tamanhos muito variados mas bastante diminutos, com dimensões típicas entre 0,02 e 0,12µm (J. Martins 2006).

As partículas são extremamente pequenas, sendo esta uma das principais razões do impacto tão severo destes elementos para a saúde humana, uma vez que são facilmente respiráveis. A emissão de partículas está associada ao aumento do risco de existência de tumores, e da ocorrência de doenças cardíacas e respiratórias (Atkins 2009). Apesar de os tamanhos normais estarem compreendidos na gama referida, cada vez mais têm sido avaliadas as emissões de partículas com menores dimensões, atendendo ao desenvolvimento tecnológico dos sistemas de medição de

partículas que permitem esse tipo de análise. De facto existem já algumas referências de estudos sobre as partículas sub-micro, com diâmetros médios inferiores a $0,1\mu\text{m}$ (Chen e Wu 2002).

As partículas podem surgir aglomeradas ou como combinações com outros elementos orgânicos ou inorgânicos nos gases de escape, reconhecendo-se 3 grandes frações distintas:

- Elementos sólidos: aglomerados de carbono secos, normalmente identificados como fuligem.
- SOF (*Soluble Organic Fraction*) – Hidrocarbonetos pesados absorvidos ou condensados pelas partículas de carbono.
- SO_4 – Fração de sulfatos – Ácido sulfúrico hidratado.

A composição parcial do material particulado (designação reconhecida pela *Environmental Protection Agency* – EPA) varia muito em função do tipo de motor, bem como das condições de carga e da rotação. Partículas húmidas podem conter até 60% de SOF, enquanto partículas secas são constituídas maioritariamente por carbono seco. A quantidade de sulfatos está diretamente associada à quantidade de enxofre presente no combustível utilizado (Atkins 2009).

A fuligem está muito associada a chamas de difusão, daí a sua grande associação aos motores de ignição por compressão. A formação destes compostos constituídos essencialmente por carbono ocorre nas zonas ricas da chama, onde se registam elevadas temperaturas e escassez de oxigénio (Coelho e Costa 2007).

Em geral é reportada uma diminuição significativa das emissões de partículas devido à utilização de biodiesel (Lapuerta, Armas e Rodriguez-Fernández 2008 a) (A. K. Aggarwal 2007) (Xue, Grift e Hansen 2011). Esta análise é sustentada em grande medida pela existência de oxigénio no biodiesel o que promove uma combustão menos rica nas zonas onde ela poderá ocorrer, minimizando significativamente a formação de partículas. Também são apontados outros efeitos embora com um impacto menos significativo, como o número de cetano e o menor conteúdo em hidrocarbonetos aromáticos e enxofre que são percursos da formação destas partículas (Lapuerta, Armas e Rodriguez-Fernández 2008 a).

À semelhança de outros poluentes, também o efeito da utilização de biodiesel nas emissões de partículas não conduz a conclusões completamente consensuais. Na realidade, é possível detetar aumento das emissões de partículas com a utilização de biodiesel face ao gasóleo. Este aumento pode ser justificado pela demasiado elevada viscosidade do biodiesel ou por problemas no funcionamento do injetor quando abastecido com biodiesel (Ng, Ng e Gan 2010).

Uma das razões que pode sustentar também algumas divergências nos resultados obtidos relativamente ao efeito sobre as emissões de partículas da utilização de biodiesel está associada ao processo de medição. Para medir as emissões de partículas podem utilizar-se opacímetros, filtros de recolha de partículas com análise gravimétrica ou visual e ainda analisadores dedicados com sistemas de filtros que retêm as partículas por tamanhos. Como se pode confirmar em função do tipo de equipamento utilizado, revelar-se-ão resultados distintos. Para além de este parâmetro ser extremamente difícil de quantificar, a utilização de métodos diferenciados conduz a divergências nos resultados. A utilização de opacímetros, onde apenas é medida a obstrução provocada pelos gases de escape a um feixe luminoso dá uma indicação que pode ser não correlacionável com a existência de partículas dispersas nessa amostra de gases (Graboski e McCormick 1998). De qualquer modo, também quando é referida a opacidade, em grande parte dos estudos é apontada uma significativa redução pela utilização de biodiesel.

Em termos de condições de funcionamento, quase que existe unanimidade entre vários autores de que o aumento da carga e da rotação permite aumentar o efeito benéfico do biodiesel sobre as emissões de partículas (Xue, Grift e Hansen 2011).

2.3.5 Emissões de óxidos de azoto (NOx)

Os óxidos de azoto (NOx) são produzidos a partir da reação dos produtos da dissociação do azoto do ar com o oxigénio. As principais características deste gás são a rápida dissolução na água, formando ácidos nítricos e nitrosos que causam as chuvas ácidas, o efeito de diminuição da camada de ozono e contribuem para o aquecimento global, uma vez que são gases que provocam efeito de estufa e *smog* (Atkins 2009).

A constituição dos NOx é maioritariamente feita de monóxido de azoto (NO), contudo também se forma uma pequena quantidade de dióxido de azoto (NO₂) que é irritante e extremamente tóxico. Com o tempo, o monóxido de azoto tem tendência para ser oxidado, formando dióxido de azoto (Dietsche e Klingebiel 2007). Uma das formas preferenciais deste mecanismo é o recurso ao ozono (O₃) existente na estratosfera para a oxidação do NO e conseqüente formação do NO₂, destruindo esta camada protetora da Terra relativamente aos raios ultravioleta do Sol (Turns 1996).

Nos motores de ignição por compressão, quando o combustível utilizado não contém azoto, é possível distinguir três tipos de mecanismos percussores da formação de NOx (Coelho e Costa 2007):

- Mecanismo térmico (Zeldovich);
- Mecanismo imediato (Fenimore);
- Mecanismo com N₂O como intermédio.

Como o próprio nome indica, o mecanismo térmico está bastante associado à existência de elevadas temperaturas na combustão, normalmente acima de 1800K. Para além desta dependência forte da temperatura, nas chamas de difusão turbulentas, o tempo de permanência a essas temperaturas elevadas e a concentração local de O₂ são também fatores relevantes para o processo de formação de NO. Este é o processo com maior relevância na formação de NOx em motores de combustão interna.

A formação de NOx devido ao mecanismo imediato envolve a reação do azoto molecular (N₂) com os radicais dos hidrocarbonetos, promovendo a formação de compostos que conduzem ao aparecimento de NO nos gases de escape.

A terceira possibilidade de formação de NOx resulta da associação de um átomo de oxigénio à molécula de azoto, recorrendo a um outro elemento que normalmente será o carbono ou um hidrocarboneto. O N₂O na presença de hidrogénio e oxigénio dissocia-se formando NO.

Uma das formas mais comuns na atual tecnologia automóvel para reduzir as emissões de NOx é o recurso à reintrodução de gases de escape na admissão (EGR), promovendo deste modo a redução da temperatura de combustão (Heywood 1988). Este processo tem porém o inconveniente de aumentar ligeiramente as emissões de partículas. Este aliás é um processo recorrente, quando se procura reduzir as emissões de partículas promove-se o aumento das emissões de NOx e vice-versa.

Se relativamente às emissões de CO e HC, estas não são muito relevantes no estudo de motores de ignição por compressão por terem pouca expressão, e se relativamente às emissões de partículas, existe uma quase unanimidade de que a utilização de biodiesel promove uma redução mais ou menos acentuada, quando se discutem as emissões de NOx pela utilização de biodiesel em motores, a questão deixa de ser consensual e surge efetivamente aqui um dos aspetos fundamentais sobre as vantagens e desvantagens de substituir parte do gasóleo por biodiesel.

Num estudo realizado por McCormick et al. (McCormick, Graboski, et al. 2001) é apontado que a formação de NOx devido à utilização de BD não é diretamente influenciada pelo fenómeno de Zeldovich (princípio de formação térmico), mas antes por outros fatores como a estrutura molecular

do biodiesel. Estes resultados são confirmados mais tarde (McCormick, Alvarez, et al. 2002), concluindo que a diminuição das emissões de compostos aromáticos no biodiesel permite diminuir as emissões de NOx.

Como causas possíveis para a variação nas emissões de NOx devido à utilização de biodiesel apontadas por Graboski e McCormick (Graboski e McCormick 1998), podem referir-se o aumento da temperatura de chama, a diminuição do efeito radiativo que promove o aumento da temperatura na câmara de combustão, uma vez que a transferência de calor por radiação é realizada pelas partículas que, por terem emissões reduzidas devido ao biodiesel, diminuem essa capacidade de radiar calor, resultando em temperaturas mais elevadas e por consequência maiores emissões de NOx. As propriedades do spray de combustível, que dependem muito das propriedades desse combustível, afetam também significativamente os níveis de emissão de NOx. De entre várias características podem salientar-se o tamanho e quantidade de movimento da gota, a forma como se proporciona a mistura, o modo como o combustível penetra na câmara e a taxa de evaporação do combustível (Graboski e McCormick 1998).

Grande parte dos autores refere que o consumo de biodiesel em substituição de gasóleo induz um aumento nas emissões de NOx (Xue, Griff e Hansen 2011). Tal é comprovado pela presente análise onde, dos artigos referenciados no anexo I, 47 assinalam precisamente o aumento deste tipo de poluente pela utilização de biodiesel, verificando-se ainda que 11 referem que não há alterações e 16 mencionam uma diminuição. Verifica-se ainda que em 17 publicações são referidos efeitos distintos ao nível das emissões de NOx. Esta situação justifica-se pela diversidade de parâmetros que afetam este tipo de emissões e que estão associadas a diferentes propriedades dos combustíveis gasóleo e biodiesel.

A avaliação mais direta sobre estes 17 trabalhos que assinalam diferentes oscilações positivas, negativas ou neutras relativamente às emissões de NOx permite diferenciar as origens dessas oscilações. Confirma-se assim que as propriedades do biodiesel introduzem efetivamente alterações no processo de combustão que se traduzem por alterações ao nível da atomização, da mistura do instante de injeção e ignição e da taxa de libertação de calor, originando diferentes resultados nas emissões de NOx produzidas (Ali, Eskridge e Hanna 1995) (Ali, Hanna e Leviticus 1995) (McCormick, Ross e Graboski 1997) (Schimdt e Gerpen 1996) (McCormick, Tennant, et al. 2005). Também é possível encontrar justificações nas diferenças de resultados nas emissões de NOx relativas ao tipo de motor, especificamente no que concerne ao sistema de injeção, sobrealimentação e EGR (Wang, et al. 2000) (Nabi, Akter e Shahadat 2006) (Hribernik e Kegl 2007) (Senatore, et al. 2008) (Karra, Veltman e Kong 2008) (Muncrief, et al. 2008) (Yehliu, Boehman e Armas 2010). Outro aspeto fundamental que está na génese das diferenças assinaladas é o tipo de regime imposto ao motor e que origina os valores de emissões referenciados. Na realidade, o mesmo motor a utilizar o mesmo tipo de combustíveis potencia reduções e/ou aumentos das emissões de NOx em função da carga imposta e da velocidade de rotação exigida (Ali, Eskridge e Hanna 1995) (Ali, Hanna e Leviticus 1995) (Wang, et al. 2000) (Senda, et al. 2004) (Hribernik e Kegl 2007) (Zhang e Boehman 2007) (Agudelo, Benjumea e Villegas 2010) (Kousoulidou, et al. 2010) (Panwar, et al. 2010) (Wang, et al. 2011). Na continuidade desta análise é imperioso concordar com Yanowitz e McCormick (Yanowitz e McCormick 2009), pois quando se faz a média nas emissões de NOx mascara-se a complexa variabilidade que ocorre relativamente às emissões destes compostos quando se abastece o motor com biodiesel. Segundo estes autores existem duas possíveis razões que explicam as situações de aumento das emissões de NOx, as que estão associadas ao avanço à ignição que conduzem a um aumento da temperatura no cilindro e as que estão associadas às propriedades do biodiesel que

conduzem a um processo de combustão com temperaturas de chama mais elevadas. É contudo reforçado que se trata de possibilidades pois a causa ou as causas deste aumento permanecem uma questão em aberto.

Num estudo anterior (Lapuerta, Armas e Rodriguez-Fernández 2008 a), as hipóteses das propriedades do biodiesel e do avanço à ignição foram também colocadas, sendo ainda complementadas pela diminuição de partículas promovidas pelo biodiesel, o que reduz a capacidade de radiar calor implicando a ocorrência de maiores temperaturas de chama no cilindro. Ainda é referida outra possibilidade que fomenta o aumento das emissões de NO_x e que está relacionada com a existência de oxigénio no combustível. A influência do oxigénio nas emissões de NO_x é reforçada por outros estudos (Xue, Grift e Hansen 2011), sendo também reconhecido o papel desempenhado pelas alterações de tempo e de forma no processo de injeção. Outra possibilidade comentada por vários investigadores é a influência nos resultados do tipo de compostos que constituem o biodiesel, nomeadamente o grau de saturação do biodiesel. É referido que quanto mais elevado o conteúdo em compostos insaturados no combustível, maior o índice de iodo e menores emissões de NO_x resultam da combustão (Xue, Grift e Hansen 2011). Por outro lado, ainda relativamente à composição molecular do biodiesel, o conteúdo em aromáticos é também assinalado como promotor da formação de NO_x (McCormick, Alvarez, et al. 2002). Através de uma interpolação dos resultados obtidos, é possível que o impacto da utilização de biodiesel (B20) com 25,8% de aromáticos corresponderá a emissões de NO_x equivalentes às resultantes da combustão de gasóleo com 31,9% de aromáticos (Yanowitz e McCormick 2009).

De todas as possibilidades enunciadas, é de facto necessário evidenciar qual ou quais as dominantes no processo de formação de NO_x, o que não foi ainda efetivamente definido. É necessário notar que os resultados advêm de vários tipos de testes realizados em motores diferentes sujeitos a diferentes tipos de ciclos de ensaios e utilizando diferentes tipos de combustível, quer gasóleo quer biodiesel. Atendendo a que as propriedades do combustível afetam as emissões, torna-se extremamente complicado estabelecer uma relação casuística entre estas propriedades e os efeitos nas emissões de NO_x, uma vez que, conforme já referido, o tipo de injeção do motor, a sobrealimentação e a recirculação de gases (EGR), a parametrização, entre outras, provocam também alterações nos níveis de emissões de NO_x. Acresce ainda que a realização de ensaios em laboratório revela valores de emissões de NO_x superiores aos registados nos mesmos motores com o mesmo tipo de combustível, mas realizando ensaios em estrada (Tat 2003).

Da análise do processo de combustão parece verificar-se que existe uma ligação inversa entre o consumo de energia e a emissão de NO_x, o que do ponto de vista da formação térmica do NO_x pode fazer algum sentido. Um processo com maior eficiência térmica necessitará de menos energia e por isso menos energia será libertada como calor o que reduzirá a formação de NO_x (Pelkmans, et al. 2011). A duração das fases de pré-mistura e de difusão são também aspetos relevantes no processo de formação de NO_x, até porque segundo a avaliação a este respeito realizada por Szybist et al. (Szybist, Song, et al. 2007), não é a temperatura máxima atingida ou a taxa de libertação de calor que induzem diferenças nos níveis de emissão de NO_x para gasóleo e biodiesel, mas o tempo de permanência dos produtos e reagentes a essa temperatura elevada. Tal é bastante condicionado pela duração de cada uma das fases e da taxa de libertação de calor em cada fase.

Dada a variedade de parâmetros que provocam diferentes efeitos sobre a formação de NO_x, apresenta-se na figura 2.5 um esquema que representa um resumo do efeito que os parâmetros considerados essenciais desempenham neste mecanismo, tendo por base os esquemas apresentados em outros dois trabalhos de investigação nesta área (Ng, Ng e Gan 2010) (Sun, Caton e Jacobs 2010).

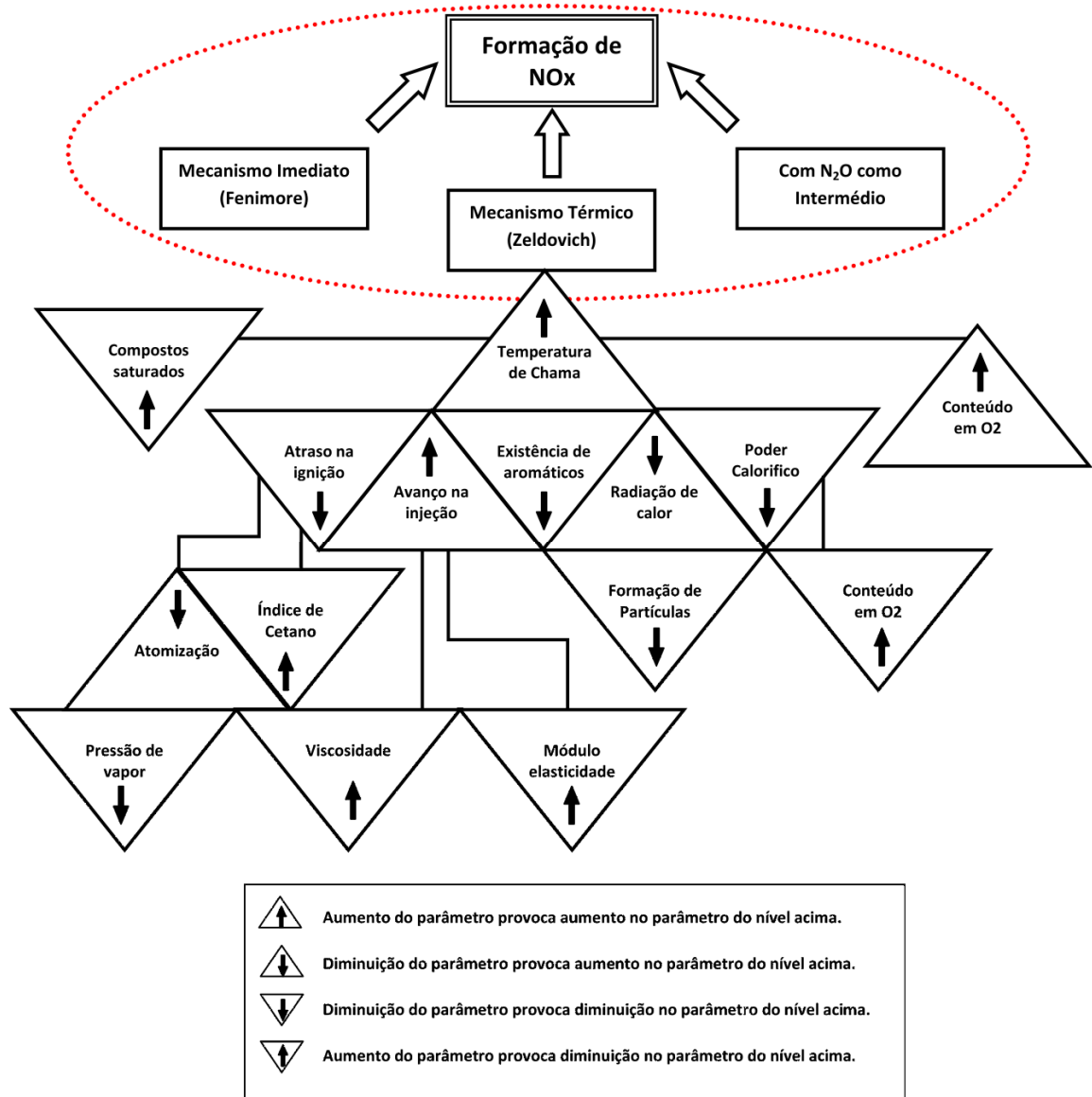


Fig. 2.5 – Mecanismo de formação do NOx em função dos vários parâmetros intervenientes

2.3.6 Consumo e desempenho do motor

Em primeira análise, atendendo à menor quantidade de energia disponível por unidade de massa de biodiesel comparativamente ao gasóleo, seria de esperar que o consumo de biodiesel aumentasse para fornecer a mesma quantidade de energia requerida pelo motor. Contudo, existem várias condicionantes que alteram este comportamento, tais como a maior densidade do biodiesel, uma vez que o fornecimento de combustível é feito numa base volúmica, a existência de oxigénio no biodiesel que pode afetar o rendimento térmico e outras propriedades como a viscosidade, o índice de cetano entre outras que afetam a forma como se dá a mistura do combustível no ar aquecido no interior do cilindro e que influenciam o modo como se dá a libertação de energia. Ainda há que

considerar o efeito cumulativo destes parâmetros com as diversas interações promovidas pela utilização de várias misturas de biodiesel no gasóleo.

Torna-se imperioso referir que uma boa parte dos trabalhos publicados que efetuam análises sobre o consumo, fazem um cálculo desse consumo baseado no balanço de carbono, não medindo em rigor essa variável. A utilização de um equipamento que permita efetuar diretamente essa monitorização será claramente um método mais preciso (Graboski e McCormick 1998).

Analisando o que é reportado pelos vários investigadores encontra-se com alguma frequência a associação entre o aumento do consumo de combustível e o menor poder calorífico do biodiesel (Xue, Grift e Hansen 2011). Em termos concretos, o poder calorífico em base mássica do biodiesel é 10 a 14% mais baixo que o do gasóleo (Lapuerta, Armas e Rodriguez-Fernández 2008 a), (A. K. Aggarwal 2007). Deste modo será expectável que o consumo de massa de combustível seja aumentado na mesma proporção. Contudo, conforme já referido, o abastecimento de combustível ao motor é feito em base volúmica, pelo que atendendo às diferenças de densidade, em que o biodiesel é mais denso entre 3 a 4% (A. K. Aggarwal 2007), seria de esperar que o consumo específico [g/kWh] aumentasse 10 a 14% e que o consumo volúmico [l/km] aumentasse entre 5 a 10%.

Efetivamente verifica-se uma grande maioria de autores a identificarem esse aumento de consumo quando se utiliza biodiesel. Na presente análise bibliográfica é possível identificar 36 trabalhos onde é indicado precisamente um aumento de consumo de combustível, quando esse combustível contém biodiesel. Apesar de haver notoriamente uma tendência, verifica-se também aqui alguma diversidade nos resultados, registando-se igualmente 11 trabalhos onde é reportada uma diminuição de consumo associada à utilização de biodiesel e ainda 13 situações em que se verifica que o consumo com gasóleo ou com biodiesel revela resultados similares. Claro que é necessário reportar que em todos estes trabalhos, o regime de funcionamento do motor, a fonte de matéria-prima do biodiesel e a quantidade de biodiesel incorporada são diversas e daí também a ocorrência de resultados díspares. Torna-se pois evidente que existirão outros fatores que contribuem para as variações verificadas ao nível do consumo para além do conteúdo energético do combustível, até porque mesmo nas situações em que se verifica um aumento do consumo de combustível, nem sempre ele apresenta a magnitude da diferença existente entre os poderes caloríficos dos combustíveis de origem vegetal e mineral.

Grabosky e McCormick (Graboski e McCormick 1998) referem explicitamente que independentemente do consumo de biodiesel ser na forma pura ou em mistura com gasóleo, é exibida uma economia de combustível proporcional à diferença do poder calorífico, não se registando melhoria ou degradação da eficiência energética. Na realidade a questão que se coloca é se a utilização de biodiesel promoverá ou não um aumento da eficiência energética. A alteração desta eficiência relativamente ao gasóleo pode ser justificada quando consideradas outras propriedades como a viscosidade e a densidade que promovem alterações no tipo e forma do spray e que afetam o modo como se dá a mistura do combustível no ar (Kousoulidou, et al. 2010) (Kegl e Pehan 2008), ou quando avaliado o impacto da existência de oxigénio na estrutura molecular com biodiesel que altera a forma como se processa a reação de combustão (Qi, Chen, et al. 2010) (Kousoulidou, et al. 2010) (Gumus e Kasifoglu 2010) (Ozsezen, Canakci e Sayin 2008) (Çetinkaya, et al. 2005) (Raheman e Ghadge 2007) (A. Demirbas 2007 a). É explicitamente referido por Demirbas (A. Demirbas 2007 a) que apesar do menor poder calorífico do biodiesel o conteúdo em oxigénio presente nesse combustível promove uma combustão mais completa devido à melhoria da homogeneidade na mistura local de combustível no ar.

Para além das características distintivas dos combustíveis, também as diferenças nos tipos de motor podem estar associadas às divergências de resultados verificados. Num estudo realizado por Sharp, Howel e Jobe (Sharp, Howel e Jobe 2000 a) em que 3 motores foram testados nas mesmas condições e com os mesmos combustíveis, gasóleo (B0) e B20, verificou-se que em 2 deles o consumo foi igual para os dois combustíveis mas aumentou 6% quando se utilizou B20 no outro motor. Também Nuszowski et al (Nuszowski, et al. 2008) testaram 2 motores diferentes com o mesmo procedimento e os resultados demonstraram que o consumo num deles aumentou com a utilização de biodiesel, mas no outro o consumo foi similar.

O regime do motor e a forma como se dá a interação do fluxo de combustível no processo de injeção para cada regime, faz sobressair diferenças de algum modo significativas relativamente à eficiência energética do processo de combustão para os diferentes combustíveis (Dorado, et al. 2003) (Senda, et al. 2004) (Frey e Kim 2004) (Usta 2005) (Moon, et al. 2010) (Proc, et al. 2006) (Rakopoulos, Antonopoulos, et al. 2006 a) (Kegl 2007) (Fontaras, Karavalakis, et al. 2009) (Sahoo e Das 2009). Nas referências consultadas, existem 15 trabalhos onde é reportado um aumento da eficiência energética quando se utiliza biodiesel, 10 casos onde a utilização de biodiesel se traduz por uma diminuição dessa eficiência e 6 situações onde se considerou que as variações não seriam significativas e que as diferenças do consumo se deviam unicamente às diferenças entre os poderes caloríficos entre os combustíveis. Ainda relativamente ao regime de funcionamento do motor e ao modo como este se relaciona com a economia de combustível associada à utilização de diferentes combustíveis, há ainda que assinalar os resultados encontrados por vários autores, tendo registado diferentes valores quando testam veículos ou motores em laboratório e depois avaliam esses mesmos veículos em situações reais de circulação em estrada (Silva, Prata e Teixeira 2003) (Senda, et al. 2004) (Çetinkaya, et al. 2005) (Proc, et al. 2006) (Fontaras, Karavalakis, et al. 2009). Nos vários casos é reportado que, apesar de no laboratório se verificar um aumento de consumo com a introdução de biodiesel, nos estudos em estrada o consumo é muito semelhante. Senda et al. (Senda, et al. 2004) avaliaram ainda a diferença entre duas tipologias de circuitos diferentes, circuito urbano e em autoestrada. Na situação de circulação urbana o consumo foi o mesmo com os dois combustíveis testados, mas em autoestrada o consumo do combustível com biodiesel aumentou. Verificou-se que a estrutura rodoviária, as condições de tráfego e as operações realizadas em diferentes modos de condução afetam o consumo.

Uma outra variável que tem de ser considerada como potenciadora das diferenças entre os valores de consumo registados é a percentagem de biodiesel utilizado na mistura com gasóleo. São vários os estudos que revelam que existe uma interação de fatores que conduzem a que a eficiência térmica seja maximizada para misturas com 10 a 30% de biodiesel. Ng, Ng e Gan (Ng, Ng e Gan 2010) ilustram graficamente os dados revelados por Ali, Hanna e Leviticus (Ali, Hanna e Leviticus 1995) onde se verifica uma ligeira diminuição do consumo específico até B20, tendo um mínimo com B10. Outros estudos revelam tendências similares, verificando-se que para baixas incorporações de biodiesel em gasóleo, até B30, a utilização de biodiesel pode efetivamente significar um aumento da eficiência térmica e a diminuição do consumo correspondente (Nwafor 2004) (Labeckas e Slavinskas 2006).

É expresso por vários autores que a utilização de B20 corresponde à mistura ótima onde se revela o valor máximo de eficiência térmica e logicamente um valor mínimo de consumo específico (Xue, Grift e Hansen 2011) (A. K. Aggarwal 2007) (Lapuerta, Armas e Rodriguez-Fernández 2008 a).

O mesmo tipo de questão coloca-se relativamente à performance do motor quando abastecido com biodiesel. É referido por Grabosky e McCormick (Graboski e McCormick 1998) que com misturas

contendo até 35% de biodiesel, o valor do binário máximo não é significativamente afetado pela utilização desse combustível com menor conteúdo energético. Apesar de a melhor lubrificação reduzir ligeiramente as perdas por atrito nos componentes mecânicos do motor e das potenciais melhorias da eficiência térmica na combustão, é genericamente aceite que se verifica uma ligeira redução na potência disponível no motor quando se utiliza biodiesel devido essencialmente ao efeito do menor poder calorífico deste combustível de origem vegetal (Xue, Grift e Hansen 2011). Na análise às referências utilizadas, é possível detetar 11 casos em que se verifica uma diminuição da potência pela utilização de biodiesel, 5 que referem um aumento e 3 onde a manutenção da potência com biodiesel é igual à registada com gasóleo. À semelhança do registado ao nível do consumo de combustível, também aqui a interação de vários fatores poderá estar na origem destes resultados atendendo às diferenças das especificações dos vários testes, do tipo e quantidade de biodiesel utilizado na mistura com gasóleo e no tipo de motor ou veículo. Gogoi e Baruah (Gogoi e Baruah 2010) analisaram várias misturas de biodiesel no gasóleo e verificaram que a potência disponibilizada diminuiu quando se utilizou B20 mas aumentou relativamente ao gasóleo quando se utilizou B40 e B60. Já Gumus e Kasifoglu (Gumus e Kasifoglu 2010) registaram um aumento da potência com B20 mas uma diminuição quando se abasteceu o motor com B50 e B100. Na realidade as diferenças são muito pequenas, sendo possível apurar que as diferenças de potência medidas em laboratório não são verificadas quando em estrada, ou são impercetíveis (Silva, Prata e Teixeira 2003) (Çetinkaya, et al. 2005) (Proc, et al. 2006) (Fontaras, Karavalakis, et al. 2009).

2.4 Sumário do capítulo

A utilização de biodiesel encerra uma abordagem muito diversa e, apesar de não querer fugir a essa diversidade, foi feita neste trabalho uma focalização mais específica e detalhada sobre os aspetos que se prendem com as emissões, o consumo e o desempenho de motores quando abastecidos com diferentes tipos de combustíveis, contendo diferentes quantidades de biodiesel misturado em gasóleo. Ainda relativamente à especificidade da problemática em causa, o presente trabalho incidiu de forma também mais detalhada sobre as especificidades relativas aos ensaios realizados e à avaliação dos resultados obtidos através desses ensaios.

2.4.1 Resumo da pesquisa

- ✓ O biodiesel é efetivamente uma alternativa tecnicamente viável, que pode ser utilizado nos motores atuais e que deve ser potenciada porque pode também contribuir para melhoria da economia, aumento do emprego, aumento da segurança e independência energética, diminuição do efeito de estufa e dos impactos ambientais do setor dos transportes.
- ✓ A utilização de misturas com pequenas quantidades de biodiesel pode ser um processo interessante como uma fonte energética alternativa para o setor dos transportes, sem a necessidade de um grande esforço financeiro e social, permitindo aligeirar pressões especulativas sobre o petróleo. É notório que esta alternativa é viável, sustentável e tecnicamente exequível, não representando perdas significativas de potência e desempenho para os veículos atuais, podendo mesmo apresentar vantagens ambientais e económicas.
- ✓ O biodiesel apresenta várias diferenças relativamente ao gasóleo, que são determinantes para a sua utilização em motores de combustão interna, nomeadamente ao nível do número de cetano, densidade, poder calorífico, viscosidade, índice de iodo, tensão superficial e teor em oxigénio. Estas diferentes propriedades afetam significativamente os processos de injeção e combustão que posteriormente se traduzem em variações nos níveis de emissões e da eficiência dos motores.
- ✓ As gotas de combustível durante a injeção para o cilindro são maiores no caso do biodiesel, sendo ainda importante referir que o cone de injeção com biodiesel é mais longo e mais estreito e a injeção é efetuada a pressões mais elevadas, embora se verifiquem diferenças entre diferentes tecnologias de injeção, sendo notório ainda um baixo nível de conhecimento do efeito do biodiesel em sistemas *common-rail*.
- ✓ O processo de combustão com biodiesel é alterado, principalmente devido ao facto de existir oxigénio no combustível, o que promove um aumento da temperatura de combustão, que é ainda mais significativo quando o biodiesel apresenta elevada percentagem de cadeias moleculares longas e/ou saturadas. Estas e outras características fazem ainda alterar a forma como ocorrem as 3 fases de combustão, fundamentalmente a fase de pré-mistura e a fase difusiva que têm impacto significativo sobre as emissões e desempenho do motor.
- ✓ Verifica-se uma redução nas emissões de CO e HC quando se utiliza biodiesel relativamente ao gasóleo devido à existência de oxigénio no combustível, o que afeta a relação ar/combustível promovendo uma maior taxa de conclusão da reação de combustão. Deste modo, quanto mais rica em biodiesel for a mistura, maior a taxa de redução nestas emissões. O avanço da ignição desempenha um papel relevante sobre a produção de CO e HC, pelo que

o biodiesel com maior número de cetano contribui para uma maior redução destes gases poluentes. Quanto maior for o grau de saturação do biodiesel mais visível é o efeito redutor nas emissões de CO e a carga imposta ao motor também desempenha um papel relevante no efeito de redução das emissões de CO quando se utiliza biodiesel. Relativamente aos HC será importante a avaliação do método de ensaio e de recolha de gases para análise, tendo em conta que estes processos têm alguma influência sobre os resultados.

- ✓ A utilização de biodiesel promove a redução de partículas porque diminui localmente a riqueza, o que restringe a sua formação, devido à existência de oxigénio proveniente do combustível. Para além deste fator, o baixo teor em compostos aromáticos e a inexistência de enxofre no biodiesel também representam alguma contribuição para a menor emissão de partículas quando se utiliza biodiesel. Em função do regime de funcionamento do motor, este efeito redutor de emissão de partículas pode ter maior ou menor visibilidade, sendo acentuado em situações de aumento de carga e de rotação.
- ✓ A emissão de NOx é talvez um dos aspetos mais controversos no estudo sobre a utilização de biodiesel em motores de combustão interna, havendo registos de aumentos e diminuições destas emissões, embora seja notória uma maior tendência para o aumento. Trata-se pois de uma questão ainda em aberto essencialmente devido a dois efeitos. Por um lado, a grande quantidade de parâmetros que afeta direta ou indiretamente a formação deste gás poluente; por outro lado o efeito que a carga e a rotação impostas aos motores desempenham sobre este tipo de emissões. O efeito que o regime de funcionamento provoca nas emissões de NOx é um aspeto essencial e que requer uma definição de métodos comparáveis ao nível da realização de ensaios que sejam cumulativamente representativos da realidade a que são sujeitos os veículos que utilizam biodiesel como combustível. Relativamente aos parâmetros que se apontam como sendo os mais significativos para a formação de NOx pela utilização de biodiesel devem ser referidos: a existência de oxigénio no combustível, o número de cetano e o teor em compostos aromáticos. Estas propriedades estão logicamente associadas aos processos de injeção e combustão que em grande medida são responsáveis pelas emissões de NOx. Efetivamente, podem ser potenciadas as emissões de NOx quer pelo avanço na injeção e conseqüente avanço na ignição, quer pelas características intrínsecas do biodiesel que conduzem a maiores temperaturas na combustão. Contudo, a utilização de EGR, a composição do biodiesel e o seu menor poder calorífico potenciam a redução das emissões de NOx com biodiesel. É no balanceamento destes fatores que se vai definir a influência da utilização de biodiesel sobre os níveis de emissão desta substância.
- ✓ As alterações de consumo de combustível estão sem dúvida associadas ao menor conteúdo energético do biodiesel face ao gasóleo, contudo este não poderá ser o único fator a ser considerado pois a viscosidade, densidade e a existência de oxigénio no combustível contribuem para o rendimento do processo de combustão, pelo que não é um dado adquirido que a utilização de biodiesel implique um aumento de consumo proporcional à redução do poder calorífico, sendo este efeito ainda mais notoriamente atenuado quando se utilizam pequenas quantidades de biodiesel (até 30%). Quando se avalia a redução da energia disponível do biodiesel em termos volúmicos (5 a 10%), comparativamente ao gasóleo e se considera, por exemplo, a utilização de uma mistura com 20% de biodiesel, essa diferença fica reduzida para 1 a 2%. Facilmente se conclui que pequenas contribuições de outros fatores podem efetivamente ter alguma relevância sobre o rendimento térmico e, conseqüentemente, sobre os resultados de consumo de combustível.

- ✓ Não são significativas as diferenças ao nível do desempenho do motor quando se utiliza biodiesel face à utilização apenas de gasóleo. Contudo, quando se considera a incorporação de pequenas quantidades de biodiesel (até 30%) essa variação é praticamente impercetível.
- ✓ O regime de funcionamento do motor exerce uma influência importante, quer nos resultados de emissões, quer nos resultados de consumo de combustível. A este nível, a realização de ensaios em condições reais de circulação não é muito comum, mas representa uma ferramenta importante, que permite uma análise realista do efeito da utilização de biodiesel em motores de combustão interna, sendo factuais as diferenças nos resultados obtidos através da realização de testes em laboratório, face aos resultados obtidos nos ensaios em estrada. Esta situação ganha particular atenção quando é reconhecida a subestimação que os resultados dos testes normalizados apresentam relativamente ao consumo e às emissões de poluentes.

2.4.2 Análise crítica ao capítulo

Relativamente aos objetivos definidos para este capítulo pode concluir-se o seguinte:

1º Objetivo: A utilização de biodiesel como estratégia energética alternativa no setor dos transportes surge como uma realidade cada vez mais presente. Este capítulo expõe de forma resumida as questões mais problemáticas e as vantagens da utilização de biodiesel, confirmando ainda a existência de algumas lacunas de conhecimento sobre o modo como o recurso a biodiesel afeta o funcionamento do motor ao nível do consumo, do desempenho e das emissões, evidenciando a necessidade de aumentar o conhecimento sobre este processo, especificamente em condições reais de operação. Foi ainda tido em consideração que o presente texto fosse elaborado no sentido de poder ser utilizado pelas empresas portuguesas da área dos transportes, revelando-se como uma ferramenta de apoio à decisão, como uma alternativa de cariz científico relativamente à maioria dos documentos de índole comercial existentes.

2º Objetivo: Foi estruturada uma revisão bibliográfica que permitiu caracterizar o trabalho desenvolvido por vários cientistas sobre a utilização de biodiesel em motores de ignição por compressão que equipam veículos automóveis ligeiros e pesados. Como resultado deste trabalho foi possível resumir as questões mais problemáticas associadas ao tema desta tese, questões estas que são expressas sumariamente no ponto 2.4.1. Neste sentido foram identificadas diferenças de resultados ao nível do consumo e da emissão de NO_x, que são ainda mais notórias quando implicam a avaliação de situações de ensaios em condições reais de estrada. A contribuição deste trabalho deverá centrar-se na execução de testes em laboratório e na obtenção de dados de circulação em condições reais, permitindo estabelecer um relação entre esses resultados alcançados em condições distintas.

3º Objetivo: Através da análise das questões problemáticas detetadas foi definida uma abordagem no sentido de definir uma estratégia de trabalho que permitisse encontrar respostas, valendo-se das ferramentas mais adequadas que fosse possível utilizar. Esta abordagem permitiu estruturar a metodologia experimental que se julgou mais apropriada e exequível, envolvendo a implementação de métodos para realização de ensaios em estrada, avaliação de dados de uma frota de veículos pesados de passageiros, realização de ensaios em banco de motores e realização de ensaios em banco de rolos.

2.4.3 Questões orientadoras do trabalho a realizar

Perante a identificação dos problemas do estado atual da ciência relativamente à utilização de biodiesel em motores de combustão interna através de uma análise mais geral e de outra mais restrita, é possível estabelecer aquelas que serão as linhas orientadoras do presente trabalho.

Neste sentido, a metodologia a implementar, que se baseará essencialmente em métodos experimentais, terá na sua génese a procura de respostas aos problemas detetados, fundamentalmente ao nível da influência que os diferentes ciclos de ensaios, e por consequência, diferentes regimes de funcionamento do motor impostos por esses ciclos, podem implicar sobre as emissões de NOx e sobre o consumo de combustível. Dada a dificuldade em garantir a representatividade dos testes de laboratório, será dada especial atenção à possibilidade de utilizar dados reais de circulação em estrada, quer recorrendo a frotas de veículos, quer utilizando procedimentos de ensaios em estrada que permitam a obtenção de resultados precisos e fiáveis.

As questões colocadas e o modo como se pretende dar resposta a essas questões encontra-se sumariamente apresentada na tabela 2.1.

Nº	Questão	Intenção de Contribuição
1	Como variam as emissões de NOx com o regime do motor quando é utilizado biodiesel?	Realização de ensaios em diferentes regimes de funcionamento averiguando sobre as emissões de NOx correspondentes.
2	Como varia o consumo de combustível com o regime do motor quando é utilizado biodiesel?	Realização de ensaios em diferentes regimes de funcionamento averiguando sobre o consumo de combustível correspondente.
3a	Como pode ser utilizado um método de ensaios em estrada que permita com fiabilidade e precisão obter resultados representativos dessa realidade quando se utiliza biodiesel.	Utilização de dados reais de consumo de uma frota de veículos que permita uma comparação com os resultados obtidos em laboratório.
3b		Desenvolvimento de um método de ensaios em circulação em estrada para a obtenção da diferença comparativa de consumo entre dois recursos energéticos diferentes.

Tab. 2.1 – Tabela resumo sobre os objetivos do trabalho e as expectativas de contribuição para atingir esses objetivos.

Esta página foi intencionalmente deixada em branco.

MONTAGEM EXPERIMENTAL E RECURSOS

Sumário:

1. Que estratégia foi utilizada para obter os resultados pretendidos?
2. Quais os recursos experimentais utilizados?
3. Como foram utilizados os recursos experimentais e com que fiabilidade?
4. De que modo são alteradas as propriedades do combustível pela utilização de biodiesel?

Esta página foi intencionalmente deixada em branco.

3.1 Introdução

Dado o carácter essencialmente experimental deste trabalho e tendo em consideração a utilização de diferentes abordagens para o cumprimento dos objetivos delineados, foi necessário recorrer a vários tipos de equipamentos de modo a tornar exequível a realização dos ensaios que permitissem a obtenção da informação sobre a utilização de biodiesel em motores de veículos automóveis.

No presente trabalho foram utilizados diversos equipamentos, tendo em conta fundamentalmente a utilização de três técnicas similares embora com recurso a ferramentas distintas:

- Testes em motores recorrendo a um banco de ensaios de motores;
- Testes de veículos em banco de rolos;
- Testes de veículos em estrada em condições reais de circulação.

Para além do recurso às três técnicas referidas, foram ainda realizados ensaios físico-químicos ao combustível utilizado, que envolveram também a utilização de alguns equipamentos suplementares.

Deste modo, decidiu-se dividir este capítulo em 4 secções, abordando em cada uma delas os vários equipamentos utilizados, o software desenvolvido e as questões mais relevantes associadas à utilização específica de cada equipamento ou montagem experimental, relegando para a última parte as considerações sobre a caracterização dos combustíveis utilizados e a análise dos resultados relativos aos testes efetuados no decorrer deste trabalho, nomeadamente da medição da viscosidade, densidade e poder calorífico de cada combustível base e das misturas.

3.1.1 Metodologia geral

Conforme referido no capítulo anterior, existem vários estudos que analisam a forma como o comportamento do motor é afetado pela utilização de biodiesel, sendo contudo identificados diversos tipos de pesquisa, recorrendo a diferentes abordagens experimentais. Na realidade, uma parte muito considerável dos estudos referidos no 2º capítulo considera a realização de testes em laboratório utilizando, na maioria dos casos, uma montagem experimental contemplando o recurso a um banco de ensaios de motores e quase todos os restantes utilizando um banco de rolos, havendo um insignificante número de registos de testes considerando a circulação em estrada. Conforme foi constatado, para avaliar corretamente a influência que a utilização de biodiesel terá no funcionamento do motor, é fundamental avaliar o comportamento do motor em condições reais de circulação, o que não é possível de garantir nos diversos testes em laboratório. Deste modo, também como já explicitado no capítulo anterior, foi intuito do presente trabalho o recurso a diversas técnicas de ensaio, de modo a poder cruzar os dados obtidos, tentando averiguar sobre o modo como diferentes resultados podem ou não ser influenciados pelo tipo de abordagem experimental utilizada.

O banco de ensaios de motores instalado na ADAI, sobre o qual o autor deste trabalho desenvolveu um software de automatização no decorrer dos trabalhos de mestrado (L. Serrano 1999), permitia utilizar esta ferramenta para a avaliação direta do motor, sem caixa de velocidades, no sentido de analisar o impacto da utilização de diversas misturas de combustível com diferentes teores de biodiesel, ao nível das emissões de gases de escape e do consumo. Para este propósito foram utilizadas três tipos de análise distintos.

Inicialmente foi estabelecido um ciclo de ensaios estabilizados com um motor Volvo TD41 de 6 cilindros com turbocompressor, equivalente ao que equipa os veículos pesados de passageiros. Foram utilizados 7 combustíveis constituídos por diferentes percentagens de biodiesel misturado em gasóleo (B0, B10, B15, B20, B30, B50 e B100). Posteriormente, este motor foi sujeito a um ciclo mais curto mas que envolvia o estudo sobre a transição de regime, avaliando o efeito da utilização de biodiesel sobre o consumo em regime transiente, quando abastecido com os mesmos combustíveis considerados nos ensaios em regime estabilizado. Estas duas abordagens serão apresentadas e descritas em pormenor no capítulo 4.

Como o motor Volvo TD41 não é representativo das motorizações mais recentes usadas no parque automóvel, dado que integra um nível pouco elaborado de controlo eletrónico, foi também utilizado um motor Volkswagen 1.9 TDI de 4 cilindros, equipado com turbocompressor, intercooler e válvula EGR, que é utilizado em vários modelos do grupo VW. Atendendo às pequenas variações de desempenho verificadas entre combustíveis com pequenas quantidades de biodiesel nos ensaios com o motor Volvo e considerando que são estas misturas que envolvem maior controvérsia, foram avaliados com este novo motor, os impactos da utilização de uma mistura com 20% de volume de biodiesel em gasóleo (B20) relativamente à situação de utilização de combustível constituído apenas por gasóleo. Esta situação teve ainda em conta que o tempo de utilização do banco de ensaios de motores é bastante dispendioso, e que seria preferível fazer uma avaliação mais completa, apenas com uma mistura, do que fazer mais misturas mas com menos pontos de medição, à semelhança do que foi realizado com o motor Volvo.

Nos ensaios realizados em banco de rolos, foi utilizada uma análise diferente e que considerou a integração destes testes com os ensaios em estrada. Deste modo, para analisar os veículos objeto do estudo e de modo a validar os métodos utilizados nos ensaios em estrada, foi desenvolvido um procedimento de ensaios utilizando o referido banco de rolos. Neste sentido, atendendo a que tinha de ser montado o sistema de medida, aproveitou-se também para efetuar ensaios, tendo em vista a obtenção de resultados sobre o consumo e emissões, que permitissem fornecer informações sobre o mesmo veículo e estabelecer comparações entre veículos nas mesmas condições com diferentes combustíveis, utilizando uma balança de precisão e um sistema de medida que será apresentado durante este capítulo.

Para a realização dos ensaios em estrada foi desenvolvida uma metodologia baseada nas potencialidades de um sistema GPS, associado a um esquema em que dois veículos similares fazem os mesmos percursos em simultâneo, estando assim sujeitos às mesmas condições meteorológicas e ao mesmo tráfego. Neste sentido, foi primeiramente realizado um estudo sobre as potencialidades da utilização de um sistema de aquisição dos dados disponíveis na ficha OBD (*On-Board Diagnostics*) complementado com um registor de dados baseado no GPS. A descrição desta metodologia e a avaliação das suas potencialidades para avaliar o consumo energético do veículo num dado percurso é apresentada em (Serrano, Costa e Silva 2010). Este processo é descrito no presente capítulo em termos das potencialidades dos equipamentos, embora as metodologias sejam melhor detalhadas no capítulo 4 juntamente com a apresentação e discussão dos resultados.

3.1.2 Objetivos

Tendo em consideração os resultados provenientes da revisão bibliográfica expressa no capítulo anterior, onde a utilização de biodiesel em veículos promove algumas incongruências relativamente aos valores das emissões de NOx e do consumo de combustível, nomeadamente nas constatações em que se avaliam diferentes regimes de funcionamento dos motores, são para este capítulo identificados os seguintes objetivos:

- 1º Objetivo:** Descrição dos problemas associados às técnicas experimentais normalmente utilizadas e descrição do modo como se pretendem resolver esses problemas.
- 2º Objetivo:** Apresentação sumária do software e dos equipamentos utilizados bem como das tecnologias a implementar.
- 3º Objetivo:** Caracterização dos combustíveis utilizados no estudo.

3.1.3 Resumo

No presente capítulo será apresentado o sistema de medida e controlo instalado no banco de ensaios de motores existente no Laboratório de Aerodinâmica Industrial (LAI) da ADAI (Associação para o Desenvolvimento da Aerodinâmica Industrial). Este sistema é constituído por um dinamómetro hidráulico, por uma balança de combustível, um analisador de gases, um opacímetro, um sistema de aquisição de dados através da ficha OBD caso o motor disponha dessa ficha, um sistema de aquisição e controlo de dados que permita o registo das informações relativas aos ensaios, nomeadamente binário, velocidade de rotação, consumo de combustível, temperaturas e pressões de funcionamento, valores de emissão de gases de escape e opacidade. O sistema de medição do banco de ensaios é gerido por uma aplicação computacional desenvolvida na plataforma de programação TestPoint, elaborada durante o trabalho de tese de mestrado do autor (L. Serrano 1999) que permite adquirir os dados e controlar o processo de realização de ensaios de forma completamente autónoma, sem intervenção do operador.

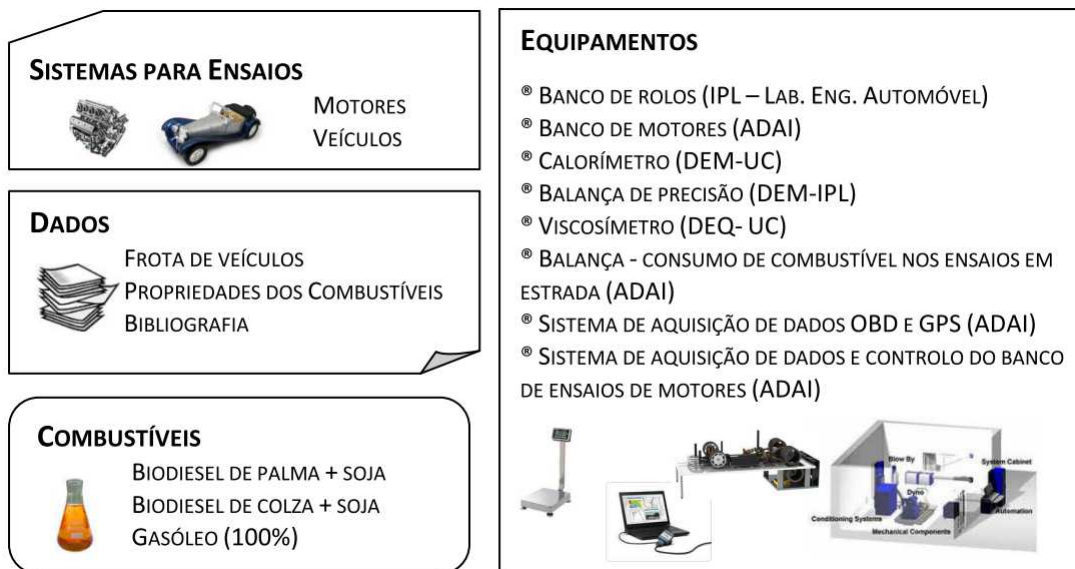


Fig. 3.1 – Recursos para realização de trabalho experimental.

Ainda neste capítulo é descrito o sistema de medida utilizado no banco de rolos instalado no edifício de Engenharia Automóvel da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria. O banco de rolos consiste numa estrutura em que quatro rolos, associados dois a dois, são ligados a dois freios eletromagnéticos, um por cada eixo. O veículo ensaiado aplica a sua potência aos rolos através das rodas motrizes, sendo dessa forma simuladas as condições de carga a que habitualmente está sujeito quando se desloca em estrada. Associado ao banco de rolos foi ainda implementado um sistema para leitura do consumo de combustível, recorrendo a um dispositivo composto pelos circuitos de combustível e uma balança de precisão. Utilizando os equipamentos descritos é possível medir o binário resistente, a velocidade de circulação simulada, a velocidade de rotação do motor, o consumo de combustível e as temperaturas do óleo e do combustível.

Também no presente capítulo é descrita a metodologia desenvolvida e testada no sentido de poder realizar ensaios em estrada de forma controlada, de modo a obter dados sobre o desempenho e consumo de combustível nestas condições. Para este efeito são descritos os equipamentos utilizados, nomeadamente o sistema de GPS e de ligação ao veículo através da ficha OBD e a balança de combustível. É ainda descrito de forma sumária como estes equipamentos podem ser utilizados, tendo em vista a obtenção dos resultados pretendidos.

Finalmente, é efetuada no presente capítulo a avaliação das propriedades dos combustíveis utilizados, contemplando ainda a realização dos testes de densidade, viscosidade e poder calorífico de vários combustíveis, possibilitando uma breve discussão sobre o modo como estas propriedades variam em função dos níveis de biodiesel incorporado no gasóleo.

Um esquema que resume o conjunto de recursos que constituem a estrutura experimental utilizada no intuito de consumir os objetivos deste trabalho é apresentado na figura 3.1.

As especificações associadas a cada metodologia utilizada na realizações dos ensaios não é refletida neste capítulo, sendo relegada para o capítulo seguinte, uma vez que foram utilizadas metodologias distintas que motivaram diferentes abordagens e diversos tipos de análise, pelo que foi entendido que seria mais sensato apresentar a metodologia associada a cada bateria de ensaios, junto com a apresentação de resultados subsequentes.

3.2 Ensaios de motores recorrendo a um banco de ensaios de motores

O banco de ensaios para motores de combustão interna baseia-se num freio dinamométrico que permite absorver a energia produzida no motor, definindo o regime de funcionamento deste a partir do par de parâmetros velocidade de rotação e binário resistente. A instalação é constituída também por um conjunto de equipamentos complementares de que se podem salientar a balança para medição do consumo de combustível, o medidor de *blow-by*, o analisador de gases, o opacímetro, o analisador de partículas, bem como todos os sensores de pressão e temperatura para controlo do processo de ensaio. Todos estes equipamentos permitem a realização das medições porque existe uma infraestrutura anexa que torna possível a realização dos ensaios nas condições adequadas, de onde se destaca o circuito de combustível, o circuito de água, o sistema de ventilação, o sistema anti-incêndio, o sistema de isolamento acústico e sistema elétrico. Na figura 3.2 é possível observar a instalação montada que permite a realização de ensaios em motores.



Fig. 3.2 – Vista do motor acoplado no dinamómetro, com restantes equipamentos anexos.

Deve ainda referir-se que todos os sinais correspondentes aos parâmetros medidos, são encaminhados para um quadro de controlo e monitorização e daí seguem para um computador que adquire os diversos sinais elétricos e os processa para que se transformem em valores com o significado físico correspondente às variáveis medidas. Este processo envolve um software desenvolvido para o efeito e que para além de garantir a aquisição, processamento e monitorização dos parâmetros conforme referido, permite ainda a interação com os sistemas de controlo do

dinamómetro e da velocidade de rotação do motor, capacitando todo o sistema para executar automaticamente um dado ciclo de ensaios, especificado previamente, sem a intervenção do operador garantindo uma muito maior fiabilidade e repetibilidade dos resultados (L. Serrano 1999).

3.2.1 Dinamómetro

O primeiro freio para medir a potência de um motor foi desenvolvido há quase dois séculos. Este primeiro freio, denominado freio de corda (*rope brake*) (figura 3.3-a), além de apresentar resultados muito pouco precisos, era também extremamente perigoso pelo que foi mais tarde substituído pelo freio de Prony (figura 3.3-b), um pouco mais seguro, mas igualmente pouco preciso. Estes tipos de freios primitivos funcionavam por atrito mecânico, sendo arrefecidos a água, e estão ambos obsoletos hoje em dia (Plint e Martyr 1999).

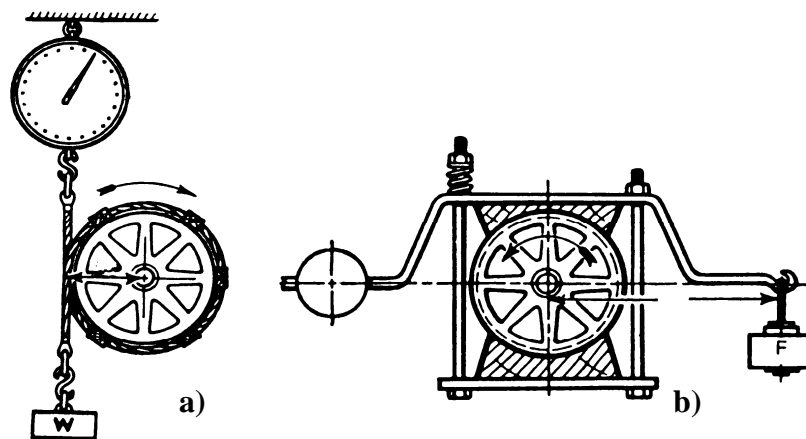


Fig. 3.3 – a) Freio de corda; b) Freio de Prony (Plint e Martyr 1999)

O responsável pelo desenvolvimento do sistema de funcionamento dos dinamómetros atuais foi William Froude (Atkins 2009) que desenvolveu um dinamómetro para testar um motor a vapor destinado a operar num navio da marinha inglesa (HMS Conquest).

Atualmente encontram-se disponíveis vários tipos de freios, classificados essencialmente em função do meio que utilizam como forma de dissipar a energia. Desta forma, podem ser considerados cinco grupos:

- Hidráulicos
- Hidrostáticos
- Elétricos
- De fricção mecânica
- De travão de ar

O funcionamento básico de um dinamómetro assenta na ligação solidária do rotor deste a um motor. A rotação deste rotor é travada por um binário resistente introduzido pelo freio e medido a uma distância “*b*” do centro do rotor. A colocação de uma célula de carga neste ponto de ancoragem permite a medição da força necessária para impedir que o binário imposto pelo motor ao rotor faça o dinamómetro rodar. A medição do binário é pois obtida de uma forma muito simples, sendo a grande questão que diferencia os vários fornecedores de dinamómetros a forma como suportam o dinamómetro, permitindo a existência de um grau de liberdade rotacional que apenas é suportado pela célula de carga. De forma a permitir a determinação da potência debitada em cada momento pelo motor, é também medida a velocidade de rotação do rotor dado que num motor rotativo a potência é obtida através do produto desta grandeza pelo binário resistente.

Os dois grandes grupos de dinamómetros disponíveis, apesar de não serem os únicos, são de facto os hidráulicos e os eléctricos.

Os dinamómetros hidráulicos baseiam o seu princípio de funcionamento na interação de um rotor com um estator, cujo movimento rotacional relativo provoca uma zona de significativa depressão. O abastecimento desta zona por mais ou menos água, condiciona o efeito de travagem do rotor e consequentemente de absorção de energia. Este tipo de freios apresenta a vantagem de o caudal de água utilizado para absorver a energia no dinamómetro, servir simultaneamente para promover o arrefecimento, uma vez que a água leva consigo a energia absorvida no processo de travagem do rotor.

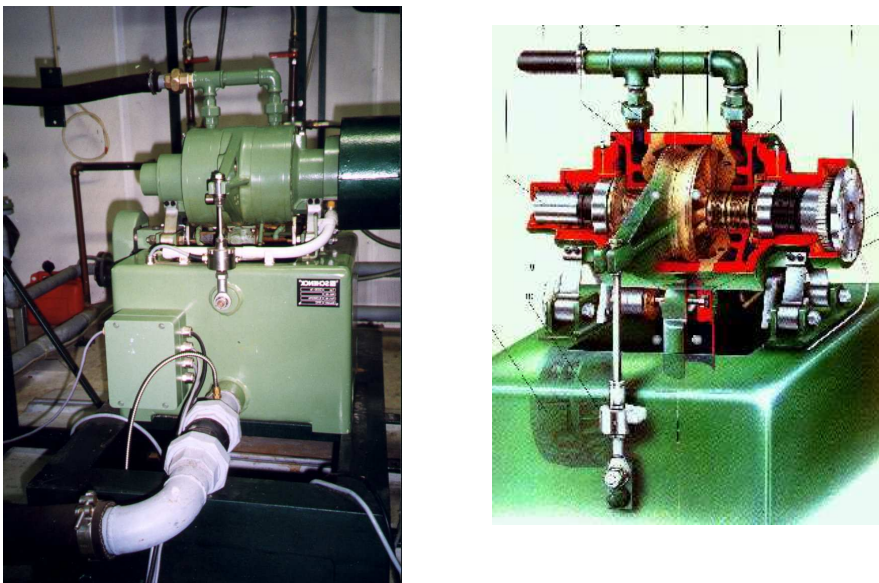


Fig. 3.4 – Representação do dinamómetro Schenck D230 em foto e em corte esquemático

Estes equipamentos são bastante robustos e apresentam um baixo coeficiente tamanho/potência absorvida. São muito utilizados quando as potências são elevadas e por equipas de competição, uma vez que as potências geradas pelos motores destes carros estão associadas a elevadas rotações, na ordem da 20000rpm. Nestas situações, o diâmetro do rotor é um fator determinante e o facto de os dinamómetros hidráulicos serem mais pequenos que os eléctricos, para valores similares de potência, é um fator muito importante ao nível da segurança e fiabilidade na realização dos testes.

Com o desenvolvimento da eletrónica e com o refinamento da capacidade de controlo, os dinamómetros eléctricos têm vindo a substituir os hidráulicos. Existem fundamentalmente dois tipos de dinamómetros eléctricos, os que utilizam o princípio de correntes de Foucault (*Eddy Current* ou

sistemas magnéticos) e os dinamômetros geradores, sejam em corrente contínua (CC) ou em corrente alternada (CA).

O arrefecimento destes dinamômetros pode ser feito através de água ou de ar, embora seja mais comum a utilização de água nos sistemas magnéticos e de ar nos dinamômetros geradores. O controlo é todo eletrónico. Em função da corrente elétrica que se fornece ao dinamómetro de correntes de Foucault, ele altera o campo magnético, alterando a energia absorvida ao rotor. No caso do dinamómetro gerador, a travagem é realizada através da energia solicitada ao dinamómetro pelo sistema de controlo, absorvendo essa energia a partir do rotor e dissipando-a sob a forma de calor pelo ar que é forçado a circundar o dinamómetro.

O sistema utilizado nos ensaios foi um dinamómetro hidráulico da marca Dynabar da Schenck, modelo D230 representado na figura 3.4. Este freio permite absorver uma potência nominal máxima de 230kW, tendo como valor máximo de binário os 600Nm e uma rotação máxima de 13000rpm, apesar das suas dimensões bastante reduzidas e de ter um peso relativamente baixo (110kg). Permite o ensaio de uma vasta gama de motores, podendo testar quase todos os motores que equipam os veículos ligeiros e comerciais de série, bem como ainda alguns motores de veículos pesados, conforme pode ser confirmado pela análise do gráfico apresentado na figura 3.5.

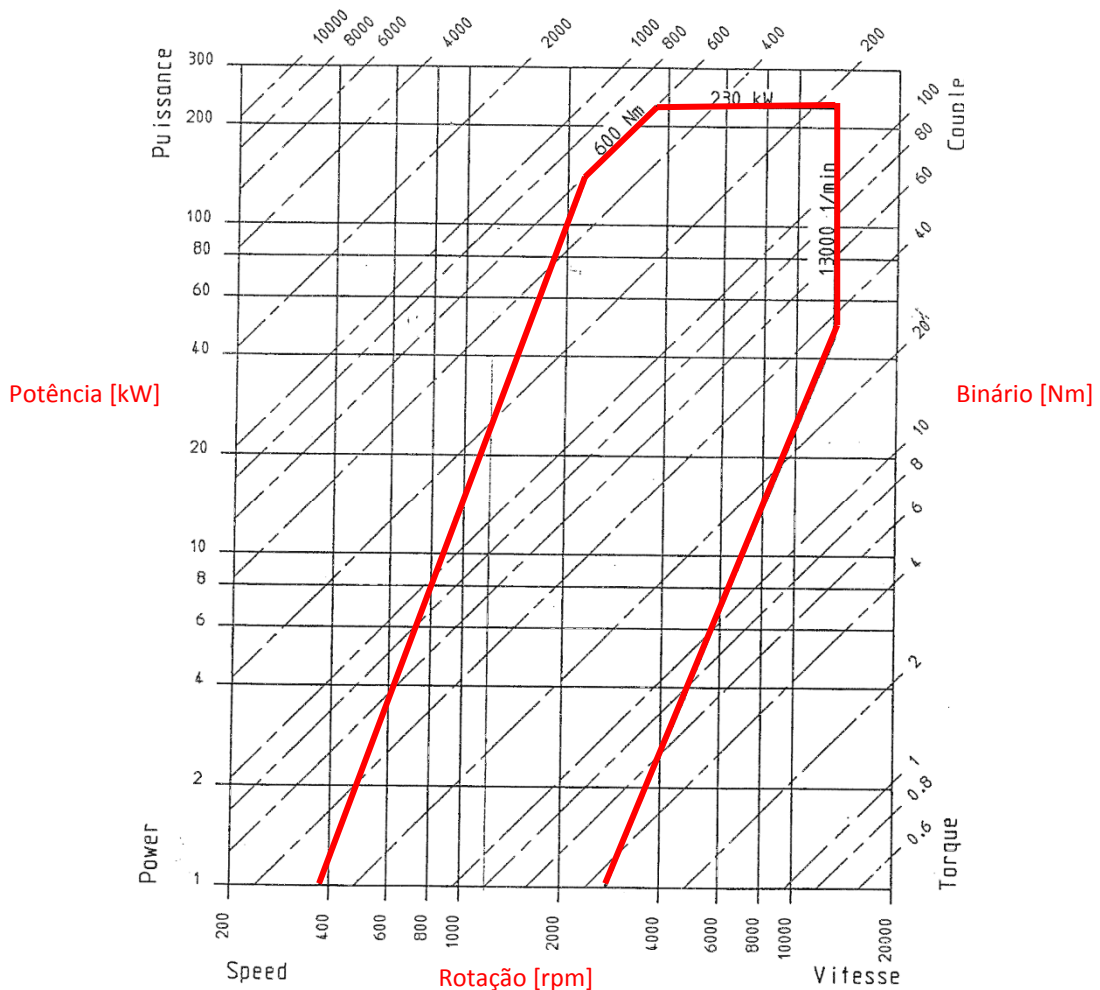


Fig. 3.5 – Diagrama de operação do dinamómetro Schenck D230.

As grandes vantagens apresentadas por este freio centram-se no seguinte:

- Pouco sujeitos a desgaste o que lhes confere um longo tempo de vida;
- Tempos de reação curtos, devido à diminuta inércia;
- Elevada estabilidade nos pontos de operação;
- Possibilidade de fazer ensaios variados devido aos diferentes modos em que pode funcionar;
- Construção simples, o que o torna simples de operar.

O sistema, para além do dinamómetro propriamente dito, é ainda composto por uma unidade de controlo e registo de dados com a referência Schenck 2010D. É através deste equipamento que se torna possível operar de diversas formas, medir as diferentes variáveis de funcionamento e obter as informações relativas à operação de medida. Utilizando as saídas e entradas analógicas deste sistema, torna-se possível a comunicação com um computador que permite a aquisição de dados e o estabelecimento de parâmetros de controlo do dinamómetro, possibilitando ainda a automatização de processos e o estabelecimento de ciclos automatizados.

Dado que o controlador do freio é usado para definir o binário resistente imposto ao motor, é necessário usar um outro sistema de controlo para a velocidade de rotação. Esse controlo é realizado recorrendo a um sistema que utiliza um motor de passo-a-passo e um circuito comparador. Este sistema está equipado com um dispositivo que permite a definição do valor requerido para a velocidade de rotação, seja esse valor definido num potenciómetro do próprio equipamento ou através de um sinal externo.

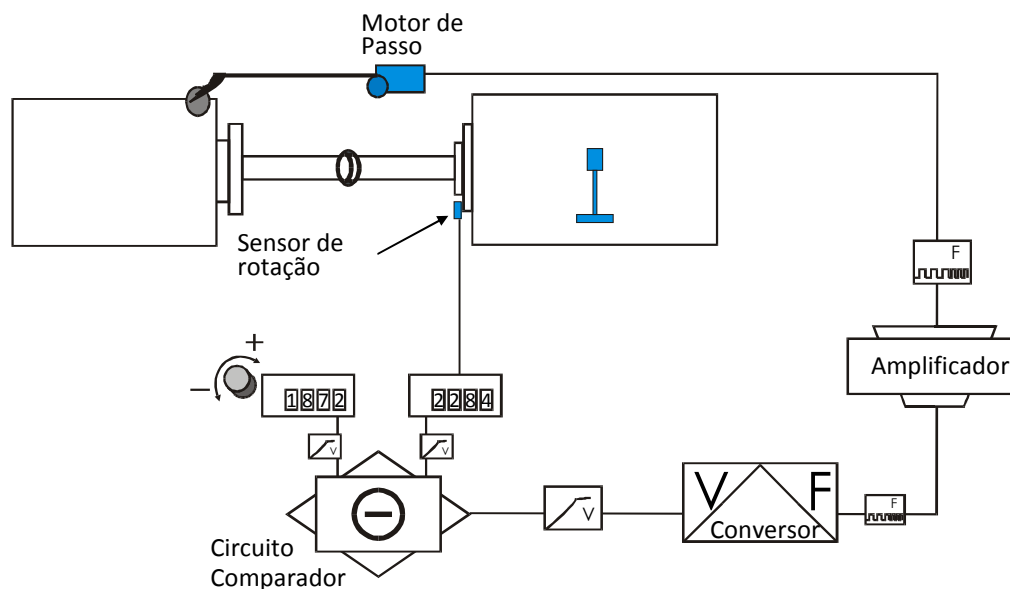


Fig. 3.6 – Esquema representativo do circuito de controlo da velocidade de rotação do motor.

O controlador do acelerador do motor, esquematicamente representado na figura 3.6, tem um sistema baseado num circuito comparador que utiliza um sinal em tensão correspondente ao valor da velocidade real lida no sensor instalado no freio, e um outro sinal em tensão proporcional ao valor

de velocidade de rotação pretendida. Este circuito permite corrigir o valor da velocidade de rotação do motor, através da geração de um sinal em frequência (onda quadrada), proporcional à diferença entre aquelas duas tensões, que vai alimentar o motor de passo mecanicamente ligado ao acelerador do motor, permitindo acelerar o motor ou desacelerá-lo, dependendo da comparação e da diferença entre o valor de velocidade imposto e o valor real lido no sensor. Este controlador tem uma particularidade importante no funcionamento do banco de ensaios, que é a forma como se dá a aproximação dos valores da velocidade, uma vez que a rotação do motor de passo é tanto maior quanto mais distante estiver a velocidade real da pretendida, dado que a frequência do trem de impulsos com que é alimentado o motor de passo é proporcional à tensão de erro. O sistema de desmultiplicação por parafuso sem fim/roda coroa usado para transmitir o movimento do motor de passo ao acelerador do motor, garante uma elevada precisão no acionamento.

Este princípio de funcionamento permite uma resposta adequada por parte do motor que está a ser ensaiado, dado que, devido ao atraso normal dessa resposta, poderiam facilmente ocorrer perdas de controlo do motor, o que é evitado através deste modo de funcionamento que apresenta claramente maior estabilidade.

3.2.2 Balança de combustível

Um dos parâmetros essenciais no presente estudo foi o consumo de combustível. Para medir o consumo, a instalação tem integrado no respetivo circuito de abastecimento de combustível uma balança de combustível da marca AVL 733, modelo 7330.09.

Este equipamento baseia o seu método de medição num sistema gravimétrico. Este princípio de medição que permite evitar problemas associados às variações de densidade do combustível com diferentes temperaturas, garante ainda uma medida precisa do consumo de combustível em situações de mudança de regime de funcionamento do motor.

O sistema é baseado num pequeno reservatório com $0,9 \text{ dm}^3$ de capacidade, que é abastecido de combustível e de onde se fornece combustível ao motor. Durante o processo de abastecimento do depósito não são efetuadas medições de consumo. Quando o reservatório se encontra cheio, a válvula de abastecimento é fechada, iniciando-se a medição da perda de massa do reservatório de uma forma expedita, simples e precisa. A quantidade de combustível perdida pelo reservatório associada ao período de tempo estabelecido permite determinar o caudal de combustível consumido pelo motor. O sistema de medida é baseado numa balança de pratos onde o movimento do braço que suporta o reservatório é feito de modo a que este não seja sujeito a histerese ou fricção. A utilização de um sensor capacitivo que deteta o movimento vertical do reservatório fornece um valor que está associado à sua massa, ou seja, à quantidade de combustível existente no seu interior, possibilitando a medição de um valor correspondente à quantidade de combustível que está a ser consumido.

De entre as várias opções que o sistema possibilita para medir o consumo, foi selecionado o modo de medição repetida com intervalos de tempo de 1 segundo. Deste modo, de segundo em segundo o valor da massa de combustível perdido pelo reservatório é adquirido e armazenado no computador, utilizando a saída analógica que este sistema disponibiliza.

O sistema integra o retorno de combustível recorrendo a um permutador de placas combustível/água. Aproveitando a existência de um circuito de água, utiliza-se este meio para arrefecer o retorno de combustível. Depois de arrefecido o combustível é enviado para a linha de abastecimento, pelo que a quantidade de combustível solicitado à balança é exatamente a diferença entre a quantidade de combustível requerida pelo motor e a quantidade de combustível proveniente do retorno. Deste modo, em cada instante, a quantidade de combustível retirado do reservatório de combustível existente no equipamento de medida corresponde à quantidade de combustível consumido no motor.

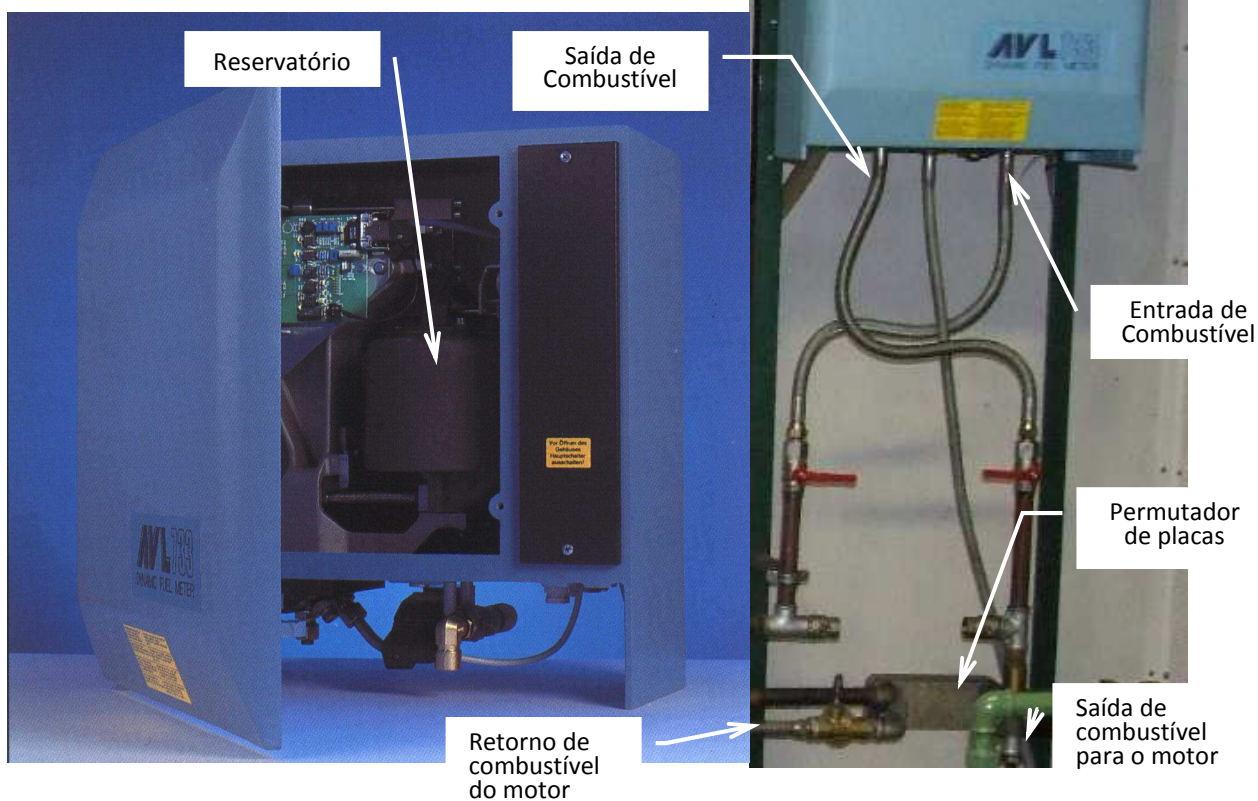


Fig. 3.7 – Balança de combustível e ligações para abastecimento do motor.

Este equipamento foi sujeito a um processo de calibração de acordo com as instruções do fabricante antes de se iniciarem as medições com cada um dos motores utilizados e ainda após um processo de reparação a que a balança foi sujeita.

3.2.3 Opacímetro

O opacímetro utilizado foi um sistema da AVL, modelo 437. Este equipamento utiliza uma câmara de medição para onde são encaminhados os gases provenientes do motor. O sistema de medição baseia-se na extinção de luz entre o emissor dessa luz e o recetor, localizados em pontos opostos da câmara que tem uma dimensão característica ($0,043 \pm 0,005\text{m}$). O emissor é uma lâmpada incandescente com uma temperatura entre 2800K e 3250K. O recetor é uma fotocélula com uma sensibilidade espectral ajustada para a curva de sensibilidade do olho humano. O sistema está projetado de modo a que a resposta do sensor seja proporcional à atenuação do feixe luminoso. Os gases na câmara de medição devem estar a uma temperatura de $100 \pm 5^\circ\text{C}$, estando o sistema equipado com um dispositivo que permite efetuar o aquecimento da câmara. O equipamento permite uma precisão de $\pm 1\%$ operando com opacidade entre 0% e 100%.

Foi necessário efetuar uma ligação na tubagem de escape de modo a colocar a mangueira que aspira os gases para a câmara de medida, voltando a ligar na saída outro tubo que possibilita libertar esses gases a montante no sistema de extração de gases.

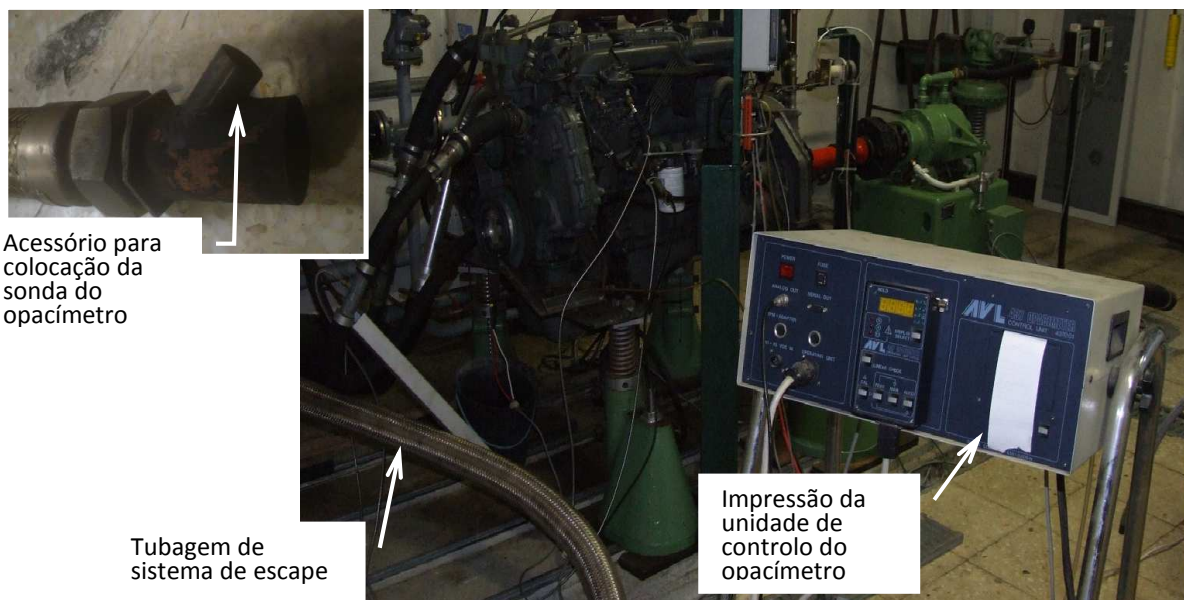


Fig. 3.8 – Opacímetro AVL 437e acessório para colocação da respetiva sonda de gases.

É disponibilizada, no equipamento, uma saída analógica de sinal correspondente à opacidade e que apresenta um valor em tensão entre 0,625 e 2,5V, com uma precisão em termos de opacidade de 0,5%. Devido a alguns problemas existentes na saída analógica foi necessário fazer impressões das medições e deste modo ter acesso às medições efetuadas.

Atendendo à menor qualidade dos resultados obtidos com um opacímetro, decidiu-se que seria preferível apostar num analisador de partículas quando houvesse orçamento para tal. Deste modo apenas nos testes estacionários do motor Volvo existem resultados de opacidade. Atendendo a que o problema não residia no sistema de medição mas no componente eletrónico responsável pela visualização e transmissão dos valores dessas medições, os resultados obtidos antes da avaria foram considerados válidos, até porque não se verificou qualquer anormalidade que motivasse alguma suspeita dessa validação.

3.2.4 Analisador de gases de escape

Para medir os níveis de emissões gasosas provenientes do escape do motor foi utilizado um analisador de gases da marca Horiba, modelo MEXA-584L, ilustrado na figura 3.9. Através da utilização deste equipamento é possível conhecer a percentagem volumétrica do monóxido de carbono (CO) [%], dióxido de carbono (CO₂) [%], oxigénio (O₂) [%], óxidos de azoto (NOx) [ppm] e hidrocarbonetos (HC) [ppm] presentes nos gases de escape. O princípio de medida para os gases CO, CO₂ e HC é por infravermelhos não dispersivos (NDIR). A medição dos valores correspondentes ao O₂ e ao NOx é realizada através de dois sensores eletroquímicos independentes.

As características associadas ao sistema de medida de cada gás estão apresentadas na tabela 3.1.

<i>Parâmetro</i>	<i>Gama de Medida</i>	<i>Resolução</i>	<i>Linearidade (maior de)</i>
O ₂ [%]	0,00 a 25,00	0,01	0,1 ou 3% do valor lido
NOx [ppm]	0 a 5000	1	25 ou 4% do valor lido (0 a 4000ppm) 8% do valor lido (4001 a 5000ppm)
CO [%]	0,00 a 10,00	0,01	0,03 ou 3% do valor lido
CO ₂ [%]	0,00 a 20,00	0,02	0,3 ou 5% do valor lido (0,00 a 8,00%) 0,4 (8,01 a 15%) 0,6 (15,01 a 16,00%) 4% do valor lido (16,01 a 20,00%)
HC [ppm]	0 a 10000 ou 0 a 20000	1 (0 a 2000) e 10 (2000 a 10000)	10 ou 5% do valor lido
Lambda (λ)	0,000 a 9,999	0,001	---

Tab. 3.1 – Principais características associadas à medição dos parâmetros disponíveis no analisador de gases.

O analisador é composto por uma sonda que deve ser colocada no sistema de escape do motor, de onde será aspirado um caudal de aproximadamente 4l/min de gases que passam por um sistema secador, sendo encaminhados posteriormente para um pré-filtro percorrendo cerca de 3m de tubagem até ao analisador propriamente dito, onde passa por um novo filtro possibilitando a disponibilização dos gases em condições apropriadas para serem efetuadas as medições de concentração de cada gás.

O equipamento tem uma saída analógica (0,0 a 1,0 V) que permite a ligação a um sistema de aquisição para gravação das concentrações de gases medidas durante o funcionamento do motor. A utilização de filtros adequados permite que o analisador funcione com fiabilidade mesmo para medição de gases de escape em motores de ignição por compressão, tendo apenas como grande constrangimento o facto de a medição de CO não ser efetuada com a precisão desejada.

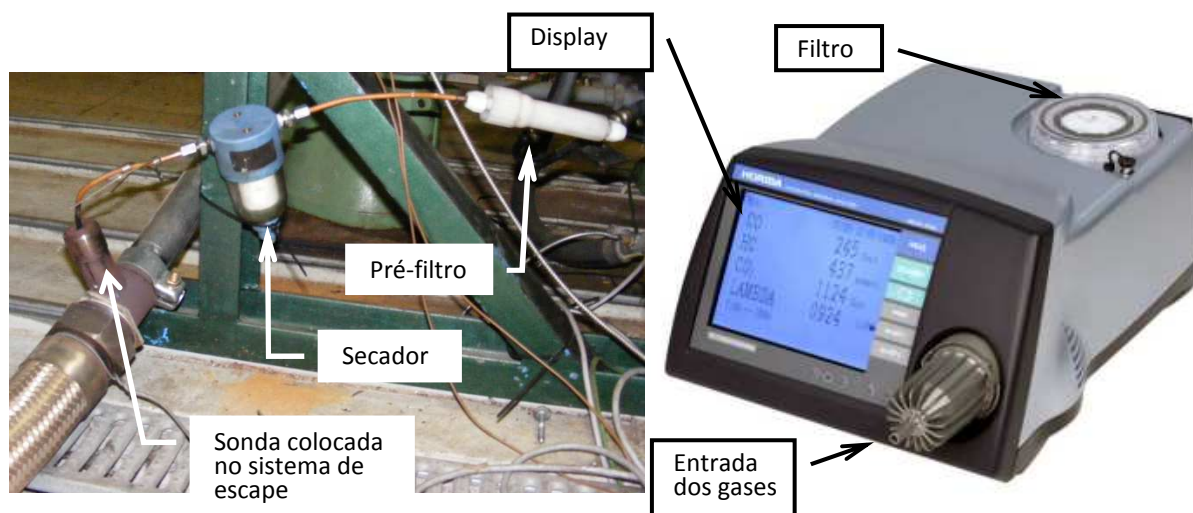


Fig. 3.9 – Analisador de gases Horiba Mexa 584L e imagem da colocação da sonda de aspiração dos gases, elemento secador e pré-filtro.

Seguindo as instruções do fabricante, foram realizadas várias calibrações ao equipamento recorrendo a garrafas de gás com concentrações pré-definidas, no ponto de zero e num ponto com as concentrações de um gás referidas como padrão pelo fabricante do equipamento (O_2 : 20,6%; CO : 9,60%; HC : 400ppm; CO_2 : 10,60%; NO_x : 2060ppm).

3.2.5 Outros sistemas de medição

A realização de ensaios em motores envolve a recolha de uma série de variáveis que são fundamentais para garantir as condições de segurança dos equipamentos, do motor e das pessoas, bem como para permitir a comparabilidade dos resultados obtidos.

São colocados no motor uma série de sensores de temperatura e pressão, representados na figura 3.10 a), que permitem efetuar a monitorização das suas condições de funcionamento do motor, permitindo constantemente a obtenção de informações sobre a temperatura e pressão de óleo do motor, temperatura de entrada e saída de água de refrigeração, temperatura e pressão do combustível, temperatura e pressão dos gases de escape e temperatura e pressão do ar admitido.

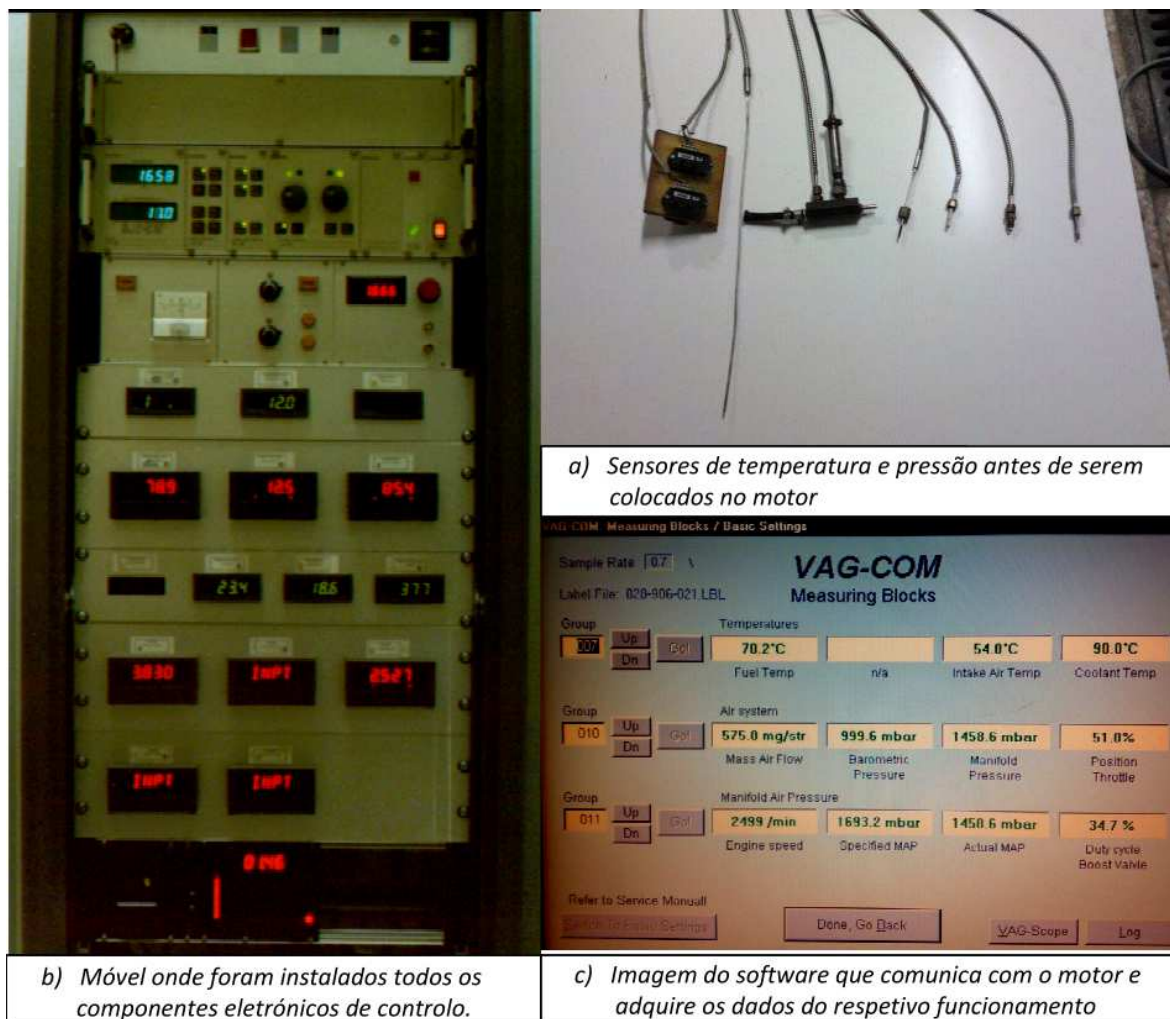


Fig. 3.10 – Representação dos sistemas de medida utilizados no banco de ensaios de motores.

Os sensores de temperatura foram calibrados na gama 0-100°C recorrendo a um equipamento com banho termostático da marca Heto, modelo 01-DBT 200 com agitador, apresentando uma resolução de 0,1°C onde foram mergulhados todos os sensores e verificada a curva ascendente e descendente com intervalos de 20°C. Os sensores de pressão foram calibrados na gama 0-7 bar (relativos) utilizando um calibrador de pressão da marca Druck, modelo DPI 603, com resolução de 0,001bar, sendo efetuadas verificações ascendentes e descendentes com intervalos de 0,5bar.

Os sensores que estão afetos ao sistema de aquisição do banco de ensaios estão ligados a mostradores digitais no módulo onde se encontram todos os sistemas de controlo eletrónico dos equipamentos do banco de ensaios (fig. 3.10-b), disponibilizando saídas analógicas que podem ser utilizadas para canalizar essa informação através de uma placa de aquisição ligada num computador. Apesar dessa possibilidade, foi ainda utilizado no caso do motor VW, um sistema de aquisição que adquire dados através da ficha OBD (*On-Board Diagnostics*). Este sistema disponibiliza esses dados diretamente para um computador equipado com um software adequado (fig.3.10-c), onde são guardadas as informações obtidas desse modo, como sejam rotação do motor, posição do acelerador, pressão na conduta de admissão, pressão barométrica, massa de ar admitida, temperatura de combustível, do ar de admissão e do líquido de refrigeração.

Com esta duplicidade é possível obter maior dedicação do sistema de aquisição para as variáveis principais, utilizando o sistema ligado à OBD para efetuar o arquivo das informações relativas ao seguimento do funcionamento do motor.

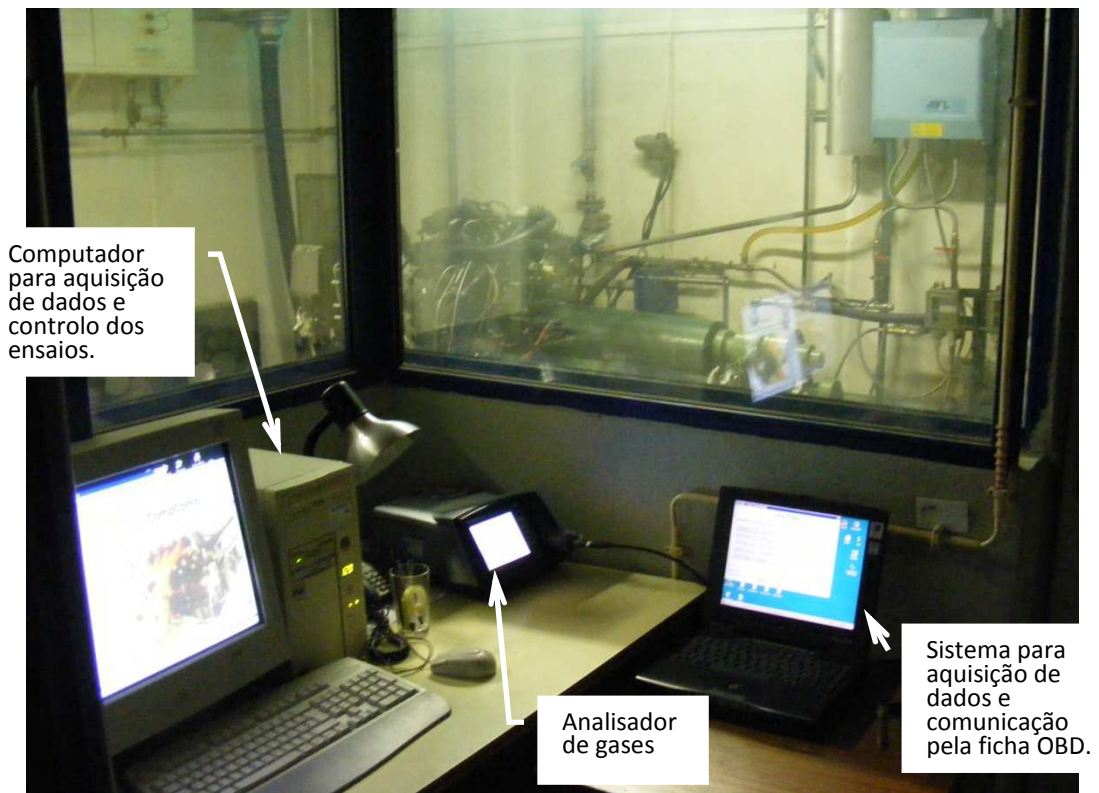


Fig. 3.11 – Imagem da sala de controlo onde são visíveis os sistemas de aquisição e controlo.

3.2.6 Software CompComb

O software denominado “CompComb” foi desenvolvido em linguagem “TestPoint”, sendo especialmente vocacionado para a realização de ensaios em banco de motores considerando a comparação de diferentes combustíveis. Na execução do programa, após uma janela inicial de apresentação, abre uma segunda janela onde é solicitado ao utilizador que preencha os campos destinados às características do motor e às características do combustível. Apenas após o preenchimento destes campos será possível avançar para a realização de qualquer ensaio. Este processo, que pode ser facilitado pela disponibilização de uma ferramenta que armazena os dados inseridos e possibilita a utilização desses dados para o preenchimento expedito dos campos respetivos, permite identificar os resultados com o motor e o combustível utilizados, mas permite ainda garantir a utilização dessas informações para estabelecer avisos ou ações de segurança, no caso de serem atingidos determinados valores registados como limites.

Após este processo, o utilizador pode seleccionar o tipo de ciclo que pretende impor ao motor, de entre 6 opções, 5 automatizadas e 1 de controlo manual.

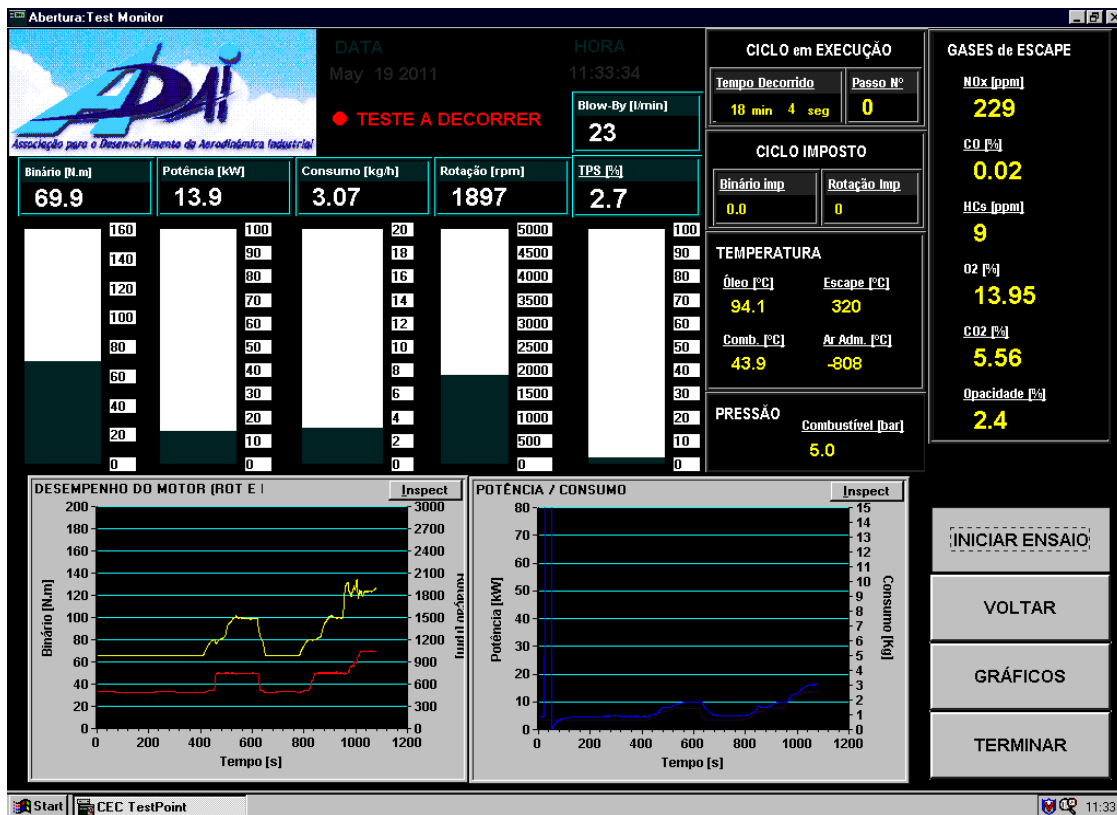


Fig. 3.12 – Imagem da janela de monitorização do software CompComb.

A seleção do ciclo promove a abertura de uma outra janela, onde surge de imediato a possibilidade de guardar ou não as informações relativas a esse ensaio, definindo desde logo quais os parâmetros ambientais (temperatura e humidade) e qual a taxa de aquisição pretendida para evitar a estruturação de ficheiros demasiado grandes ou a ocorrência de falta de informação, quer a taxa seja demasiado elevada ou demasiado baixa respetivamente.

Após esta seleção é então disponibilizada ao operador a janela principal de monitorização dos ensaios (figura 3.12). É nesta fase que pode ser dado início ao ensaio, sendo possível acompanhar o desenrolar do mesmo com a monitorização das diversas variáveis de funcionamento de forma numérica ou gráfica. É ainda possível analisar os valores correspondentes às emissões de escape, ao consumo de combustível, à posição relativa do acelerador (TPS) e ao tempo de ensaio decorrido que está associado ao passo específico do ciclo de ensaio e às variáveis impostas.

O sistema de aquisição está vocacionado para realizar a recolha de 1000 amostras por cada canal à frequência de 100000Hz, permitindo definir para cada parâmetro um valor correspondente à média desses 1000 valores. Esse valor é posteriormente utilizado, disponibilizando a informação para monitorizar os parâmetros numérica e graficamente e construir o ficheiro de dados num processo independente. Deste modo, o processo de aquisição torna-se mais fiável e mais expedito.

O controlo de todo o sistema é realizado recorrendo à avaliação temporal. Para cada intervalo de tempo estipulado são definidos valores de saída em tensão correspondentes aos parâmetros de

binário e rotação pretendidos. Estes parâmetros são definidos antes da realização dos ensaios e testados em termos do comportamento do motor e do modo como ocorrem as transições em modo manual, sendo posteriormente implementadas de forma a poderem ser efetuadas de forma automatizada, com vantagens ao nível da execução, registo de dados, repetibilidade e fiabilidade do cumprimento do ciclo.

Uma representação do sistema de medida implementado no banco de ensaios de motores é visível na figura 3.13.

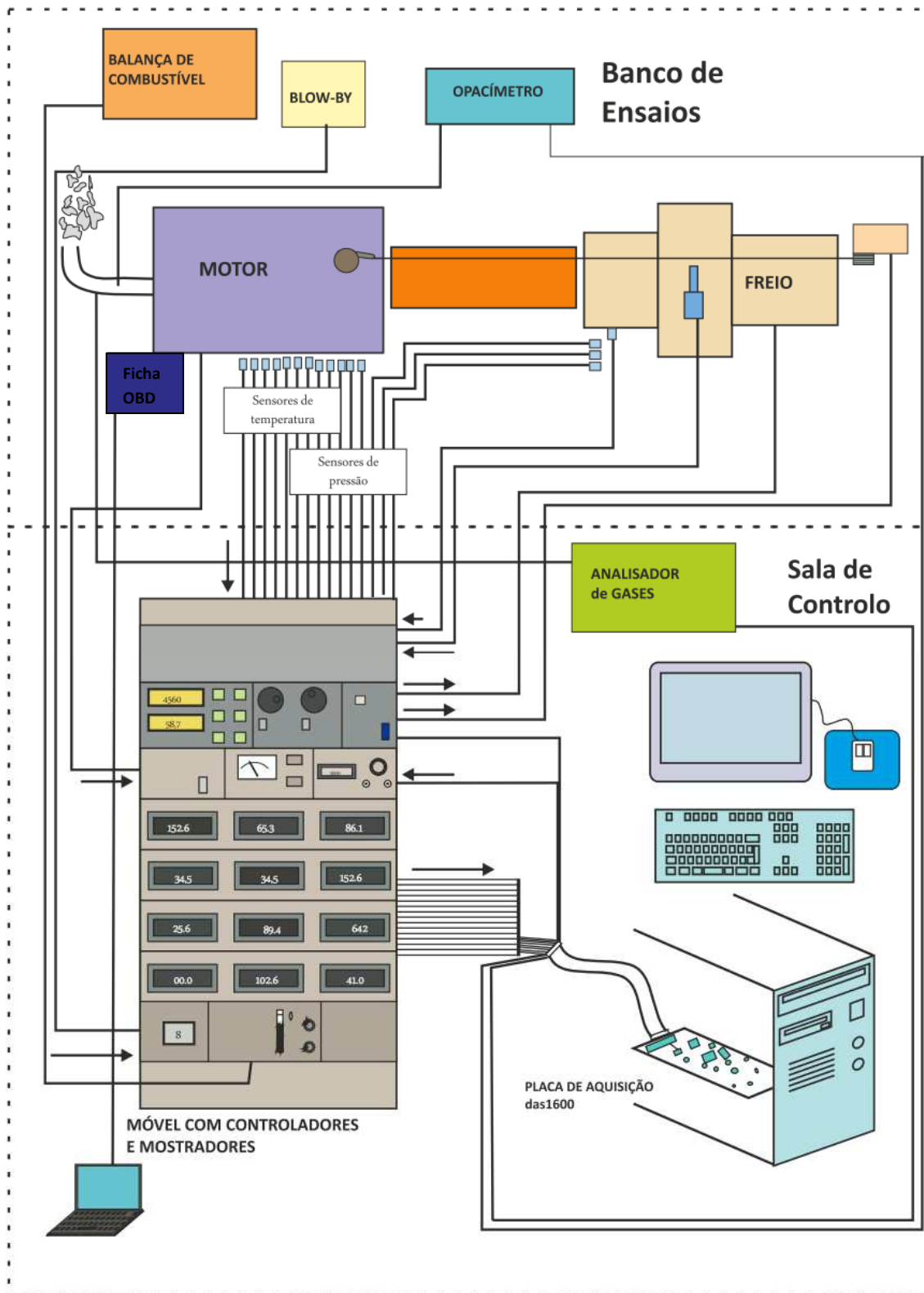


Fig. 3.13 – Esquema representativo do sistema de aquisição de dados e controlo do banco de ensaios de motores.

3.3 Ensaios de veículos em banco de rolos

Os ensaios com veículos em banco de motores, que permitem avaliar, entre outros aspetos, o comportamento dos motores, foram realizados no Laboratório de Engenharia Automóvel da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria.

O banco de rolos é composto por dois dinamómetros, um por cada um dos dois eixos, permitindo medir o binário e a velocidade de rotação dos rolos. Com este sistema é possível ainda obter mais alguns dados sobre o funcionamento do veículo, através da utilização de alguns sensores complementares, como por exemplo para medir a rotação do motor e a temperatura do óleo.

Para além do banco de rolos propriamente dito, existem alguns recursos anexos que permitem obter mais informações sobre o decurso dos ensaios, como sejam o consumo de combustível, recorrendo a uma balança e a medição de mais algumas temperaturas e pressões. O sistema de aquisição funciona com base numa aplicação computacional desenvolvida na plataforma de programação Labview.

Recorrendo a este sistema, foi possível realizar alguns ensaios que, para além de fornecerem indicadores importantes ao nível direto dos resultados, fundamentalmente contribuíram para aumentar a qualidade e fiabilidade dos dados obtidos nos testes realizados em estrada.

3.3.1 Banco de rolos

O banco de rolos é o equipamento fundamental na realização de ensaios em veículos. Apesar de ser reconhecida alguma perda de precisão nos resultados relativamente aos ensaios em banco de motores, essencialmente pelo facto de os valores correspondentes ao funcionamento do motor serem obtidos por via indireta, é contudo um método mais fácil e expedito para avaliar a performance e as características do motor. Na realidade, a preparação e colocação de um veículo em condições de ensaio é feita em pouco tempo, menos de uma hora, enquanto são necessários vários dias para se poder preparar uma instalação para realizar ensaios num motor. No entanto, num banco de rolos é feita a medição da potência das rodas motrizes, existindo vários componentes desde as rodas ao motor, introduzindo influências não completamente controladas nos resultados obtidos.

O sistema utilizado, cuja fotografia se apresenta na figura 3.14, é um banco de rolos da marca Maha, modelo LPS 2000 - R100/2, com capacidade para ensaiar veículos com tração nos dois eixos. Atendendo ao facto de a capacidade de carga por eixo estar limitada aos 2850kgf, apenas pode ser utilizado por veículos ligeiros. Os dois dinamómetros utilizados são elétricos, com capacidade para absorver até 260kW cada um recorrendo ao princípio magnético (*eddy current*). Deste modo, no caso de os veículos de teste terem 2 eixos com tração, é possível avaliar até um máximo de 710cv, no caso de se tratar de um veículo com tração apenas num dos eixos, a potência máxima fica limitada a 335cv. A velocidade máxima permitida por este sistema é de 260km/h. Um dos fatores que também limita a utilização deste equipamento é a componente de arrefecimento, uma vez que, apesar de os ensaios a veículos poderem ser realizados até velocidades de 260km/h, o ventilador de arrefecimento apenas permite uma velocidade máxima do ar de 98km/h. Deste modo, para velocidades superiores a este valor, não é possível assegurar a simulação das condições de refrigeração do motor que ocorrem na utilização normal do veículo em estrada.



Fig. 3.14 – Imagem do banco de ensaios instalado no Laboratório de Eng^a Automóvel (IPL).

O banco de rolos utilizado tem capacidade para efetuar as seguintes avaliações:

- Potência máxima instantânea
- Potência a regimes de rotação predefinidos
- Potência a velocidades predefinidas
- Simulação de cargas (peso, aerodinâmica, declive)
- Recuperações
- Calibração do odómetro (conta-quilómetros) instantâneo e totalizador
- Calibração do taquímetro (conta-rotações)
- Análise de emissões em carga

O funcionamento deste equipamento é baseado na obtenção do valor de binário transmitido ao rolo pela roda do veículo em ensaio, rolo este que está solidário com o dinamómetro. No dinamómetro é aplicada uma força de travagem que contraria a força imposta pela roda do veículo. O binário de travagem é medido com base na força exercida por um elemento solidário com o estator do freio e fixo numa célula de carga colocada a uma distância “ b ” do eixo de rotação dos rolos, conforme demonstrado na figura 3.15.

De modo ao banco de rolos conseguir impor ao sistema propulsor do veículo testado condições mais semelhantes às verificadas na circulação em estrada, devem ser utilizadas algumas informações que permitam impor a carga a que o veículo estará sujeito quando circula a uma determinada velocidade em trajeto reto e plano. É também possível ajustar o esforço de modo a simular um declive. Deste modo, na utilização do banco nestas condições, será necessário fornecer o valor da massa do veículo e do coeficiente de arrasto aerodinâmico de modo a ser possível ao sistema impor a correspondente

resistência aerodinâmica. Antes da realização do ensaio é também necessário avaliar a resistência de rolamento do sistema o que pode ser efetuado embalando o veículo a uma dada velocidade e desembrando. Este processo permite que o sistema detete as perdas de rolamento do veículo, embora não seja possível avaliar as perdas totais na transmissão.

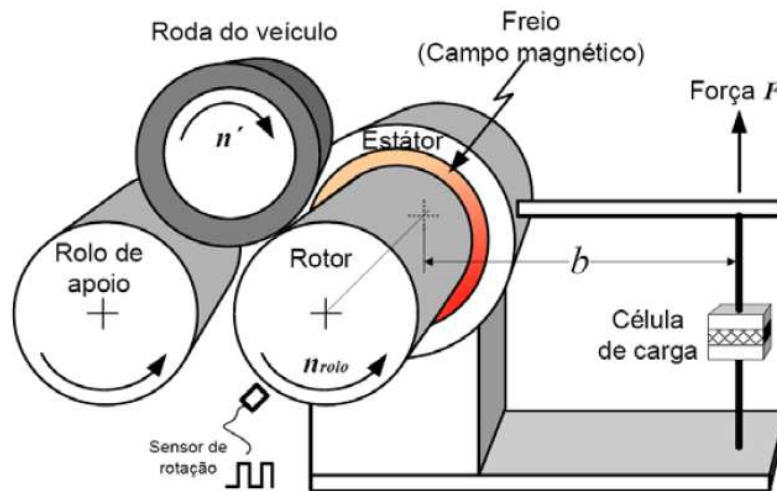


Fig. 3.15 – Princípio de medição da potência com banco de ensaios de rolo utilizando um dinamómetro com funcionamento magnético.

3.3.2 Balança para medição de consumo de combustível

A realização de ensaios no banco de rolos visava essencialmente aferir o comportamento dos equipamentos a utilizar nos ensaios em estrada. Contudo, atendendo a que a utilização deste equipamento permitia efetuar outro tipo de análise específico sobre a utilização de biodiesel, foi aproveitado esse facto e a circunstância de todo o esquema de montagem estar já preparado, para realizar uma avaliação energética e de emissões de poluentes nos veículos de teste.

Para tal, foi utilizada uma balança de precisão da marca Mettler Toledo, modelo FS7001 – F, com capacidade até 7100g, com resolução de 0,1 g. Em cima desta balança é colocado um recipiente de vidro de onde é aspirado o combustível para o motor do veículo de teste e para onde é efetuado o retorno do combustível proveniente do motor desse veículo. Mais uma vez se reforça a importância de utilizar um método gravimétrico na medição do consumo, o que permite obter um valor mais preciso relativamente às variações de densidade, ainda reforçado pelo facto de se estarem a comparar combustíveis com diferentes valores de massa volúmica, como é o caso do gasóleo e o biodiesel.

Para evitar que as vibrações devidas ao funcionamento do motor afetassem o registo da balança, foi utilizada uma montagem que permite que as tubagens estejam a aspirar o combustível e fazer o retorno do combustível sem contacto com o recipiente colocado em cima da balança, conforme pode ser analisado na figura 3.16. Ainda foi realizada a medição da temperatura do combustível de modo a que esta não tivesse influência sobre o consumo. Deste modo, os ensaios só foram realizados com a temperatura do combustível estabilizada e num intervalo de temperaturas bastante restrito, não havendo variações de temperatura entre ensaios superiores a 5°C. Através da realização de ensaios nas mesmas condições, com o mesmo veículo e mesmo combustível, verificou-se que com diferenças até 5°C no combustível, não era possível detetar quaisquer diferenças ao nível do consumo.

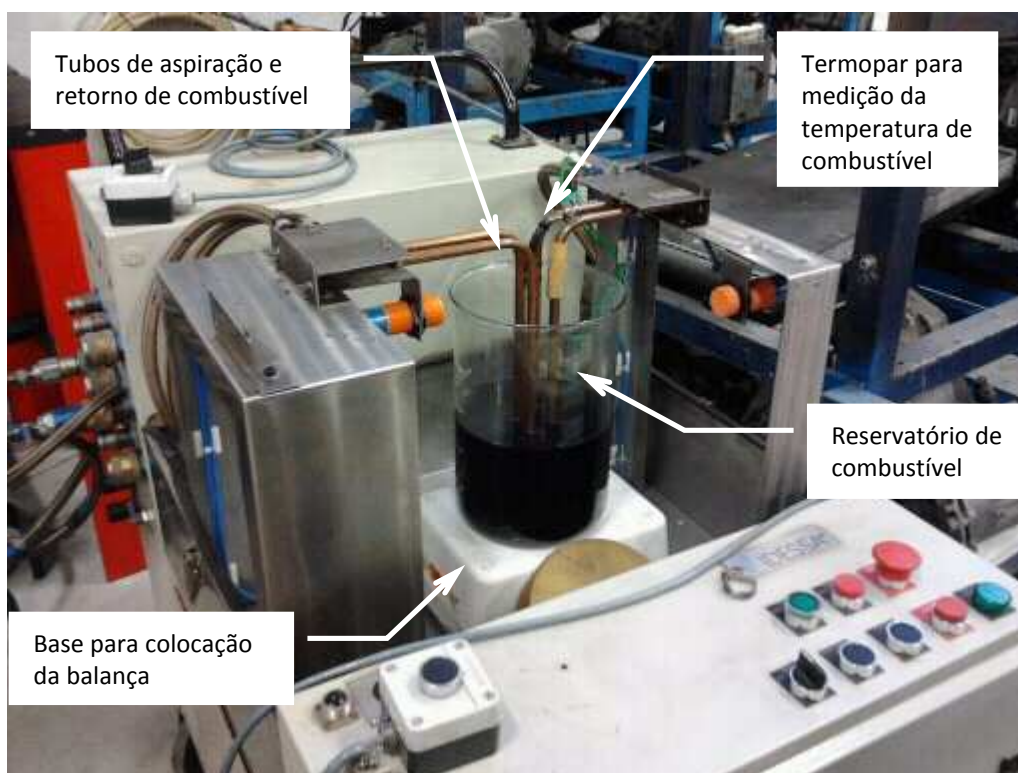


Fig. 3.16 – Imagem do sistema utilizado para medição do consumo de combustível nos ensaios em banco de rolos.

3.3.3 Software

De modo a diminuir o tempo de realização dos ensaios e para aumentar o grau de fiabilidade e precisão dos resultados, foi implementado um sistema de aquisição que permitia registar vários parâmetros de ensaios que não estão controlados pelo sistema de aquisição do próprio banco de rolos. Deste modo, foi desenvolvido por alunos do curso de Engenharia Automóvel um software em LabView para efetuar a aquisição de dados que permitia efetuar de entre outros, o registo da temperatura de combustível e o registo do valor indicado pela balança, possibilitando a obtenção da curva de consumo. Este sistema foi utilizado para os ensaios realizados no banco de rolos, permitindo efetuar um seguimento temporal do decaimento da massa de combustível à medida que

os ensaios eram efetuados e paralelamente adquirir a informação correspondente à temperatura de combustível. Para este efeito, embora não se tivessem utilizado os sinais de todos os sensores que o software estava preparado para adquirir, foi ainda efetuada uma pequena alteração com a inclusão de um marcador que possibilitou a identificação da mudança de regime.

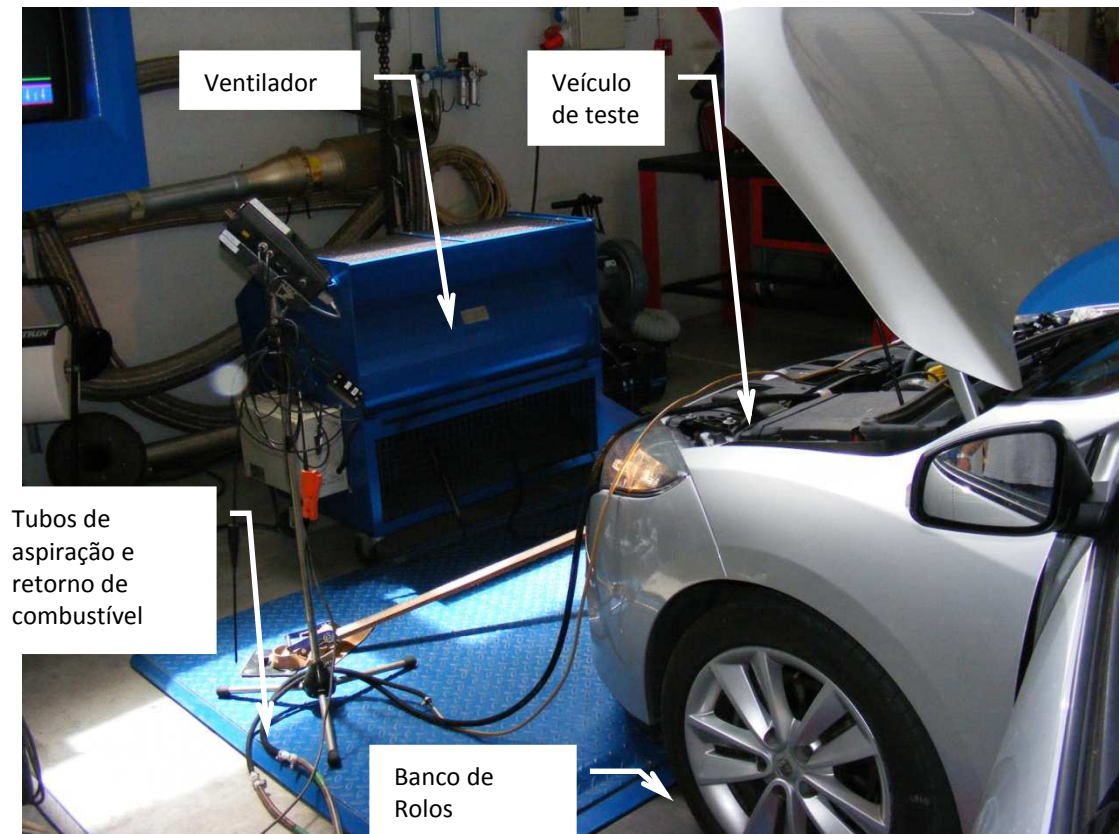


Fig. 3.17 – Instalação experimental com o veículo no banco de rolos no laboratório de Engª Automóvel.

3.4 Ensaios em veículos em circulação em condições reais de estrada.

A utilização de novas tecnologias de informação permite o estabelecimento de novas ferramentas para análise do desempenho de veículos em condições reais de estrada. O número de sensores e sistemas instalados atualmente nos veículos e ligados à unidade de controlo eletrónico (ECU *Electronic Control Unit*), traduz-se numa grande quantidade de informação disponível. Desde o final do último século, todos os construtores de veículos automóveis ligeiros e pesados equipam esses veículos com o sistema OBD (*On-Board Diagnosis*). Este sistema foi desenvolvido como uma ferramenta de controlo das emissões dos veículos, correspondendo a um método de comunicação que utiliza um determinado protocolo para transferir dados da ECU.

Existem diversos protocolos de comunicação utilizados pelos vários fabricantes. Alguns utilizam o protocolo SAE J1850 VPW (*Variable Pulse with Modulation*), enquanto outros utilizam o mesmo código mas considerando outro modo de comunicação SAE J1850 PWM (*Pulse With Modulation*). Um outro protocolo mais usado nos veículos europeus e asiáticos é normalizado pela ISO 9141 que evoluiu para ISO 14230 KWP (*Key Word Protocol*). Hoje em dia o protocolo ISO 15765 CAN tornou-se o sistema mais utilizado. Foi desenvolvido tendo em consideração a utilização de uma arquitetura de comunicação em rede CAN (*Control Area Network*).

O sistema OBDII consiste numa evolução tecnológica do primeiro e mais rudimentar sistema de comunicação OBDI. Este novo sistema utiliza uma ficha de ligação com uma configuração perfeitamente definida, tendo sido instalado obrigatoriamente em todos os veículos fabricados a partir de 1996. Na Europa este sistema tornou-se obrigatório para os veículos alimentados a gasolina, e, desde 2004, para os veículos que consomem gasóleo. Utilizando um sistema de comunicação com a correspondente ficha OBDII é possível obter a informação sobre o comportamento do veículo, incluindo alguns dos parâmetros mais relevantes de funcionamento do motor, bem como aceder aos códigos de erros desde a última intervenção.

Hoje em dia, o sistema GPS (*Global Positioning System*) traduz-se pela grande vantagem de oferecer grande disponibilidade e precisão mesmo para o utilizador menos experimentado. Este sistema utiliza 24 satélites, cada um efetuando uma órbita com a duração de 12h. A sua distribuição espacial permite que, em cada ponto da Terra, num ângulo de 15º de abertura, seja possível ter no mínimo acesso a 4 satélites. Mesmo perante esta condição, a probabilidade de num dado ponto da Terra ter acesso a 5 ou mais satélites é bastante elevada.

O princípio de funcionamento do sistema GPS baseia-se no facto de cada satélite emitir em permanência um sinal, com uma dada frequência na direção da Terra. Esta frequência é sempre um múltiplo de 10,23Hz. O sistema pode ser utilizado através de dois níveis de acesso diferenciados. O modo mais comum, acessível ao cidadão anónimo, conhecido como “modo civil”, sendo menos preciso, utiliza um protocolo C/A (*Coarse / Acquisition*). O outro modo é designado por “P-Code” (*Precision Code*), que sendo bastante mais preciso, não está acessível para todos, tendo mesmo restrições apertadas de segurança, estando destinado apenas a utilizações militares.

O posicionamento GPS corresponde a um par de valores associados à longitude e latitude num sistema geo-referenciado na Terra. Para obter este par de valores tem de ocorrer uma sequência de processos. O satélite está permanentemente a emitir dois sinais rádio à velocidade da luz. Estas

ondas eletromagnéticas são geradas por um relógio atômico muito preciso com duas frequências diferentes. O recetor necessita de captar os sinais do satélite e correlacionar esse sinal com o sinal gerado internamente. Através deste procedimento é possível determinar o tempo que o sinal proveniente do satélite demorou até percorrer o espaço que separa o emissor do recetor. Conhecendo o tempo e a velocidade (igual à velocidade da luz) é possível determinar a distância que separa o satélite do recetor através da simples multiplicação destes dois valores. O conhecimento da distância entre os dois equipamentos estabelece uma calote esférica ao redor do satélite como possibilidade para a localização do recetor. Contudo, cruzando esta informação com a que é obtida pelo mesmo recetor captando o sinal de pelo menos mais três satélites, torna-se possível definir um único ponto no espaço que corresponde ao cruzamento das esferas obtidas, correspondente à localização do recetor.

Com boa acessibilidade aos satélites e com um recetor GPS é possível dispor de um método que permite determinar a velocidade de um veículo. A precisão dessa medição depende do número de satélites a que se tem acesso e da frequência de aquisição do sistema GPS associado ao recetor, uma vez que a determinação da velocidade é realizada dividindo a distância linear coberta entre dois pontos correspondentes a duas aquisições consecutivas pelo tempo necessário para percorrer este percurso elementar. Considerando a combinação da informação relativa ao funcionamento do veículo obtido via OBD com a verificação posicional, é possível agrupar informações importantes relativamente ao comportamento do veículo em determinadas condições de estrada, o que se torna numa ferramenta extremamente útil para caracterizar o desempenho de veículos.

3.4.1 Sistema de aquisição de dados com ligação OBDII e GPS

O equipamento selecionado para efetuar a aquisição de dados via OBDII e a captação do sinal GPS foi uma unidade DashDyno SPD da marca Auterra (figura 3.18). Este sistema reconhece o veículo ao efetuar a ligação na ficha OBDII e, utilizando um cartão de memória tipo SD com 1GByte de capacidade, pode reconhecer e armazenar informações correspondentes a 16 diferentes sinais, incluindo rotação do motor, velocidade do veículo, carga calculada, quantidade de combustível injetado, tempo e distância percorridas, massa de ar e pressão de ar admitidas (MAF e MAP), entre outras. Ligando o sistema de registo de dados a um recetor GPS torna-se também possível armazenar as coordenadas associadas à posição do veículo e a quantidade de satélites a que o recetor teve acesso para cada ponto de localização definido.

O recetor GPS selecionado para associar ao sistema DashDyno é da marca Garmin, modelo x18. A alimentação elétrica para a unidade de comunicação e aquisição DashDyno era assegurada diretamente pela ficha OBD II do veículo, enquanto o recetor GPS era alimentado a 12V pela ficha de isqueiro também disponível no veículo.

Os dados obtidos pelo sistema de aquisição são armazenados num ficheiro com formato específico do sistema DashDyno, podendo ser lido utilizando um software fornecido pelo fabricante do equipamento. Este software permite a visualização gráfica e analítica dos resultados, permitindo ainda estabelecer a ligação com o software Google Earth, onde é representado o trajeto percorrido pelo veículo a que correspondem os dados de desempenho obtidos. É também possível exportar o ficheiro de dados com o formato "csv" (*comma separate value*) que é reconhecido pelo software

Microsoft Excel. Através deste software é possível aceder a todos os dados de modo a poder processá-los e utilizá-los através da análise mais apropriada ao fim ambicionado, estabelecendo as correlações mais apropriadas.

A utilização deste equipamento em banco de rolos permite obter várias informações relativas ao funcionamento do veículo e fazer uma verificação dos valores fornecidos pelo veículo, relativamente aos obtidos no equipamento laboratorial. Neste processo verificou-se que a utilização do valor de consumo de combustível fornecido pelo veículo através da ficha OBD II implicaria erros substanciais relativamente ao valor correto obtido pela balança, pelo que não foi considerada esta informação obtida pela ficha OBDII. Relativamente aos valores de rotação do motor e de velocidade, constatou-se que efetivamente a informação na ficha OBD II dos veículos correspondia aos valores obtidos pelo banco de rolos, com erros perfeitamente desprezáveis.

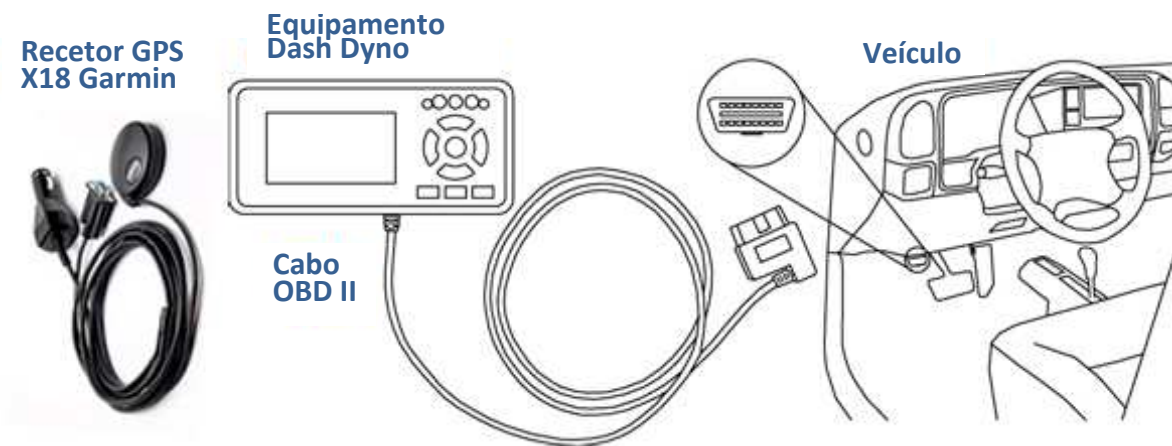


Fig. 3.18 – Imagem do sistema utilizado para aquisição de dados pela ficha OBD II e de GPS.

3.4.2 Metodologia associada à realização de ensaios em estrada

Conforme já referido no capítulo anterior, a realização de ensaios em estrada é complexa e impõe uma série de problemas ao nível do controlo das condições, o que torna muito difícil a sua realização de modo a poder confiar nos resultados obtidos por esta via.

Grande parte dos resultados publicados relativamente à utilização de diferentes combustíveis em veículos refere a utilização de ensaios em banco de motores ou banco de rolos. Cada um destes métodos apresenta vantagens e acarreta alguns problemas. A utilização de um banco de ensaios de motores permite o estudo de um motor em condições muito bem controladas e de acordo com as especificações, com grande precisão e repetibilidade. Contudo este tipo de equipamentos apresenta bastantes constrangimentos na extrapolação dos resultados para as condições normais e reais de funcionamento de um motor, quando equipa determinado veículo sujeito às opções de um condutor e às condições ambientais, geográficas e de tráfego existentes. A utilização de um banco de rolos permite incorporar nos resultados os condicionalismos provocados pela agregação do motor num veículo, mantendo o controlo sobre as condições que se pretendem garantir, não sendo todavia tão preciso quanto o banco de ensaios de motores e mantendo os restantes constrangimentos

associados à utilização real de um veículo, como a resistência aerodinâmica e os condicionalismos de tráfego e atmosféricos.

Deste modo, os testes realizados em estrada em circulação normal são os que melhor traduzem os condicionalismos de tráfego, ambiente, condutor, veículo e da própria estrada, tendo contudo o grande inconveniente de não ser possível assegurar as condições impostas numa instalação laboratorial.

A metodologia para realização de ensaios de estrada que se apresenta, baseia-se no princípio de tentar levar o laboratório com o veículo, assegurando a necessária precisão nos resultados, aproveitando o facto de atualmente os veículos virem equipados com uma grande variedade e quantidade de sensores e disponibilizar essa informação através da ficha OBDII.

O controlo eletrónico de veículos e as mais recentes evoluções dos motores, nomeadamente ao nível dos sistemas de injeção de combustível e de controlo das emissões, conduziram a um significativo aumento da sensibilidade do comportamento dos veículos às condições de estrada impostas. A título de exemplo, referem-se os resultados obtidos por André, Joumard, et al. (André, Joumard, et al. 2006), onde é verificado que a utilização de um ciclo padronizado como o ciclo europeu NEDC conduz a uma penalização dos veículos menos potentes ao nível do consumo e das consequentes emissões de CO₂, o que já não acontece com o tipo de ciclo desenvolvido por este grupo de investigação, o ciclo ARTEMIS.

O trabalho já desenvolvido utilizando as técnicas descritas para realizar ensaios em estrada (Serrano, Costa e Silva 2010) demonstrou algumas das potencialidades permitidas pela utilização da metodologia a implementar com a utilização de ferramentas de comunicação com o veículo e da utilização simultânea de GPS.

Foram considerados 3 tipos de circuitos: um urbano, com variações mais frequentes de velocidade e de relação de caixa, feito a uma velocidade média baixa, com uma parte significativa do tempo com o motor ao ralenti; um extra-urbano, onde ocorrem também alterações de regime, mas com menos frequência do que no circuito urbano e com uma velocidade média mais alta; um circuito em auto-estrada, onde o regime de funcionamento do motor é quase só alterado pelos diversos declives da estrada, sendo feito a uma velocidade média elevada e sem grandes variações.

Verifica-se que a recolha de informação relativa aos vários parâmetros que caracterizam o comportamento do veículo, num determinado percurso, associado às coordenadas geográficas desse percurso, pode fornecer um contributo interessante ao nível da avaliação energética sobre a solução mais adequada para uma dada necessidade de mobilidade terrestre.

Atendendo aos problemas associados com a questão energética, mais vinculados na área dos transportes, este será um dos aspetos onde diferentes soluções energéticas serão implementadas e testadas, sendo claramente necessário utilizar as ferramentas mais adequadas. Tem-se verificado igualmente um grande esforço pelo desenvolvimento de equipamentos embarcados, ligados aos veículos, com capacidade de avaliar padrões e estilos de condução, comportamentos dos condutores, necessidades e consumos energéticos dos veículos e emissões de gases de escape. A medição dos parâmetros de funcionamento do veículo em circulação real, correlacionada com as coordenadas geográficas do percurso utilizado, gera uma quantidade de informação que, analisada corretamente, pode constituir-se como uma ferramenta importante para definir a melhor solução energética para uma determinada necessidade de transporte.

A solução apresentada por Serrano, Costa e Silva, 2010 (Serrano, Costa e Silva 2010) provou ser uma metodologia barata e fácil para adquirir e processar a informação obtida em testes de veículos quer em banco de rolos, quer em estrada. Esta metodologia considera a utilização do sistema de sensorização, gestão e arquitetura de comunicação do veículo associado a algum equipamento de aquisição e georreferenciação disponível no mercado, para avaliar o comportamento do veículo quando sujeito a determinadas condições de funcionamento.

Com o conhecimento e experiência adquiridos neste processo, foi utilizada a metodologia já referida, tendo-se otimizado processos e ajustado procedimentos para a utilização dos equipamentos, considerando o estudo sobre a utilização de biodiesel face à utilização de gasóleo, considerando as três tipologias de percurso mais usuais, circuito urbano, extra-urbano e em auto-estrada. A metodologia adotada e o modo de implementação serão apresentados previamente à apresentação dos resultados, no capítulo 4.

3.4.3 Pesagem de combustível

No processo de medição do consumo de combustível, através da pesagem do reservatório de combustível antes e após cada trajeto, foi necessário recorrer a uma balança de precisão existente no Laboratório da ADAI que permitia uma resolução de 0.002kg, numa gama de medição de 0 a 15kg (figura 3.19). Esta balança da marca AND, modelo AH-15K, foi verificada em toda a gama, através da utilização de várias massas que foram por sua vez verificadas numa outra balança do mesmo fabricante, modelo FX 3000i, com uma gama de utilização de 0 a 3,2kg, apresentando uma resolução de 0,01g. A utilização desta balança mais pequena e mais precisa permitiu definir 6 diferentes massas cujo valor foi determinado pela média de 3 ensaios realizados para cada uma, sem que as variações entre medições fossem significativas. Esta metodologia permitiu definir 6 diferentes massas:

M1= 499.05 g

M2= 999.67 g

M3= 2002.43 g

M4= 2999.06 g

M5= 1779.37 g

M6= 1776.78 g

A conjugação destas 6 massas permitiu cobrir a gama de medição da balança desde um valor mínimo de 0.499 kg até ao valor máximo de 14.588kg. Conforme é visível no gráfico apresentado na figura 3.20, a utilização da balança considerada permitia oferecer a precisão e fiabilidade necessária para os objetivos pretendidos, garantindo um erro muito baixo, sempre abaixo de 0,2%.



Fig. 3.19 – Balança utilizada na pesagem do combustível nos ensaios em estrada.

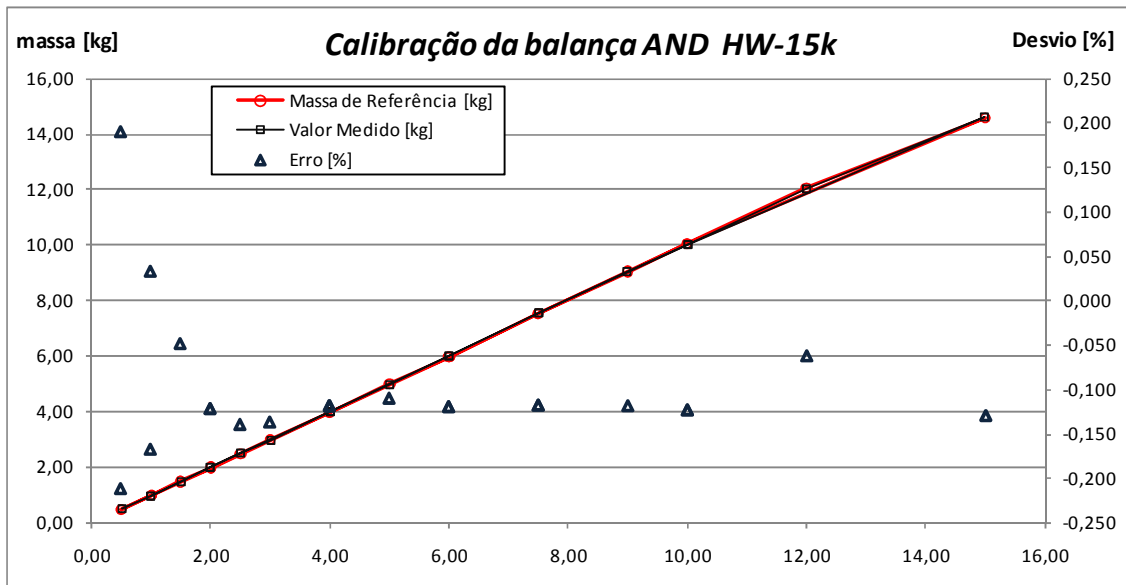


Fig. 3.20 – Representação gráfica dos resultados obtidos no processo de calibração da balança utilizada na medição de massa de combustível nos ensaios em estrada.

3.5 Propriedades dos combustíveis utilizados

Os combustíveis utilizados nos testes realizados foram todos fornecidos pela empresa PRIO ENERGY. Foram utilizados 3 combustíveis base diferentes. Gasóleo, biodiesel de soja e colza e biodiesel de soja e palma.

O gasóleo utilizado não tinha qualquer quantidade de biodiesel. Atendendo a que na fase de realização dos trabalhos, o gasóleo comercial já incorporava uma dada quantidade de biodiesel, entre 2 a 3% segundo informação da GALP, e não sendo possível obter dados precisos sobre a quantidade e matéria-prima de biodiesel nesse tipo de gasóleo, foi disponibilizado para os vários ensaios gasóleo sem biodiesel (B0).

Relativamente aos combustíveis de origem vegetal, foram utilizadas dois tipos diferentes, em função da altura em que se previa a sua utilização. Nos ensaios realizados no banco de ensaios com o motor de um veículo pesado, que decorreram no Inverno, foi utilizado um biodiesel transesterificado a partir de um óleo composto por 60% de colza e 40% de soja. O biodiesel utilizado nos ensaios de veículos ligeiros ou no motor de um veículo ligeiro, realizados maioritariamente no verão, foi obtido a partir de óleo vegetal composto por 86.5% de soja e 13.5% de palma. As tabelas relativas às características destes combustíveis estão disponíveis no capítulo 4.

As misturas contendo uma parte de biodiesel incorporado no gasóleo foram feitas utilizando os combustíveis base, utilizando dois copos graduados, com capacidade de 2 dm³. Normalmente eram feitos 10 dm³ de cada mistura de cada vez, utilizando uma proporção volumétrica. Pode referir-se como exemplo que, para a constituição de 10 dm³ de B20, foram medidos 8 dm³ de gasóleo, onde se misturaram 2 dm³ de biodiesel.

Para avaliar se com a utilização de diferentes misturas podia ser assumida uma variação linear das propriedades mais relevantes como eram a viscosidade, densidade e poder calorífico, estes parâmetros foram analisados garantindo a caracterização dos combustíveis utilizados. A análise da forma como variam as propriedades referidas de acordo com a quantidade de biodiesel misturado no gasóleo é apresentada nos sub-capítulos que se seguem.

Uma vez que estes parâmetros já foram discutidos no capítulo 2, será no presente contexto feita apenas a descrição do método e equipamento utilizado nas medições para obtenção dos valores de cada uma das propriedades e serão traçados alguns comentários sobre os resultados obtidos.

3.5.1 Viscosidade

Para a medição da viscosidade e da determinação da variação deste parâmetro com a quantidade de biodiesel utilizado no combustível, bem como avaliar o efeito da temperatura nessa variação, foi utilizado um equipamento existente no laboratório pertencente ao Departamento de Engenharia Química da Faculdade de Ciência e Tecnologia da Universidade de Coimbra. Para este equipamento, um viscosímetro rotativo da marca Brookfield, modelo DV-III, visível na figura 3.21, foi selecionado um “*spindler*” com a referência SC4-18.

De modo a ser possível determinar a viscosidade para várias temperaturas, no presente caso, a 25°C, 50°C e 75°C, foi ainda utilizado um sistema desenvolvido pelo próprio laboratório. Esse sistema recorre a um reservatório de água quente que fornece essa água a uma bacia cilíndrica onde é colocado um cilindro metálico que garantirá a existência de um filme do fluido a analisar entre a superfície estática deste cilindro e o “*spindler*” colocado à rotação definida no viscosímetro, que mede deste modo a resistência a esse movimento rotacional, determinando assim a viscosidade. O fluxo de água quente por esta bacia cilíndrica permite manter o fluido a uma determinada temperatura constante.



Fig. 3.21 – Imagem do viscosímetro utilizado.

Antes da utilização do referido equipamento com os combustíveis que se pretendiam caracterizar, seguiram-se as recomendações do fabricante, no sentido de aferir o método e o próprio equipamento, utilizando um líquido de calibração com 4,3cP (1cP = 1mPa.s) aos 25°C.

Os resultados obtidos com este fluido que estão visíveis no gráfico da figura 3.22, permitiram detetar os erros de medição e deste modo corrigir o valor da viscosidade obtida para os fluidos que se pretendiam caracterizar.

Para a análise sobre a variação da viscosidade em função da quantidade de biodiesel existente na mistura de combustível, foram efetuados ensaios para misturas com 0, 10, 20, 30, 50 e 100% de biodiesel no combustível, para 3 temperaturas diferentes (25, 50 e 75°C).

O valor de viscosidade obtido para cada mistura corresponde à média de 5 valores resultantes de 5 ensaios realizados a velocidades de rotação diferente (80, 100, 120, 150 e 200 rpm). As correções foram efetuadas tendo em consideração os valores obtidos em cada ensaio, para cada uma das

rotações avaliadas, comparando os valores análogos obtidos com o combustível em causa e o líquido de calibração.

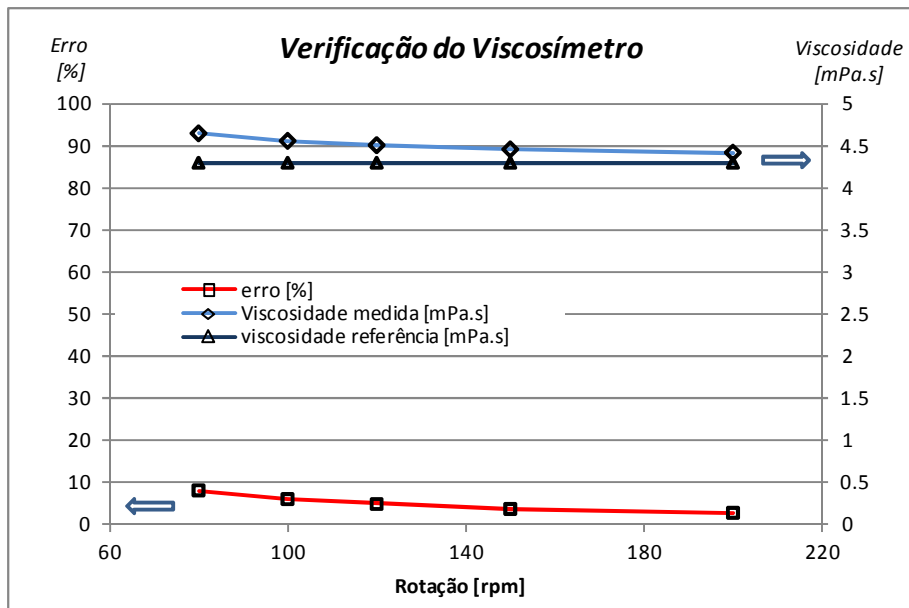


Fig. 3.22 – Gráfico com dados da verificação do viscosímetro utilizando o líquido de calibração.

Os gráficos onde estão representados os valores de viscosidade em função da temperatura e da % de biodiesel misturado no combustível são apresentados nas figuras 3.23 e 3.24.

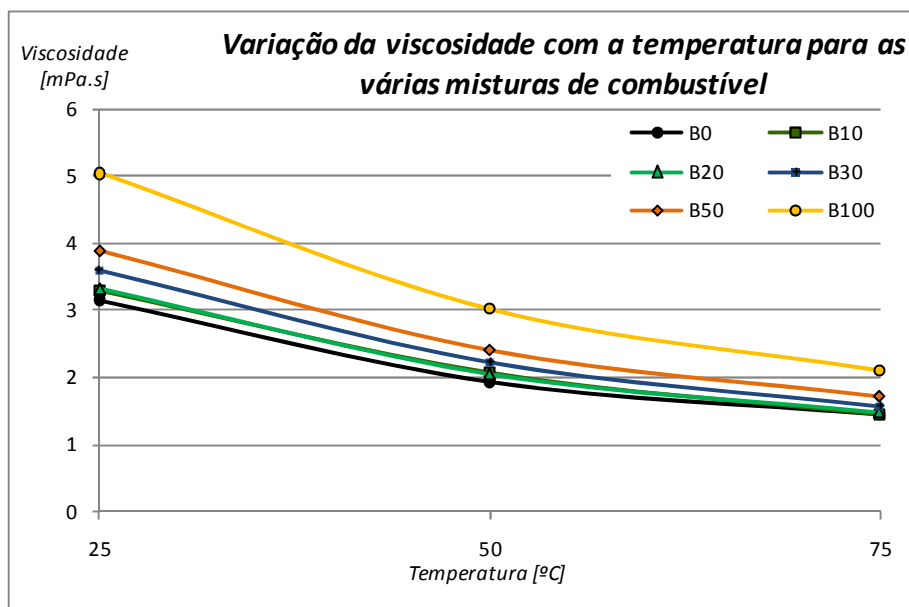


Fig. 3.23 – Gráfico representativo da variação da viscosidade com a temperatura para cada mistura de combustível.

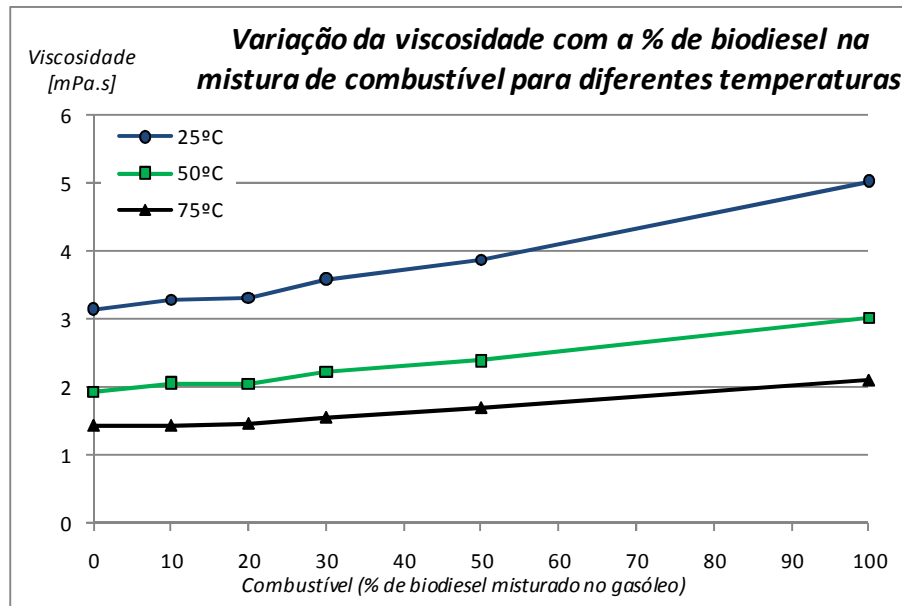


Fig. 3.24 – Gráfico representativo da variação da viscosidade com a % de biodiesel misturado no combustível para as temperaturas consideradas.

Da análise dos gráficos já referidos é possível identificar três aspetos que merecem uma reflexão mais detalhada. Confirmando-se que o aumento da temperatura provoca uma diminuição da viscosidade em todas as misturas de combustível consideradas, essa variação é menos significativa entre as duas temperaturas mais altas do que entre os 25°C e os 50°C. Por outro lado, entre as diferentes misturas, verifica-se um comportamento muito interessante na variação da viscosidade. Em ambos os gráficos, verifica-se que entre os combustíveis com teores de biodiesel até 20% (B0, B10 e B20), o aumento de viscosidade não é tão significativo quanto o ocorrido para misturas com maiores quantidades de biodiesel. É bastante relevante o facto de a viscosidade quase não aumentar quando comparadas as misturas B10 e B20, sendo expectável que houvesse pelo menos um aumento similar ao verificado entre B0 e B10. Quando se analisam os valores de viscosidade para B30, verifica-se então um salto significativo, assinalando um comportamento que se mantém de modo praticamente linear para as misturas de combustível B50 e B100, como seria de esperar que ocorresse para todos os incrementos de biodiesel.

Um terceiro aspeto que é importante referenciar e que se torna mais notório pela análise do gráfico da figura 3.24, é o facto de que à medida que a temperatura aumenta, verifica-se uma certa tendência para a redução das diferenças de viscosidade entre as várias misturas de combustível.

De entre os três aspetos referidos, é de destacar o comportamento não linear da viscosidade com a incorporação de biodiesel, verificado para os combustíveis com baixos níveis de incorporação deste combustível de origem vegetal. Este comportamento terá certamente influência no desempenho do motor quando abastecido por estes combustíveis.

3.5.2 Densidade

À semelhança do estudo efetuado para averiguar sobre o comportamento das várias misturas de combustível relativamente à viscosidade, foi também avaliada a forma como a densidade seria afetada pela mistura de biodiesel em gasóleo e de que modo ocorria essa alteração.

Para este efeito utilizou-se uma balança de precisão existente no laboratório de Termodinâmica e Fluidos da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria, calibrada através de uma série de massas padrão existentes para esse efeito. Este equipamento da marca Precisa, modelo 262SMA-FR, está representado na figura 3.25. Nessa figura está ainda representado o copo graduado da marca Jaytec, modelo BS733 especificado para um volume de 50ml e que foi também utilizado para quantificar o volume de combustível analisado em cada medição.



Fig. 3.25 – Balança Precisa utilizada no processo de determinação da densidade dos combustíveis.

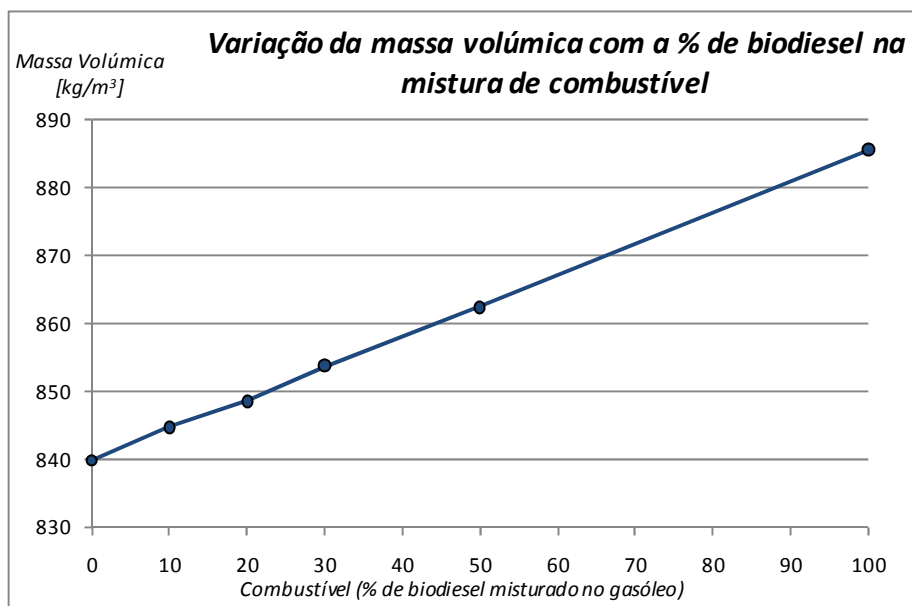


Fig. 3.26 – Variação da massa volúmica do combustível em função da quantidade de biodiesel misturado.

O método utilizado foi bastante simples, atendendo a que era realizado o enchimento do copo na totalidade com o combustível a analisar e pesava-se na balança, sabendo que todos os combustíveis estavam à mesma temperatura de 20,1°C, enquanto a temperatura ambiente do laboratório era de 19°C. Deste modo foi possível obter a massa volúmica de cada combustível. Este procedimento foi repetido para cada mistura, tendo sido avaliadas 6 diferentes misturas de combustíveis (B0, B10, B20, B30, B50, B100). Os desvios ocorridos entre medições repetidas foram sempre inferiores a 0,1%.

Os resultados obtidos encontram-se resumidos no gráfico da figura 3.26. A análise destes resultados permite concluir que, efetivamente, a variação da densidade ocorre de forma proporcional relativamente à quantidade de biodiesel incorporado no combustível, resultando um aumento do valor da massa volúmica pela inclusão do biodiesel.

3.5.3 Poder calorífico

Conforme já referido no capítulo 2, relativamente ao propósito do trabalho desenvolvido, o conhecimento sobre o conteúdo energético do combustível é um aspeto determinante para a análise da eficiência energética no processo de combustão e para a comparação entre os diferentes combustíveis obtidos pela mistura de diferentes quantidades de biodiesel.



Fig. 3.27 – Calorímetro Parr utilizado para determinação do poder calorífico dos combustíveis.

Contrariamente ao que se verifica relativamente à viscosidade e à densidade, onde o biodiesel estava caracterizado, o poder calorífico dos combustíveis era de todo desconhecido, pelo que aumentava a importância de se efetuarem testes que permitissem caracterizar os combustíveis relativamente a este parâmetro tão relevante no presente estudo.

Para este propósito foi utilizado um calorímetro da marca Parr, modelo 1341, apresentado na figura 3.27, contando ainda com uma bomba de oxigénio do mesmo fabricante com a referência 101A C20 020408 M18250, tendo ainda sido utilizada uma balança de precisão da marca Mettler – Toledo, modelo PG203. Este equipamento foi cedido para utilização pelo Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.

A avaliação do poder calorífico superior (PCS) consiste na determinação da energia libertada sob a forma de calor num processo de combustão em que se admite que a água presente nos produtos da combustão se encontra no estado líquido. A oxidação ocorre numa atmosfera rica em oxigénio colocado a uma pressão de 25 bar na bomba de oxigénio, sendo o calor libertado determinado através do aquecimento provocado em 2 kg de água destilada que envolve essa bomba. O PCS é determinado sem correções à quantidade de ácido e de sulfatos formados durante a reação de oxidação. Esta metodologia segue os procedimentos descritos na norma ASTM D 240.

Foram feitos ensaios para determinação do poder calorífico considerando os três combustíveis base utilizados, gasóleo (B0 diesel), biodiesel de soja e colza (B100 colza, considerando uma composição de 40% soja com 60% colza) e biodiesel de soja e palma (B100 palma, considerando uma composição de 86,5% de soja e 13,5% de palma). Foi efetuada a repetição de cada ensaio de modo a poder validar a implementação do método de ensaio e aumentar a confiança nos resultados obtidos. Também foi realizado um teste com um combustível B20, constituído por 20% de biodiesel (B100 colza) e 80% de gasóleo (B0 diesel). O principal objetivo deste ensaio baseava-se na verificação sobre o modo como variava o poder calorífico superior dos combustíveis obtidos por mistura de biodiesel em gasóleo. Face aos resultados, visíveis na tabela 3.2., é possível concluir que a comparação entre o valor teórico, obtido pela soma aritmética da contribuição parcial do poder calorífico de cada um dos combustíveis, e o valor experimental é bastante similar, pelo que não se considerou necessário efetuar mais qualquer teste, sendo possível estabelecer os valores de PCS dos vários combustíveis pela soma aritmética das contribuições relativas dos combustíveis base, conforme é possível de analisar na tabela 3.3.

Poder Calorífico Superior				
combustível	unidades		kJ/kg	desvio [%]
	cal/g	kJ/kg		
B100 palma1	9550,3	39958,5	39909,4	0,25
B100 palma2	9526,9	39860,3		
B100 colza 1	9443,1	39509,9	39825,1	-1,58
B100 colza 2	9593,8	40140,4		
B0 diesel 1	10918,0	45680,7	45620,1	0,27
B0 diesel 2	10889,0	45559,4		
B20 colza	10641,2	44522,9	44522,9	0,14
B20 colza teórico	20%BD+80%D		44461,1	

Tab. 3.2 – Resultados relativos ao PCS obtidos experimentalmente para os vários combustíveis base utilizados.

	Resumo PCS [kJ/kg]		Resumo PCS [kJ/dm ³]		
	B100 colza	B100 palma	densidade	B100 colza	B100 palma
B0	45620,1	45620,1	0,840	38315,8	38315,8
B10	45040,6	45049,0	0,845	38051,0	38058,1
B20	44461,1	44477,9	0,849	37731,1	37745,4
B30	43881,6	43906,9	0,854	37469,8	37491,4
B50	42722,6	42764,8	0,862	36846,9	36883,2
B100	39825,1	39909,4	0,883	35165,6	35240,0

Tab. 3.3 – Poder calorífico superior dos vários combustíveis utilizados no estudo.

Da análise dos resultados obtidos confirma-se que o conteúdo energético do biodiesel é inferior ao do gasóleo em 12,7% e 12,5%, quando se compara em termos mássicos o B100 soja e o B100 palma respetivamente com o gasóleo. Como confirmado pela experiência realizada, o conteúdo energético das misturas utilizadas é afetado de forma proporcional à quantidade de biodiesel incorporado, o que implica que a redução de poder calorífico superior do B10 relativamente ao gasóleo é de 1,25 a 1,27% em função do tipo de biodiesel utilizado, havendo uma duplicação dessa diferença quando se utiliza B20.

Efetuada uma análise volumétrica, atendendo a que o biodiesel é mais denso que o gasóleo, as diferenças verificadas na comparação mássica esbatem-se. Neste caso, por cada litro de B100 colza existe menos 8,2% de energia disponível para ser libertada na combustão, do que existe no gasóleo que de modo similar apresenta mais 8,0% do que no B100 palma. Como se pode confirmar da tabela 3.3, foram utilizados os mesmos valores de densidade para ambos os combustíveis de origem vegetal, atendendo a que as diferenças entre estes dois combustíveis ao nível deste parâmetro são bastante pequenas e por isso consideradas desprezáveis, tendo sido assumida a mesma densidade para ambos os combustíveis.

A análise ao nível do conteúdo energético por unidade de volume de combustível é bastante importante, uma vez que é sobre energia e eficiência energética que grande parte do trabalho que se pretende realizar está dedicado. A análise em termos de volume faz mais sentido, atendendo a que o fluxo de combustível disponibilizado ao motor pelo sistema de injeção é controlado volumetricamente.

3.6 Sumário do capítulo

O presente trabalho é essencialmente experimental, tendo sido estruturada neste capítulo a informação relativa aos equipamentos utilizados e à fiabilidade nos resultados obtidos. Neste sentido, foi apresentada uma avaliação sobre as capacidades da estrutura experimental disponível, identificando potencialidades e limitações, bem como foram ainda definidos alguns caminhos que serão utilizados nas metodologias que guiam este trabalho de investigação.

As estruturas experimentais estão divididas em 3 tipos, diferenciadas pelos recursos disponíveis, permitindo por caminhos distintos atingir um objetivo comum de avaliar o impacto que a utilização de biodiesel poderá ter sobre o desempenho do motor e sobre as emissões. Deste modo foram apresentados no capítulo os recursos associados aos ensaios em banco de motores, aos ensaios em banco de rolos e aos ensaios em estrada. Foi ainda elaborada uma metodologia que permitiu avaliar o modo como a inclusão de diferentes quantidades de biodiesel em gasóleo afetam as propriedades da mistura relativamente aos parâmetros viscosidade, densidade e poder calorífico. A determinação do parâmetro poder calorífico é fundamental para o trabalho a desenvolver, atendendo à relação direta com a energia disponível e para a avaliação da eficiência energética. Esta determinação assume uma importância acrescida porque os combustíveis base não estavam caracterizados relativamente a este parâmetro, contrariamente ao que sucede com a viscosidade e com a densidade.

3.6.1 Resumo

- ✓ Existem várias formas de efetuar ensaios em motores ou em veículos, tendo em vista a comparação de consumo de combustível, a avaliação das emissões de gases de escape e da análise do desempenho de motores. Em geral podem distinguir-se 3 metodologias distintas com 3 diferentes ferramentas, através de um banco de ensaios de motores, de um banco de ensaios de rolos ou realizando ensaios em estrada.
- ✓ É reconhecida a valia e a qualidade dos resultados obtidos em condições laboratoriais, é contudo também aceite que estes mesmos resultados não exprimem adequadamente e com fidelidade as condições reais de utilização dos veículos em estrada. Resulta daqui a necessidade de desenvolver uma metodologia que permita obter resultados fiáveis na comparação do consumo e das emissões quando se utilizam duas fontes energéticas distintas.
- ✓ Foram reunidos vários equipamentos que permitem efetuar o estudo proposto, utilizando as três técnicas já mencionadas, possibilitando a obtenção de uma gama de resultados que permitirá aferir sobre as vantagens e desvantagens da utilização de biodiesel em motores de combustão interna com ignição por compressão.
- ✓ O banco de ensaios de motores apresenta a capacidade para realizar ensaios em motores avaliando o consumo através de uma balança de combustível, analisando as emissões através de um analisador de gases e verificando os níveis de desempenho alcançados pelos motores recorrendo a um dinamómetro hidráulico. Está ainda este dispositivo experimental

apetrechado com um opacímetro e mais alguns sistemas de monitorização do funcionamento do motor. Este sistema está ainda associado a um software que permite a aquisição de dados e o controlo das condições do ensaio, o que possibilita a automatização de todo o processo. Quando possível é ainda utilizada a ficha OBD para comunicar com a unidade de comando do motor e deste modo aceder a informação relativa aos parâmetros de funcionamento.

- ✓ O banco de rolos permite a análise do motor sem que seja necessário retirá-lo do veículo, estando preparado para avaliar o comportamento desse veículo e desse modo obter os dados sobre o desempenho do motor. A este banco de ensaios está ainda associado um sistema com uma balança de combustível que permite determinar o consumo e o analisador de gases que, sendo portátil, pode ser utilizado também no banco de rolos.
- ✓ Os ensaios em estrada e o modo como esta metodologia poderá ser utilizada representam um dos aspetos mais significativos para a distinção deste trabalho e através do qual se pretende contribuir para o desenvolvimento do conhecimento ao nível da comparação energética de soluções para a propulsão de veículos. Foi estruturada e apresentada neste capítulo uma metodologia que consiste na utilização de um sistema GPS e num sistema de aquisição de dados provenientes da unidade de comando do veículo através da ligação à ficha OBD II.
- ✓ Foi desenvolvido trabalho no sentido de conhecer melhor e caracterizar mais detalhadamente os combustíveis que vão ser utilizados. Neste sentido, foram desenvolvidos alguns contactos no sentido de poder aceder aos equipamentos que permitissem avaliar a viscosidade, densidade e poder calorífico dos combustíveis. Deste modo foi possível avaliar a variação da viscosidade dos combustíveis em função da temperatura e da quantidade de biodiesel misturado. Também foi quantificado o modo como a variação na quantidade de biodiesel incorporado no combustível afetava a densidade desse combustível. Finalmente foi ainda determinado o poder calorífico dos combustíveis utilizados.
- ✓ A análise dos resultados relativos à viscosidade dos combustíveis permite concluir que a variação deste parâmetro com a temperatura ocorre de modo menos notório para as alterações entre temperaturas mais altas, verificando-se ainda que a variação da viscosidade para diferentes teores de biodiesel misturado no gasóleo não ocorre de forma linear nas misturas contendo até 20% de biodiesel (B20), sendo aproximadamente linear essa variação a partir de B30.
- ✓ A densidade das misturas de combustível varia de modo perfeitamente proporcional à quantidade de biodiesel presente nessa mistura.
- ✓ O poder calorífico superior do biodiesel é cerca de 12,5% inferior ao do gasóleo numa análise mássica, contudo, atendendo às diferenças na densidade, esse valor desce para cerca de 8% numa análise volumétrica. Pelos resultados obtidos é possível concluir que a variação do poder calorífico diminui proporcionalmente com a quantidade de biodiesel misturado no combustível.

3.6.2 Análise crítica do capítulo

- 1º Objetivo:** Foram descritos os métodos de ensaio mais comuns na realização de ensaios a motores e a veículos, sendo identificados e caracterizados os equipamentos que constituem cada uma das arquiteturas experimentais utilizadas. Tal como definido, foram perfeitamente identificadas as vantagens associadas a cada metodologia e descritos os problemas e dificuldades mais relevantes, tendo sido apontada a forma como se poderia resolver o problema do controlo dos ensaios realizados em estrada, sendo esta metodologia apontada como estratégia de futuro na comparação de soluções energéticas para o setor dos transportes.
- 2º Objetivo:** Foi realizada a apresentação sumária dos equipamentos e software utilizados, sendo descritas as características mais relevantes e que podem afetar os resultados obtidos. De forma não exaustiva, foram ainda descritos os métodos utilizados no registo e tratamento dos dados de modo a garantir que a informação adquirida e processada represente com fidelidade o processo físico em causa.
- 3º Objetivo:** Foram desenvolvidos os esforços necessários para garantir a caracterização dos combustíveis utilizados neste trabalho, não tendo sido completamente atingido este objetivo, uma vez que se pretendiam avaliar mais alguns parâmetros como o índice de cetano, a curva de destilação e o índice de acidez, mas tal não foi possível. Contudo considera-se bastante satisfatório o resultado obtido ao nível da caracterização da variação da viscosidade entre misturas e em função da temperatura, da definição da densidade dos vários combustíveis e da caracterização do poder calorífico dos combustíveis, aspeto considerado absolutamente fundamental para o presente trabalho.

3.6.3 Linhas orientadoras do trabalho a realizar

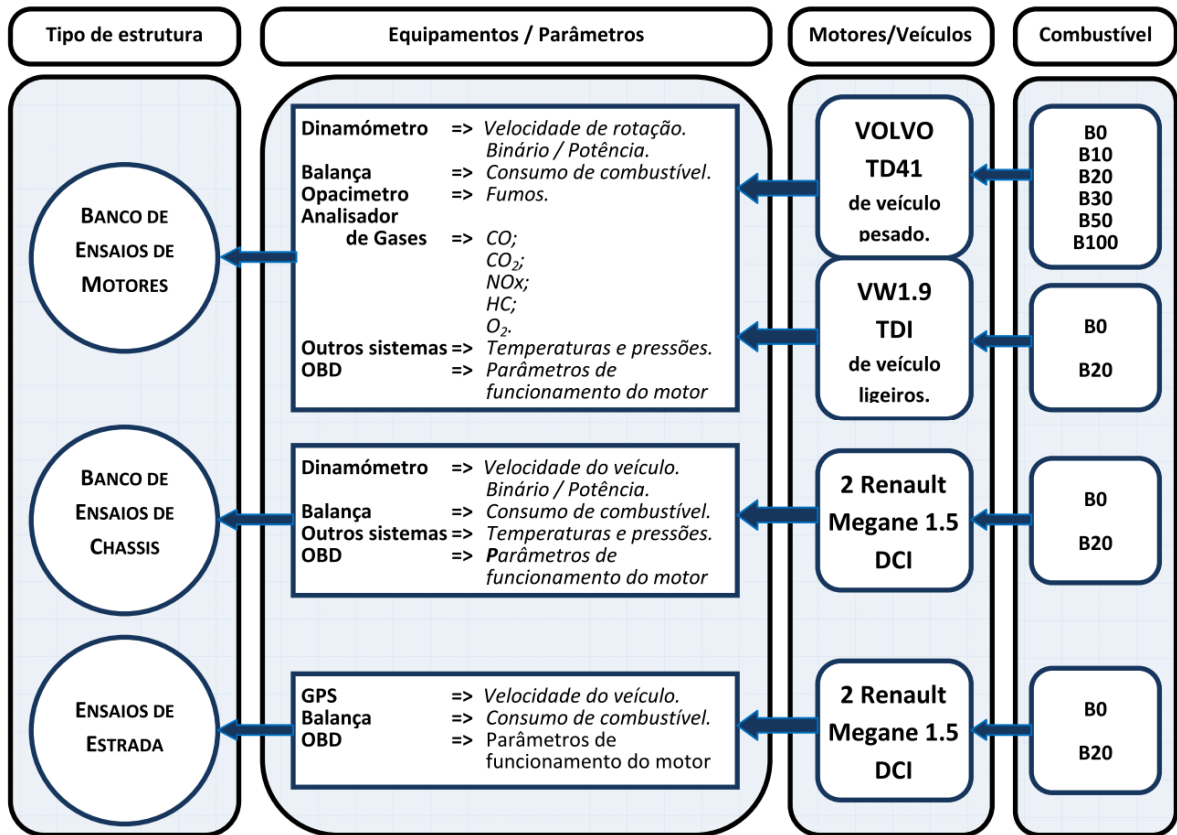


Fig. 3.28 – Estrutura experimental a utilizar e linhas de orientação do trabalho a desenvolver.

Esta página foi intencionalmente deixada em branco.

APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Sumário:

1. Apresentação das metodologias seguidas e justificação das opções de ciclos de ensaio utilizadas.
2. Análise da influência da utilização de biodiesel no consumo e emissões de motores de combustão interna.
3. Avaliação do modo como são afetados os resultados obtidos em função da metodologia utilizada.
4. Discussão dos resultados obtidos e respetiva análise crítica, traçando metas futuras.

Esta página foi intencionalmente deixada em branco.

4.1 Introdução

Tendo em consideração os recursos existentes e já apresentados no capítulo anterior, foram desenvolvidas várias metodologias que permitiram a obtenção dos resultados expostos no presente capítulo, cuja finalidade é analisar os efeitos que a utilização de biodiesel tem no desempenho dos motores, no consumo e na emissão de poluentes.

O modo como o presente capítulo foi estruturado tem fundamentalmente a ver com os diversos tipos de técnicas utilizadas e com os tipos de veículos testados ou analisados. Deste modo, pode dividir-se este capítulo em duas secções, uma destinada à apresentação dos resultados obtidos com veículos pesados ou motores típicos desses veículos e uma subsequente versando sobre os resultados obtidos em veículos ligeiros ou em motores destinados a equipar esse tipo de veículos.

Cada uma destas secções foi ainda dividida em partes distintas em função do tipo de teste realizado. Deste modo e para melhor compreensão da organização deste capítulo, apresenta-se na figura 4.1 um esquema da estrutura adotada, baseada de forma mais concisa, na estrutura já apresentada na figura 3.28.

Atendendo a que o trabalho final é o resultado da soma de vários trabalhos parciais, mas onde cada uma das partes tem uma história própria e uma análise dos resultados inerentes, revelou-se mais apropriado que, para cada ensaio, fosse elaborada uma pequena introdução, uma apresentação dos pormenores da metodologia utilizada e dos elementos específicos dos ensaios, considerando a descrição do motor ou veículo utilizado e dos combustíveis considerados, seguindo-se a apresentação dos resultados correspondentes e uma discussão dos mesmos.

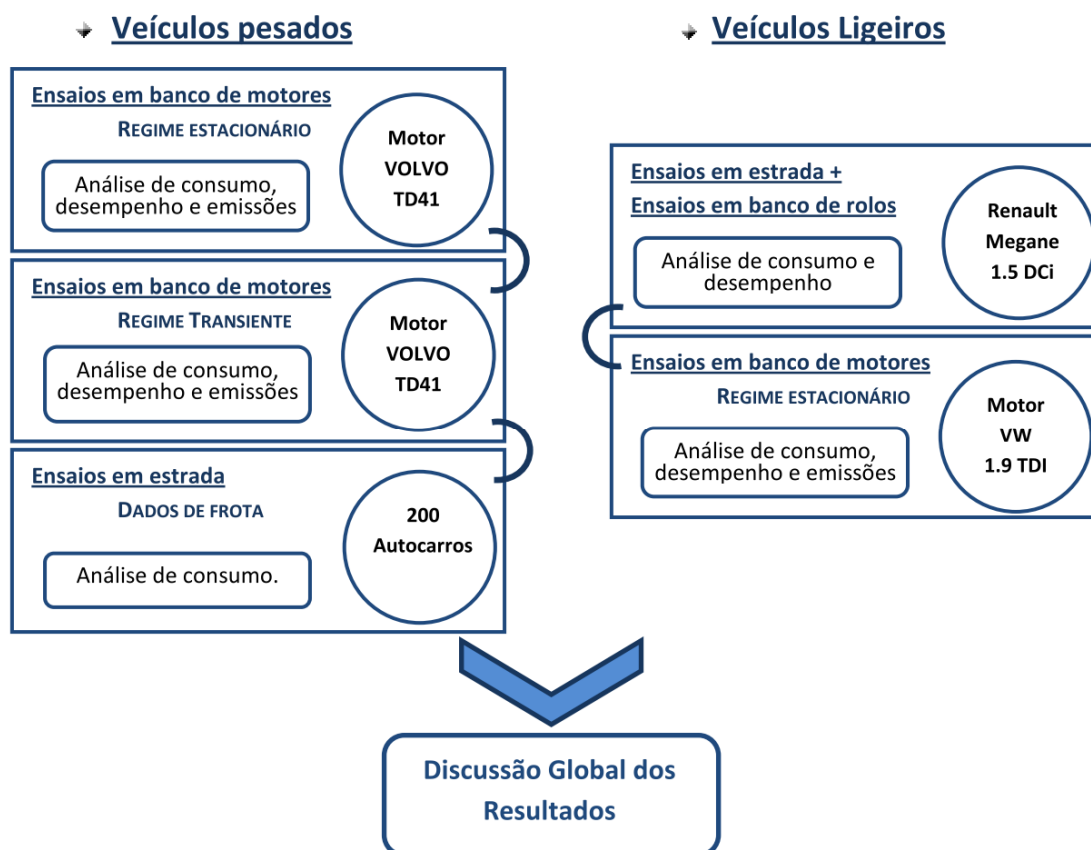


Fig. 4.1 – Estrutura do capítulo 4.

4.1.1 Metodologia geral

A metodologia utilizada foi já introduzida no capítulo anterior, existindo alguns aspetos singulares de cada tipo de ensaio que serão apresentados na secção respeitante deste capítulo. Face aos equipamentos utilizados e aos sistemas (motores e veículos) disponíveis, foram desenvolvidas algumas metodologias específicas para a realização dos ensaios, cuja justificação ou validação será efetuada conjuntamente com a apresentação dos resultados correspondentes.

Salienta-se que o objetivo pretendido no desenvolvimento das metodologias de suporte à realização dos ensaios foi a garantia da maior semelhança possível relativamente às condições normais de utilização dos veículos na circulação em estrada. A análise dos ciclos de ensaio padronizados para veículos pesados, que preveem a utilização de um banco de ensaios de motores, considera a execução de 3 tipos de ensaios (ESC – ciclo europeu estabilizado; ETC – ciclo europeu transiente e

ELR – resposta a solicitação de carga) no sentido de avaliar as emissões de um motor novo de modo a permitir a sua homologação (Diretiva 2005/55/CE).

Os requisitos prescritos na diretiva, para além de não se ajustarem à medição de consumo de combustível, não possibilitam a análise comparativa da eficiência do motor quando abastecido por diferentes combustíveis e não estão direcionados para a utilização de outro tipo de equipamentos que não os previstos na diretiva. Os ciclos considerados, apresentam ainda dificuldades de implementação no caso de motores usados, atendendo à capacidade de resposta do motor, sendo extremamente exigentes, o que pode comprometer a fiabilidade do motor. Deste modo, foi desenvolvido um ciclo de carga para ensaios estacionários e outro para ensaios transientes que permitisse adequar-se aos objetivos pretendidos em termos de caracterização dos combustíveis quando fornecidos ao motor disponível.

Relativamente aos veículos ligeiros, o que é preconizado em termos regulamentares para a medição de consumo de combustível/análise das emissões de CO₂, é a utilização de um ciclo de ensaios baseado num banco de rolos (Diretiva 80/1268/CE). Este ciclo é bastante exigente em termos das condições de realização dos ensaios ao nível das instalações, do controlo das condições ambientais e dos equipamentos de medição, pelo que não existia capacidade para implementar a metodologia proposta pela diretiva. Para além disso, a implementação deste ciclo está direcionada para a homologação de veículos e para a vertente comercial, atendendo a que os construtores podem condicionar o funcionamento dos veículos para um alto desempenho no cumprimento restrito do ciclo padronizado, utilizando um baixo nível de emissões de CO₂ como instrumento de marketing.

Uma vez que o objetivo essencial era a análise comparativa de diferentes combustíveis e que se pretendia efetuar essa análise através de condições que reproduzissem a utilização efetiva de veículos em circulação na estrada, optou-se pelo desenvolvimento de uma metodologia que permitisse o cumprimento destes objetivos, através da utilização real de veículos sujeitos às condições impostas pelo tráfego, tipo de circuito, meteorologia, condutor e características morfológicas de terreno.

Atendendo a que o método de ensaio em estrada tornava extremamente complexa a medição de emissões de escape, foi ainda desenvolvida uma metodologia que permitia a análise do consumo e de emissões de escape recorrendo ao banco de motores, através da montagem de um motor de ignição por compressão de utilização comum em veículos ligeiros. Para a realização de ensaios neste motor foi também implementada uma metodologia de ensaio que permite avaliar as diferenças existentes entre utilizar apenas gasóleo ou uma mistura deste com biodiesel, ao nível do consumo de combustível, da eficiência de combustão e das emissões gasosas, nomeadamente das emissões de NOx. A metodologia selecionada foi direcionada para a análise das possíveis interferências do regime de funcionamento do motor sobre as emissões de NOx e da eficiência do motor quando abastecido por diferentes combustíveis.

4.1.2 Objetivos

Atendendo ao esforço desenvolvido na reunião de recursos que permitissem a realização de diferentes tipos de ensaios, tendo em vista obter resultados relativos ao efeito da utilização de biodiesel no consumo e emissões de motores de combustão interna utilizados em veículos com recurso a diferentes métodos de análise, foram traçados os seguintes objetivos:

- 1º Objetivo:** Avaliar o modo como a utilização de biodiesel afeta o consumo de combustível em veículos e efetuar uma análise energética sobre o fenómeno da combustão do gasóleo face a misturas de combustível contendo biodiesel. Avaliar ainda as possíveis influências do uso de biodiesel sobre o desempenho do motor.
- 2º Objetivo:** Averiguar o efeito da utilização de biodiesel sobre as emissões de gases de escape, especialmente as emissões de NOx.
- 3º Objetivo:** Identificar as possíveis diferenças resultantes da utilização de diferentes tecnologias e métodos de ensaio sobre os resultados obtidos.

4.1.3 Resumo

O principal objetivo do trabalho foi avaliar o efeito que a utilização de biodiesel poderá ter sobre o desempenho, as emissões e o consumo de combustível em motores de ignição por compressão. A apresentação e discussão desses resultados surgem como o culminar de um trajeto que envolveu o recurso a diferentes métodos, utilizando diversos motores e vários veículos abastecidos com diferentes misturas de combustível.

Começaram por se realizar ensaios em laboratório com um motor considerado representativo dos que equipam as frotas de veículo de transporte coletivo de passageiros. Foi montado um motor Volvo TD41 no banco de ensaios de motores da ADAI, o que permitiu a realização de um conjunto de ensaios em várias condições de carga e rotação, considerando a utilização de combustíveis com diferentes proporções de gasóleo e biodiesel. Aproveitando a montagem deste motor no banco de motores foi ainda desenvolvido um ciclo de ensaios que visava analisar o comportamento do motor em regime transiente. Destes ensaios foram obtidos resultados interessantes ao nível da análise do consumo de combustível e da eficiência no processo de mudança de regime, bem como das emissões mas em regime estabilizado após a transição.

Graças à disponibilização de informação de consumo de uma frota de cerca de 200 autocarros de passageiros, foi também possível analisar, no caso de veículos pesados de transporte de passageiros, quais os efeitos no consumo de combustível da utilização de diferentes quantidades de biodiesel incorporado em gasóleo, para vários tipos de circulação. Os resultados obtidos permitiram efetuar

uma análise energética e económica que será apresentada, sendo reconhecido que estes são aspetos fundamentais para as empresas de transportes.

Foi desenvolvida uma metodologia inovadora para a realização de ensaios em estrada em que o objetivo principal é garantir e monitorizar a semelhança da evolução temporal das condições de funcionamento a que estão sujeitos os dois veículos usados para realizar testes comparativos. Foram utilizados dois veículos ligeiros em circulação simultânea na estrada, abastecidos com diferentes combustíveis, permitindo uma análise da influência ao nível do consumo da utilização de biodiesel. A comprovação da semelhança entre os veículos e a verificação dos dados obtidos pelos equipamentos embarcados foi feita com base em testes realizados num banco de rolos onde foram também efetuadas medições de desempenho e de consumo.

O estudo sobre veículos ligeiros foi ainda baseado em medições no banco de ensaios com um motor Volkswagen 1.9 TDI, tendo em vista a realização de ensaios em regime estabilizado, para obtenção de resultados de consumo, eficiência e emissões quando esse motor foi abastecido com gasóleo ou por uma mistura de 80% de gasóleo e 20% de biodiesel (B20).

4.2 Ensaio de veículos pesados

A utilização de biocombustíveis surge hoje como uma das soluções inadiáveis para combater o problema da dependência energética dos transportes rodoviários relativamente ao petróleo. Se estão a ser desenvolvidas e implementadas várias soluções com provas dadas a vários níveis no que diz respeito à produção de energia elétrica e térmica, fundamentalmente à custa da rentabilização de recursos naturais renováveis, já no que diz respeito a sistemas energéticos com mobilidade a questão está muito mais difícil de resolver, sendo quase impossível não se olhar hoje para os biocombustíveis como parte da solução fundamentalmente ao nível dos veículos pesados, onde a disponibilidade de outras soluções é manifestamente mais reduzida.

Esta secção do capítulo, que incide sobre a análise da utilização de biodiesel em veículos pesados, compreende 3 diferentes abordagens que constituem 3 diferentes segmentos do trabalho. Uma primeira parte onde são apresentados e discutidos os resultados dos ensaios em banco de motores num ciclo estabilizado, uma parte seguinte considerando a realização de ensaios em regime transiente na mesma instalação experimental e uma terceira parte que se refere ao estudo efetuado sobre os dados relativos ao consumo de combustível de uma frota de autocarros da empresa ARRIVA.

O modo como foi estruturado o trabalho referido anteriormente é representado esquematicamente na figura 4.2.

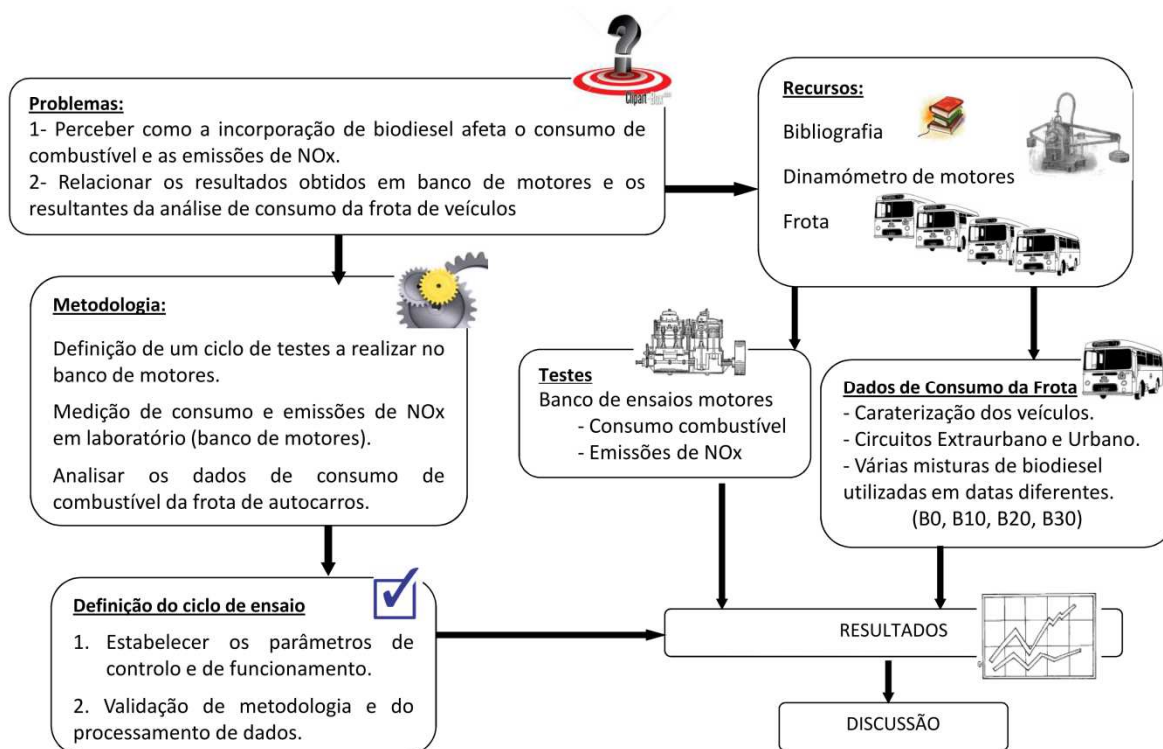


Fig. 4.2 – Estrutura da parte do trabalho sobre a utilização de biodiesel em veículos pesados.

Para os ensaios no banco de ensaio de motores, foi estruturado um plano de ensaios que permitisse obter indicadores precisos do desempenho de motores de combustão interna quando abastecidos por várias misturas de biodiesel.

O objetivo do estudo apresentado foi a medição das variáveis de funcionamento do motor quando sujeito a diferentes ciclos de carga, para fazer a avaliação comparativa das misturas de combustíveis utilizadas. Este estudo certamente corresponderá à obtenção de maior conhecimento dos efeitos, deficiências e potencialidades associadas à utilização de biocombustíveis, conhecimento esse que é essencial, principalmente quando o governo português e a união europeia estabeleceram metas para a introdução crescente da incorporação de biocombustíveis nos combustíveis para utilização no transporte rodoviário.

4.2.1 Realização de ensaios em banco de motores

Para a realização do trabalho foi utilizado um motor Volvo TD41, com 6 cilindros dispostos em linha, com 3590cm³ de cilindrada e injeção direta através da utilização de uma bomba mecânica em linha.

Este motor, cedido gentilmente pela Câmara Municipal de Coimbra, equivalerá ao que pode ser utilizado num veículo pesado de capacidade para transporte de cargas ou passageiros, apresentando-se na figura 4.3 uma foto da sua instalação no banco de ensaios, bem como um resumo das características técnicas mais relevantes.



Fig. 4.3 – Montagem do motor Volvo TD41 no banco de ensaios de motores.

Foi utilizado biodiesel produzido a partir de uma mistura de soja (40%) e colza (60%) cujas características são apresentadas na tabela 4.1. As características do biodiesel correspondem às exigências estabelecidas pela norma europeia EN 14214. Sobre os valores apresentados, importa

evidenciar os valores mais elevados de densidade (0,884) e viscosidade (4,33mm²/s) que os normalmente oferecidos pelo gasóleo, sendo ainda de realçar a proximidade dos valores de índice de cetano (52,1 (Biodiesel) e 51 (Gasóleo)).

Parâmetro (Unidades)	Biodiesel (soja 40% + colza 60%)		Gasóleo
	Resultados	Método	Resultados
Densidade a 15°C (kg/m ³)	884	EN ISO 3675	840
Conteúdo em Ester [% (m/m)]	99,8	EN ISO 14103	--
Viscosidade a 40 °C [mm ² /s]	4,33	EN ISO 3104	2,89
Ponto Flash (°C)	135	EN ISO 3679	>55
Conteúdo em água (mg/kg)	102	EN ISO 12937	--
Indicador de iodo (g iodo/100g)	116	EN ISO 14111	--
Conteúdo em enxofre [% (m/m)]	<0,02	ASTM D 874	--
Número de Cetano	52,1	EN ISO 5165	51
Poder Calorífico Superior [kJ/kg]	39825	ASTM D 240	45620

Tab. 4.1 – Propriedades dos combustíveis base utilizados nos ensaios.

4.2.1.1 Ensaios em banco de motores – regime estacionário

Os ciclos de carga especificados nas normas e regulamentos (Diretiva 2005/55/CE 2005) (Regulamento 49 - ECE 2002) são pouco representativos da utilização real dos veículos constituintes de frotas de autocarro, sendo este aspeto particularmente evidente no caso de autocarros urbanos.

Foi desenvolvido um ciclo, para os testes em banco de ensaios de motores, composto por cargas baixas e médias, que correspondem à esmagadora maioria da operação normal dos autocarros em circulação em estrada, tendo por base os dados resultantes da análise de consumo dos veículos da frota de autocarros referida anteriormente.

Considera-se um ciclo para funcionamento de um motor durante ensaios em banco, uma sequência temporal de diferentes condições de solicitação correspondente a pares de valores de velocidade de rotação e binário resistente.

O primeiro ciclo projetado tinha uma duração total de 47 minutos sendo composto por vários passos que, na sua grande maioria tinham uma duração de 2 minutos cada. Pensou-se que esta duração de cada passo seria adequada para que, após a alteração de regime imposto ao motor pelo dinamómetro, este tivesse o tempo necessário para alterar o seu funcionamento, adequando-o às novas condições de rotação e binário, através do ajuste do acelerador e restasse ainda tempo para a estabilização desse funcionamento, de modo a que os dados recolhidos correspondessem ao regime pretendido.

Utilizando este ciclo foram realizados vários testes com diferentes quantidades de biodiesel misturado no gasóleo de origem mineral.

Os resultados preliminares obtidos com as misturas B0, B10, B20 e B30, revelaram um problema que obrigou à alteração do ciclo de ensaio, uma vez que, devido à forma como a balança de combustível executa a medição de consumo, em vários períodos não havia registo de valores efetivos.

A ocorrência deste problema explica-se através da descrição do processo de medição usado na balança de combustível. A medição do consumo de combustível durante um dado intervalo de tempo é feita com base no decaimento da massa total de um reservatório com uma capacidade de pouco menos de 1 litro. Este reservatório tem que ser reabastecido de tempo a tempo, sendo evidente que os períodos de reabastecimento não podem ser usados para a medição do consumo. Nestas circunstâncias o equipamento para a medição apresenta um valor igual a zero. Deste modo, se a duração de um dado passo não for suficientemente longa, quando comparada com o tempo de reabastecimento, há um risco elevado de não se conseguirem obter valores que possibilitem a medição do consumo de combustível nesse passo.

As soluções encontradas para resolução dos problemas atrás enunciados foram resolvidas através do alargamento do período de cada passo para 4 minutos, bem como incrementando os tipos de solicitações impostas de modo a poder ter um melhor reconhecimento das potencialidades do motor com determinado combustível, amenizando deste modo a inexistência de um ciclo de potência.

O ciclo de ensaio foi desenhado de modo a simular as solicitações impostas ao motor de um veículo em circuito urbano e extra-urbano (ver figura 4.4 e tabela 4.2).

O ciclo tem a duração total de 100 minutos e pressupõe-se que, num período inicial, ocorrem mudanças crescentes de rotação e de binário, a partir de uma situação de *ralenti*, correspondendo ao arranque do veículo e conseqüente aumento de velocidade e de carga, presumindo as mudanças de caixa coerentes com uma circulação urbana com sucessivas paragens e arranques. Após este período segue-se um ciclo denominado extraurbano, com um tipo de circulação mais variado em termos de velocidade e de binário, equivalendo a diferentes situações:

- aumento e decréscimo da velocidade de circulação,
- descidas em que um veículo poderia ir praticamente sem carga,
- ultrapassagens e subidas,
- manutenção de uma dada velocidade de circulação,

Ciclo de Ensaio a Realizar no motor VOLVO

Passo	1	2	1	2	3	4	1	2	3	4	5	1	3	4	5	6	1	7	8	3	9	10	1	3	5	11	1
Tempo [min]	0-4	4-8	8-10	10-14	14-18	18-22	22-24	24-28	28-32	32-36	36-40	40-44	44-48	48-52	52-56	56-60	60-64	64-66	64-68	68-72	72-76	76-82	82-86	86-90	90-94	94-96	96-100
Duração [min]	2	4	2	4	4	4	2	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	2	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Tempo [s]	120	360	480	720	960	1200	1320	1560	1800	2040	2280	2520	2760	3000	3240	3480	3720	3840	4080	4320	4560	4800	5040	5280	5520	5760	6000
Binário [Nm]	res	50	res	50	50	100	res	50	50	100	100	res	50	100	100	150	res	100	50	50	res	res	res	50	100	200	res
Rotação [rpm]	ral	1000	ral	1000	1500	1500	ral	1000	1500	1500	2000	ral	1500	1500	2000	2000	ral	2500	2500	1500	1500	1000	ral	1500	2000	2000	ral
Potência [kW]	res	5.2	res	5.2	7.9	15.7	res	5.2	7.9	15.7	20.9	res	7.9	15.7	20.9	31.4	res	26.2	13.1	7.9	--	--	res	7.9	20.9	41.9	res
Potência [cv]	res	7.0	res	7.0	10.5	21.1	res	7.0	10.5	21.1	28.1	res	10.5	21.1	28.1	42.2	res	35.1	17.6	10.5	--	--	res	10.5	28.1	56.2	res

ral - Ralenti
res - Residual

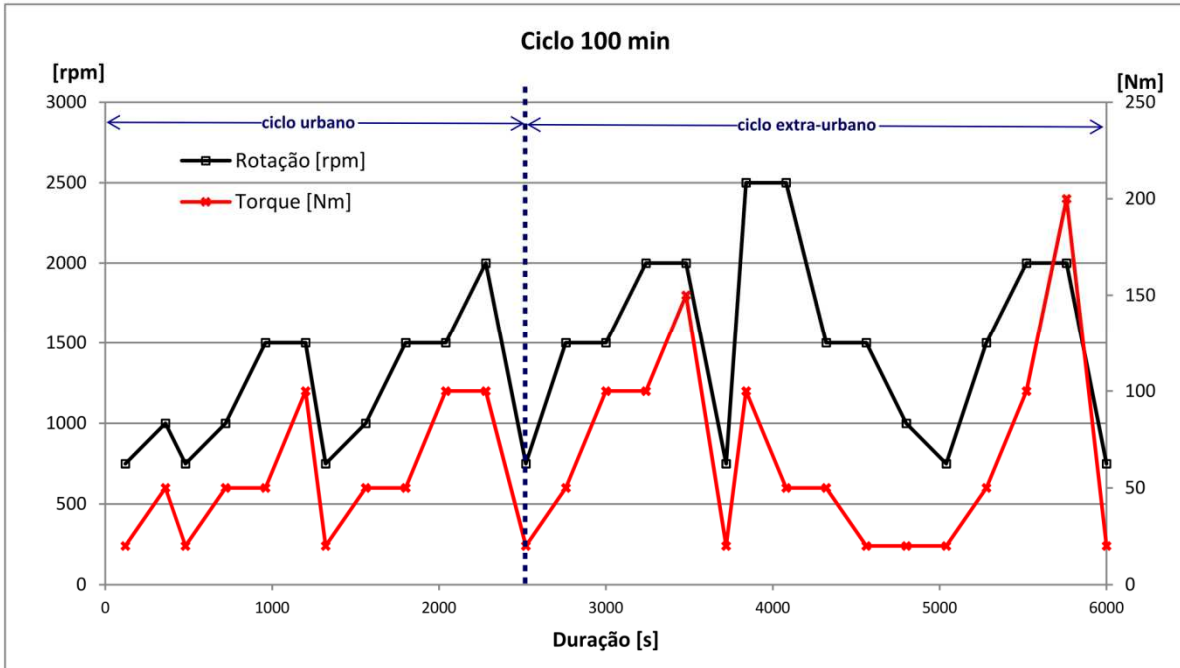


Fig. 4.4 e Tab. 4.2 - Plano de ensaios selecionado.

Será conveniente explicitar que, uma vez que o motor apresenta como velocidade máxima de rotação 3800 rpm, a velocidade de rotação típica de utilização está situada entre as 1000 rpm e as 2500 rpm, num intervalo que oscila entre 1/3 e 2/3 da rotação máxima.

Nos ensaios realizados o ciclo foi repetido 3 vezes para cada combustível utilizado, permitindo que os resultados possam ser aferidos sobre eventuais desvios anormais que tenham ocorrido e permitindo uma maior fiabilidade dos resultados obtidos caracterizando a resposta do motor para os diversos regimes impostos. Os resultados apresentados, para cada passo correspondem às médias aritméticas dos três resultados obtidos em cada ensaio. Para exemplificar este processo são apresentados na tabela 4.3, os resultados de consumo de combustível para o caso da utilização de gasóleo, considerando a repetição 3 vezes do ciclo de ensaio (Test1, Test2 e Test3).

passo		Consumo B0				
nº	tipo	Test1	Test2	Test3	Média	Desvio Pad
1	1	0,895	0,776	0,800	0,824	0,05
2	2	1,708	1,606	1,606	1,640	0,05
3	1	0,864	0,776	0,799	0,813	0,04
4	2	1,642	1,587	1,618	1,615	0,02
5	3	2,659	2,664	2,590	2,638	0,03
6	4	4,394	4,562	4,300	4,419	0,11
7	1	0,834	0,739	0,780	0,784	0,04
8	2	1,616	1,505	1,545	1,555	0,05
9	3	2,631	2,678	2,554	2,621	0,05
10	4	4,305	4,373	4,220	4,299	0,06
11	5	5,890	5,953	5,786	5,877	0,07
12	1	0,767	0,786	0,747	0,767	0,02
13	3	2,689	2,615	2,618	2,641	0,03
14	4	4,564	4,241	4,239	4,348	0,15
15	5	5,812	5,847	5,772	5,810	0,03
16	6	8,053	8,080	7,980	8,038	0,04
17	1	0,775	0,795	0,791	0,787	0,01
18	7	5,041	4,986	4,979	5,002	0,03
19	8	8,031	7,513	7,641	7,729	0,22
20	3	2,829	2,767	2,754	2,783	0,03
21	9	1,908	1,906	1,818	1,877	0,04
22	10	1,181	1,068	1,022	1,090	0,07
23	1	0,852	0,799	0,764	0,805	0,04
24	3	2,714	2,653	2,628	2,665	0,04
25	5	5,938	5,983	5,732	5,884	0,11
26	11	10,250	10,429	10,260	10,313	0,08
27	1	0,796	0,779	0,786	0,787	0,01

Tab. 4.3 – Resultados obtidos para o caso de utilização de gasóleo.

4.2.1.1.1 Resultados de consumo de combustível

Os resultados obtidos na totalidade dos ensaios permitiram elaborar o gráfico apresentado na figura 4.5, onde é possível ter uma ideia global e comparar os consumos correspondentes aos vários combustíveis utilizados nos 27 passos impostos ao longo do ciclo de 100 minutos.

É importante salientar que, conforme foi referido anteriormente, o valor do consumo é obtido em termos mássicos. Deste modo, através dos diferentes valores de massa volúmica do gasóleo e do biodiesel utilizados, foi feita uma ponderação direta das massas volúmicas dos combustíveis utilizados através da contribuição de cada um dos combustíveis base utilizados, para converter o valor de consumo mássico em consumo volúmico.

Da consulta do gráfico representado na figura 4.5 poderão salientar-se os seguintes aspetos:

- Para diferentes regimes de funcionamento, a resposta em termos de consumo é diversa, contudo será de salientar que existe uma tendência na diminuição de consumo quando se utilizam misturas de B10 e B20, confirmada com a realização de testes com B15. Aquando da utilização de misturas mais ricas em biodiesel como B50 e B100, verifica-se nestes casos um aumento significativo que permanece assinalável para os vários passos impostos.

- Os resultados obtidos relativamente ao consumo demonstram-se muito consistentes no que concerne às várias misturas utilizadas, comparando os passos que apresentam regimes impostos semelhantes.

- Confirma-se que para regimes diferentes, a tendência verificada oscila ligeiramente o que indicia que para determinadas gamas de funcionamento, uma mistura pode ser sensivelmente mais vantajosa do que outra e vice-versa, embora as oscilações sejam muito ligeiras, dentro do intervalo de incerteza associado a cada medição.

Esta avaliação feita com misturas até B30, deixa de ser válida para as misturas B50 e B100, onde é possível detetar um aumento de consumo que terá muito a ver com o menor valor de poder calorífico do biodiesel. Pode-se presumir que, para conteúdos mais significativos de biodiesel misturado no gasóleo, são manifestos os efeitos que induzem à predominância acentuada do menor conteúdo energético do biodiesel relativamente ao gasóleo convencional, relegando para um papel residual a intervenção da viscosidade, do índice de cetano e do teor de oxigénio, que poderão ter maior influência nas situações em que se utilizam menores quantidades de biodiesel no combustível.

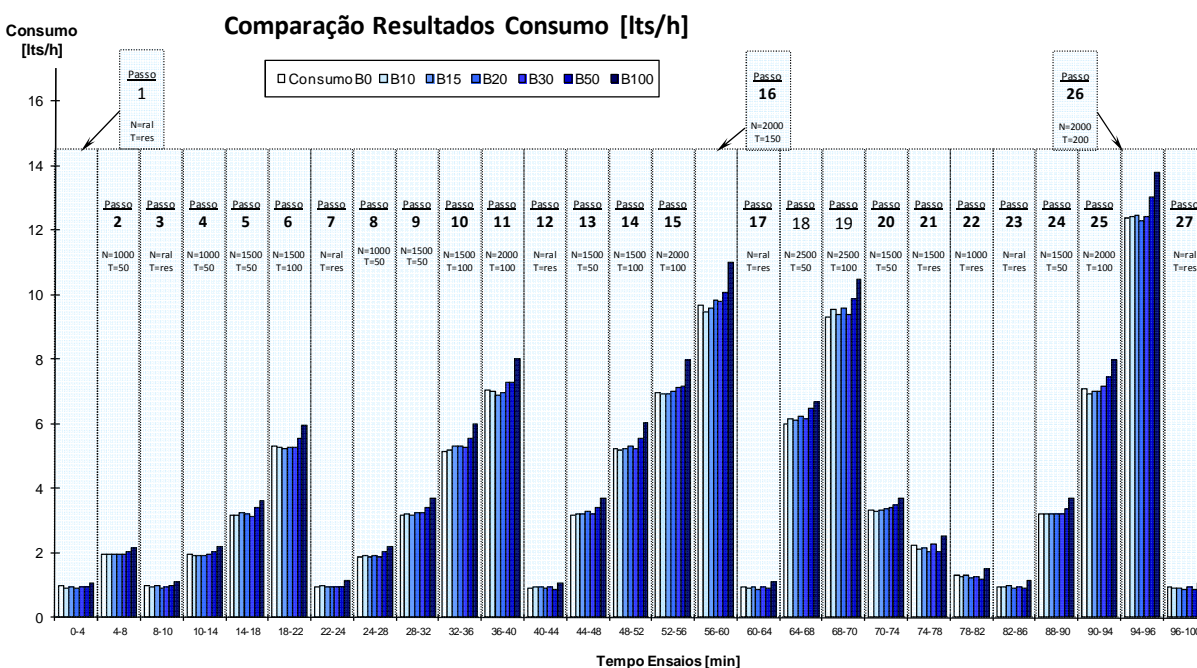


Fig. 4.5 – Resultados de consumo obtidos para os diferentes combustíveis utilizados.

De forma a salientar as tendências reveladas e a sua magnitude relativa, efetuou-se uma análise percentual, tomando como referência a situação do gasóleo puro (B0), e representando as variações percentuais dos restantes combustíveis para os vários passos. Esta análise encontra-se representada na figura 4.6.

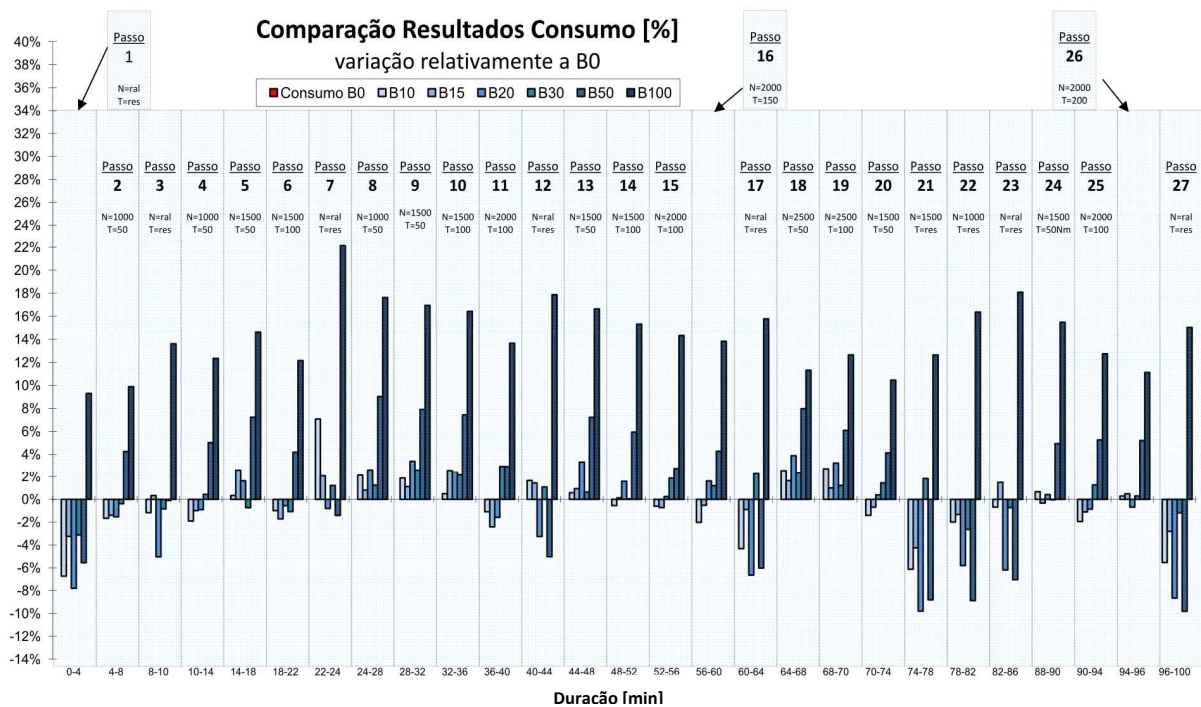


Fig. 4.6 – Resultados de variação percentual do consumo obtido para os diferentes combustíveis utilizados, relativamente ao B0.

Esta avaliação permite verificar que, para as situações em que se utilizam combustíveis contendo até 30% de biodiesel, as variações são de facto muito ligeiras, caracterizando-se por máximos de até 2%, excluindo os passos ao *ralenti*, onde também devido ao baixo consumo, as pequenas oscilações verificadas se traduzem por variações percentuais mais significativas, embora, em valor absoluto, não sejam de facto muito relevantes.

Também é possível concluir que, para todos os passos impostos, o combustível constituído a 100% por biodiesel apresenta sempre consumos mais de 10% superiores ao B0. No que respeita à mistura B50, há uma maior inconstância de resultados, embora se possa referir que em regra, as variações dos consumos são superiores a 5%, apesar de neste caso, se registarem alguns passos onde o consumo, apesar de mais elevado, não atinge os 5%, apresentando valores na ordem dos registados para as misturas com menores quantidades de biodiesel. Ainda é importante registar que nas situações onde não é imposta carga (*ralenti* e passos 21 e 22), há um decréscimo do consumo de B50 relativamente ao B0.

Para uma leitura mais eficaz de todos estes resultados, optou-se por fazer um agrupamento de valores correspondentes ao mesmo regime e selecionar os resultados que permitam avaliar a resposta do motor em termos de consumo e de emissões com o aumento da rotação para o mesmo valor de binário (50Nm e 100Nm), ou quando se aumenta o binário mantendo fixa a rotação do motor (2000rpm).

A análise do consumo para situações de imposição de binário igual a 50Nm, conforme apresentado na figura 4.7, permite concluir que quando a rotação do motor é baixa (1000rpm), o resultado mais favorável corresponde à utilização de B10 e B15, embora tanto para os valores de rotação de

1000rpm, como de 1500rpm as variações de B0 para B10, B15 ou B30, são muito pequenas (0,5 a 1%), havendo a considerar que nesta situação o valor de B20 é mais elevado que B10, B15 e B30. Apenas com o aumento do consumo correspondente ao aumento da rotação essas diferenças se tornam mais marcadas, embora com registos que no máximo ultrapassam ligeiramente os 3%. Esta situação altera-se para as misturas B50 e B100, sendo de destacar um claro aumento do consumo na ordem de 6% para o B50 e de 12% para o B100.

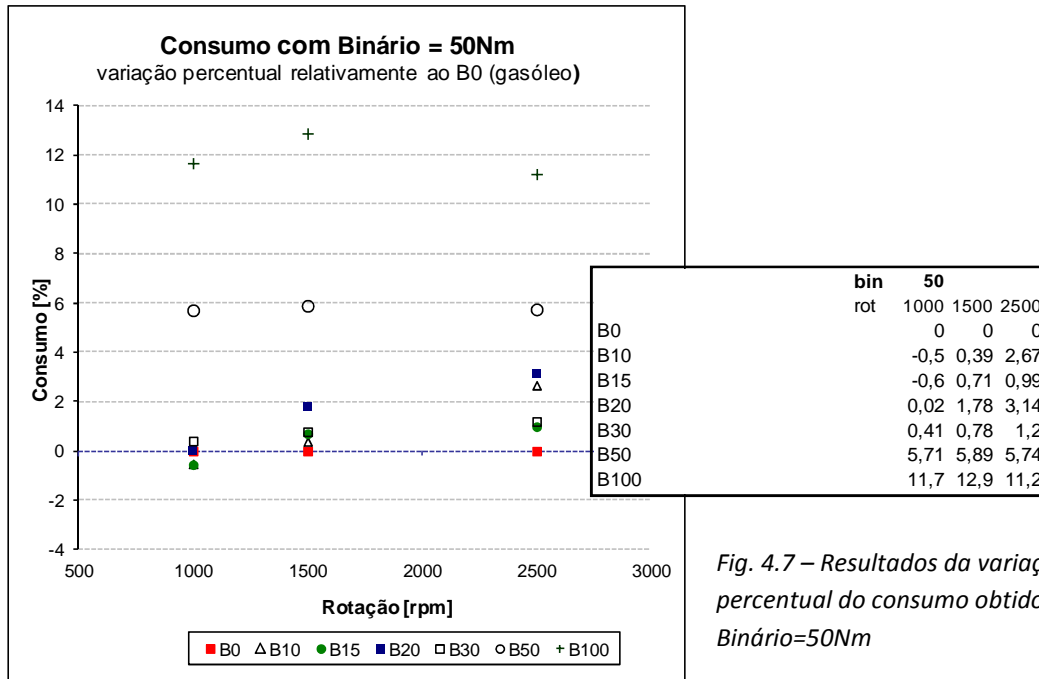


Fig. 4.7 – Resultados da variação percentual do consumo obtido com Binário=50Nm

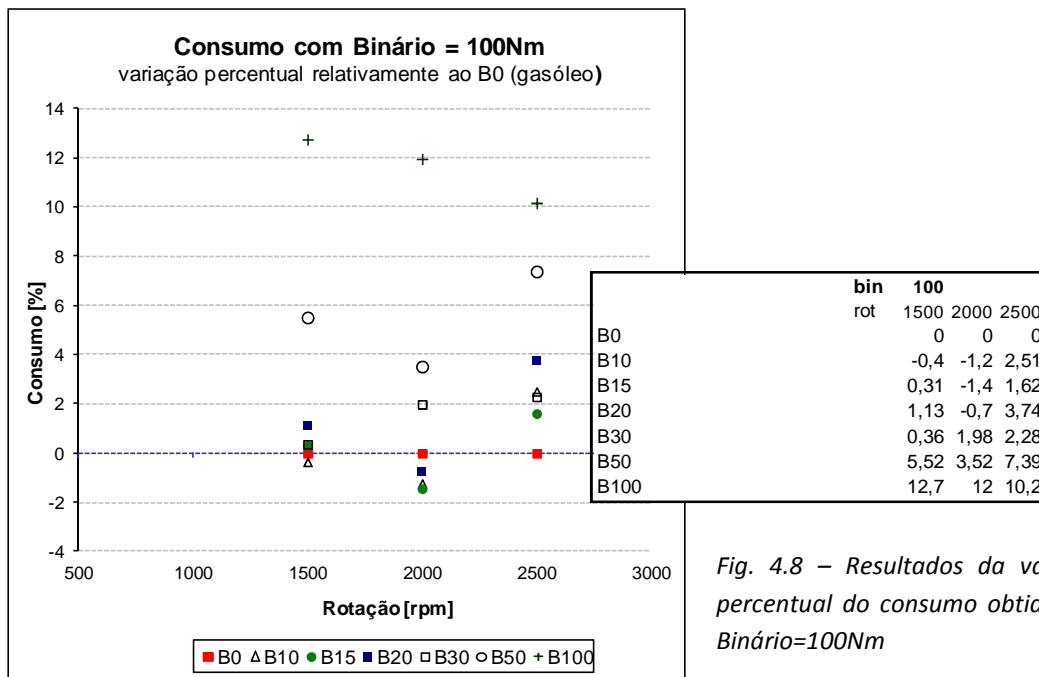


Fig. 4.8 – Resultados da variação percentual do consumo obtido com Binário=100Nm

Analisando as situações com valor de binário de 100Nm para valores diferentes de rotação, há uma conclusão muito semelhante à referida anteriormente, onde as oscilações para misturas com menores teores de biodiesel são muito pouco perceptíveis, sendo possível assinalar ligeiras diminuições e acréscimos, sempre abaixo dos 2%, exceto quando a rotação atinge valores de 2500rpm, onde é visível um aumento de consumo para todas as misturas que contêm biodiesel.

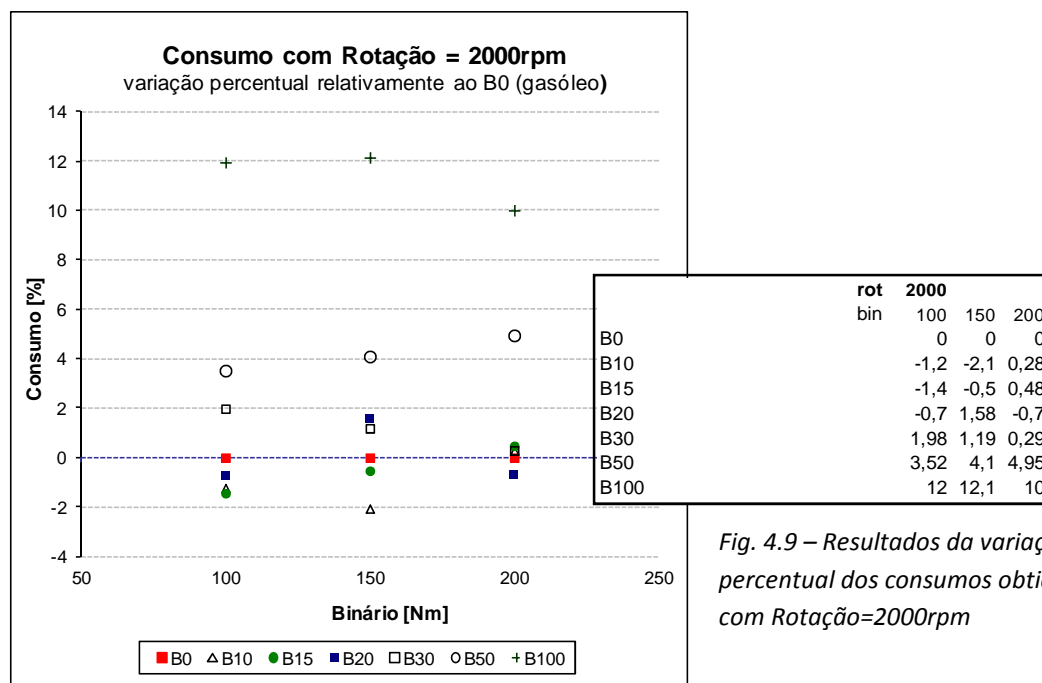


Fig. 4.9 – Resultados da variação percentual dos consumos obtidos com Rotação=2000rpm

Para as situações onde se utiliza B50 e B100, a realidade é muito semelhante à ocorrida na situação de binário com 50Nm, embora neste caso o valor de aumento percentual não seja tão marcadamente definido, mantém-se em média um aumento de consumo na ordem dos 6 e 12% respetivamente.

A análise dos resultados de consumo obtidos nas situações de rotação igual a 2000rpm, considerando a variação do binário, permite traçar um raciocínio semelhante ao já referido nas situações anteriores com binário constante. De facto mantém-se a situação de acréscimo de consumo na ordem dos 12%, quando se utiliza biodiesel sem qualquer quantidade de gasóleo. Relativamente ao impacto no consumo quando se utiliza uma mistura contendo em partes iguais gasóleo e biodiesel (B50), é possível verificar que para cargas mais baixas a variação de consumo se situa junto aos 4% de aumento, crescendo para perto dos 5% quando se aumenta a carga, aproximando-se neste caso dos valores de acréscimo registados nas avaliações anteriores.

Relativamente às misturas com percentagens até 30% de biodiesel, as oscilações são muito ligeiras, no máximo na ordem de 2%, havendo situações de aumento e situações de diminuição do consumo. Os valores de consumo para B10 e B15 são de facto ligeiramente melhores que os obtidos com gasóleo, enquanto as misturas B20 e B30 se caracterizam por um ligeiro aumento.

Como comentário final às variações de consumo, pode referir-se que, face aos resultados obtidos, há indícios de que o consumo diminui quando se utiliza B10 e B15, parecendo as misturas B20 e B30 mais dependentes do regime do motor, motivando consumos em regra muito ligeiramente acima

dos registados para a utilização simples de gasóleo convencional. As situações em que se utilizou B50 e B100, caracterizam-se por um incremento mais significativo de consumo, na ordem dos 5 a 6% para B50 e de 12% para B100. Relativamente à sensibilidade relativa da utilização de biodiesel para diferentes regimes, é muito claro que quando se utiliza B100, as variações de consumo registadas se mantêm próximas dos 12% para os vários regimes, enquanto a utilização de B50 parece indicar que o aumento de binário implica uma maior necessidade deste combustível.

4.2.1.1.2 Resultados de emissões de gases de escape

A análise aos resultados obtidos relativamente às emissões baseia-se no processo já utilizado para a avaliação comparativa do consumo de combustível, agrupando valores de modo a obter tendências dos diversos dados relativamente ao aumento da rotação ou ao aumento do binário, melhorando a compreensão do fenómeno e revelando de forma mais clara a resposta do motor em termos do processo de combustão, quando abastecido por combustíveis com diferentes quantidades de biodiesel misturado em gasóleo.

Os resultados obtidos para o combustível B30 não foram considerados por não se mostrarem coerentes. De referir que, apesar de se terem medido vários compostos, apenas os referentes às emissões de NOx e de hidrocarbonetos são apresentados. As emissões de NOx por serem os elementos com maior relevância na análise relativamente à utilização de biodiesel, os hidrocarbonetos porque permitem também confirmar a eficiência com que o combustível é queimado e complementar a análise efetuada para o consumo. As emissões de CO não serão discutidas uma vez que a resolução do equipamento utilizado (0,1%) tem uma ordem de grandeza similar às variações verificadas entre as emissões deste gás para os diferentes combustíveis. Também relativamente às emissões de partículas, cuja análise seria interessante, o conjunto de resultados obtidos revelou algumas incoerências, tornando-se claro que o opacímetro não será o equipamento mais adequado para o tipo de análise pretendido, incluindo algumas fontes de incerteza não controladas e aleatórias. Este é um aspeto que deverá ser tido em consideração no reequipamento do banco de motores, capacitando-o com um equipamento que permita a medição da concentração mássica e numérica de partículas, preferencialmente com análises separadas por tamanhos.

Concentração de NOx nos Gases de Escape

Como já foi referido no capítulo 2, as emissões de NOx representam um dos maiores desafios relativamente à utilização de biodiesel, correspondendo ao fator de maior controvérsia entre autores (McCormick, Ross e Graboski 1997) (Schmidt e Gerpen 1996) (McCormick, Tennant, et al. 2005) (Hribernik e Kegl 2007) (Senatore, et al. 2008) (Karra, Veltman e Kong 2008) (Muncrief, et al. 2008) (Yehliu, Boehman e Armas 2010) (Agudelo, Benjumea e Villegas 2010) (Kousoulidou, et al. 2010) (Panwar, et al. 2010) (Wang, et al. 2011) (Yanowitz e McCormick 2009). O trabalho desenvolvido teve em atenção este assunto e através da análise já referida e estruturada para a avaliação dos impactos ao nível do consumo, pretendeu constituir-se como uma evidência relativamente ao modo como

estas emissões são afetadas pela utilização de diferentes quantidades de biodiesel misturado no gasóleo e à forma como esses resultados podem ser sensíveis aos diferentes modos de funcionamento do motor.

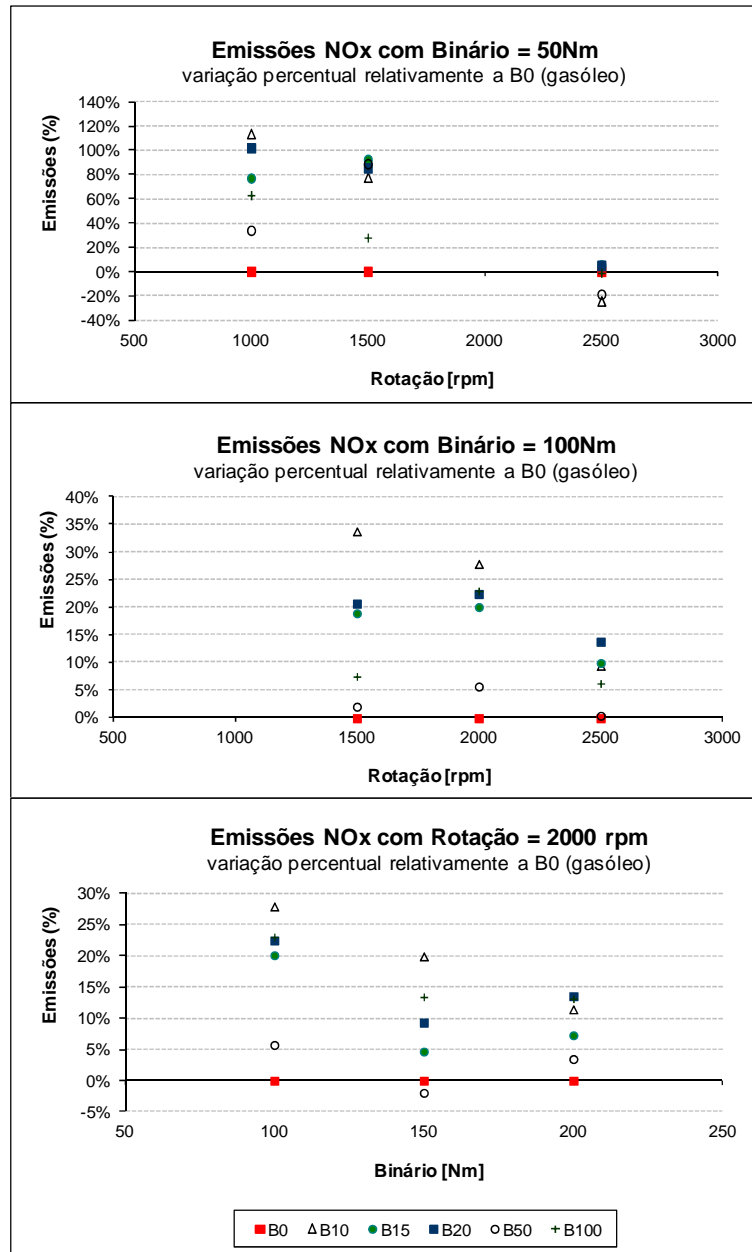


Fig. 4.10 – Resultados comparativos das emissões de NOx entre os diversos combustíveis

Os resultados obtidos relativamente à variação da concentração das emissões de NOx nos gases de escape do motor Volvo TD41 quando sujeito ao ciclo com duração de 100 min, são apresentados na figura 4.10. É possível verificar que, de facto, a grande maioria dos resultados revela um aumento da concentração deste tipo de substância nos gases de escape para as misturas com incorporação de biodiesel, surgindo mesmo valores que atingem o dobro dos verificados para o gasóleo, embora apenas para cargas e rotações baixas. Contudo para regimes de operação do motor correspondentes a cargas reduzidas (50Nm) e com o aumento da velocidade de rotação do motor (2500rpm), as

variações das emissões de NOx vão sendo cada vez mais ligeiras, apresentando mesmo uma diminuição deste tipo de poluente em cerca de 20% quando se utiliza B10 e B50 às 2500rpm.

Em termos globais, pode contudo referir-se que existe uma tendência de aumento das emissões de NOx para combustíveis que incluam biodiesel comparativamente aos resultados destas emissões para gasóleo puro.

Também é importante notar que o comportamento das emissões de NOx correspondentes a B10, B15 e B20 é muito similar e traduz-se por um aumento mais visível deste tipo de emissões do que o registado para B50 ou B100 relativamente ao gasóleo (B0). Estes resultados explicam em parte o que foi verificado na análise dos resultados de consumo, revelando-se uma melhoria ligeira na eficiência térmica do processo de combustão para os combustíveis com baixas percentagens de biodiesel, conduzindo a possíveis aumentos da temperatura de combustão que suscitarão os aumentos das emissões de NOx verificados, provavelmente pelo mecanismo térmico de Zeldovich, associado à dissociação da molécula de azoto promovida pela ocorrência de elevadas temperaturas na câmara de combustão.

Conforme discutido na revisão bibliográfica, são vários os fatores e as características que direta ou indiretamente influem sobre a quantidade de gases de NOx formada no processo de combustão. Para o combustível constituído apenas por biodiesel existe alguma controvérsia porque as variações não são muito significativas e, enquanto para alguns regimes verifica-se um aumento, para outros registam-se reduções nas emissões de NOx comparativamente à utilização de gasóleo. Para os outros combustíveis, torna-se clara a tendência de aumento das emissões de NOx para a generalidade dos regimes avaliados neste motor.

Ainda é de salientar o aspeto que se prende com o comportamento destas emissões para os vários regimes de funcionamento do motor, verificando-se que com o aumento da carga e com o aumento da velocidade de rotação do motor, as diferenças vão sendo tendencialmente mais esbatidas. Este comportamento justifica-se por um lado com a tendência genérica de aumento da concentração de NOx com o aumento da carga e da rotação, o que promove uma atenuação das diferenças dos valores relativos entre os diferentes combustíveis. Por outro lado, assumindo que a maior parte do NOx medido será formado através do mecanismo térmico de Zeldovich, o aumento nas temperaturas de combustão que estará associado ao aumento nos regimes de funcionamento promoverá também uma menor diferença relativa entre os processos de combustão para os diferentes combustíveis.

Emissões de HC

As emissões de hidrocarbonetos (HC), não sendo das mais problemáticas no caso dos motores de ignição por compressão, merecem ainda assim uma análise relativamente ao modo como são afetadas pela utilização de biodiesel no combustível fornecido ao motor e à forma como estas condições são afetadas pelos diferentes modos de operação do motor.

Analisando os resultados obtidos na medição da concentração de HC nos gases de escape para os diversos combustíveis, verifica-se que a utilização de biodiesel (B100) resulta numa diminuição

significativa das emissões de HC para todos os regimes, que oscila tipicamente entre 30 a 40%. O que se suporia era que este valor fosse sendo gradualmente reduzido com o aumento da quantidade de gasóleo no combustível. Contudo, o que se verifica é que não há esta variação gradual em função da percentagem da mistura de combustível, sendo evidente que, em todas as situações, o valor máximo de emissão de HC ocorre para a mistura B15. Regista-se uma tendência similar para as outras misturas combustíveis com uma diminuição da diferença nas emissões de HC acompanhando de modo inverso o aumento do binário. Pode-se referir que, excetuando o caso de rotação mais elevada e o caso do combustível B100, a utilização de biodiesel promove um aumento das emissões de HC.

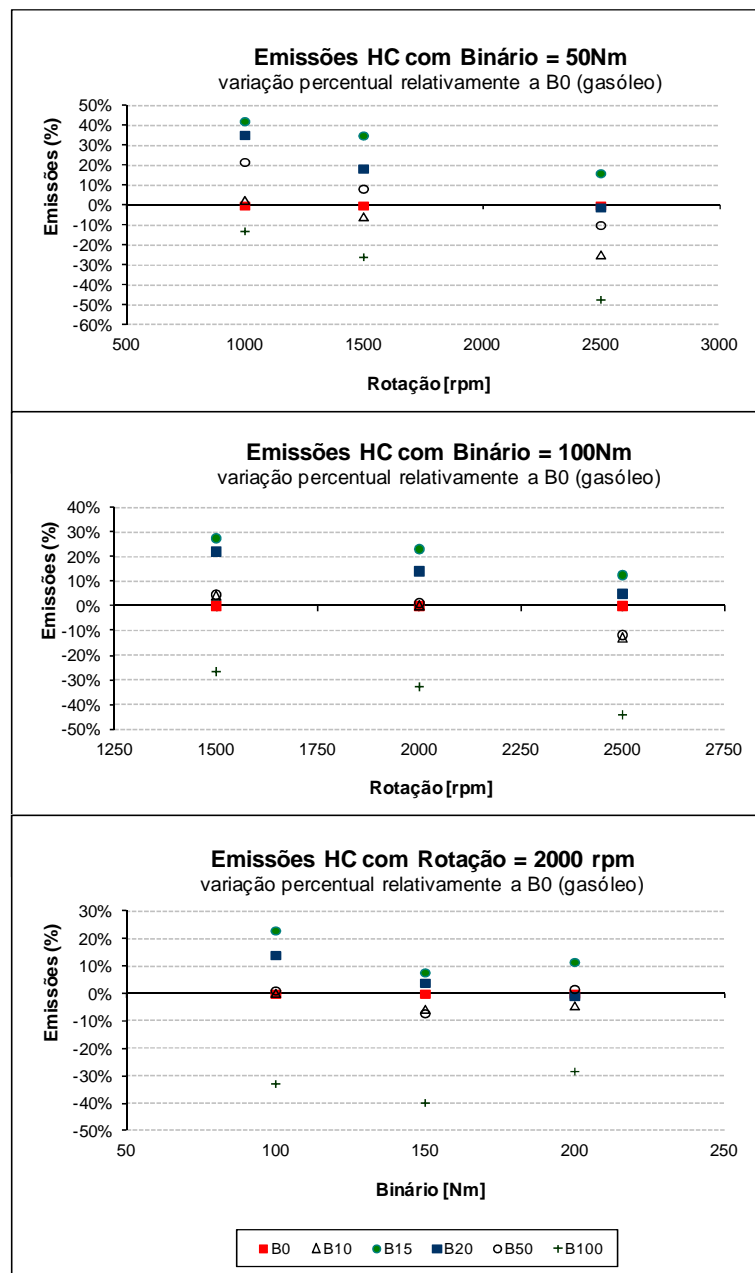


Fig. 4.11 – Resultados comparativos das emissões de HC entre os diversos combustíveis.

A razão que pode justificar estes valores de emissão mais elevados de HC poderá estar associada às diferentes curvas de destilação dos combustíveis, uma vez que a temperatura inicial de destilação do biodiesel é mais elevada que a do gasóleo o que pode potenciar uma maior dificuldade de vaporização do biodiesel, principalmente a cargas baixas e rotação também baixa. Este comportamento é atenuado à medida que a temperatura de combustão aumenta devido à ocorrência de regimes de operação energeticamente mais exigentes. Neste contexto, a situação do B100 terá de ser avaliada de modo diferente e terá forçosamente outros fatores que influenciam o processo de combustão, como sejam o menor poder calorífico do combustível e a existência de oxigénio no seio molecular do combustível e que certamente estão na origem da observada diminuição nas emissões de HC em todas as situações analisadas com B100.

4.2.1.2 Ensaios em banco de motores – regime transiente

Para a realização dos ensaios em regime transiente, foi utilizado o motor de ignição por compressão Volvo TD41, com 6 cilindros dispostos em linha e 3590cm³ de cilindrada já referido e utilizado nos ensaios em regime estacionário apresentados na seção anterior.

Nestes ensaios foi utilizado também biodiesel produzido a partir de uma mistura de soja (40%) e colza (60%), cujas características correspondiam às exigências estabelecidas pela norma europeia EN 14214 que foram apresentadas na tabela 4.1.

Foram estruturados dois ciclos de ensaio com o intuito de avaliar regimes de transição correspondentes à circulação em estrada de um veículo com uma massa total da ordem de 8000 kg sujeito a diferentes condições em termos de velocidade e perfil de percurso. Os ensaios foram definidos para ter em conta os esforços a que um pequeno autocarro estaria sujeito, considerando-se ainda a existência de uma relação de transmissão variável de acordo com a velocidade de circulação e a carga imposta.

Os parâmetros impostos para os dois tipos de circulação considerados estão representados na tabela 4.4 e nos gráficos da figura 4.12. Para garantir uma maior proximidade com a realidade, foi estabelecida a rotação correspondente a uma dada velocidade, tendo em conta a relação de caixa e a utilização de uma dimensão típica dos pneus que são normalmente utilizados nestes veículos. Os dois circuitos selecionados diferem fundamentalmente nas gamas de velocidades e de forças requeridas. O circuito mais rápido corresponde ao que se revela menos exigente em termos de esforço do motor. Esta metodologia permite comparar um circuito tipicamente menos acidentado percorrido a uma maior velocidade média, com um outro mais exigente em termos de carga e consequentemente realizado a uma velocidade média mais baixa. Em ambos os casos, a duração dos ciclos foi de 600 segundos. O modo como foram efetuados permitiu a medição do consumo e dos gases de escape, permitindo uma avaliação transiente do consumo, medido com uma frequência de aproximadamente 1Hz, e um período de estabilização a que correspondia uma medição estacionária dos gases de escape. Esta é a razão pela qual, os ciclos apresentam um perfil com transições seguidas de um período estacionário a que se segue uma nova transição e assim sucessivamente, de modo a conseguir obter valores de consumo que cubram as transições e os regimes estacionários, bem como

as medições de gases de escape que se podem associar a um determinado tipo de operação estabilizada do motor.

Ciclo A

tempo	s	0-60	60-120	120-180	180-220	220-280	280-350	350-400	400-450	450-490	490-600
passo		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
velocidade	km/h	0	30	60	60	70	90	60	30	30	0
Binário A	N.m	9,0	44,1	80,3	145,0	145,4	209,2	145,0	108,8	29,9	9,0
Rotação A	rpm	800	1011	2021	2021	1585	2038	2021	1011	1491	800

Ciclo B

tempo	s	0-60	60-120	120-180	180-240	240-320	320-420	420-480	480-550	550-600
Passo		1	2	3	4	5	6	7	8	9
velocidade	km/h	0	15	30	30	45	60	30	15	0
Binário B	N.m	9	50,3	98,1	54,9	102,4	199,0	199	50,3	9
Rotação B	rpm	800	1002,3	1010,6	1010,6	1515,8	2021,1	1491	1002,3	800

Tab. 4.4 – Valores correspondentes aos ciclos de ensaios transientes impostos.

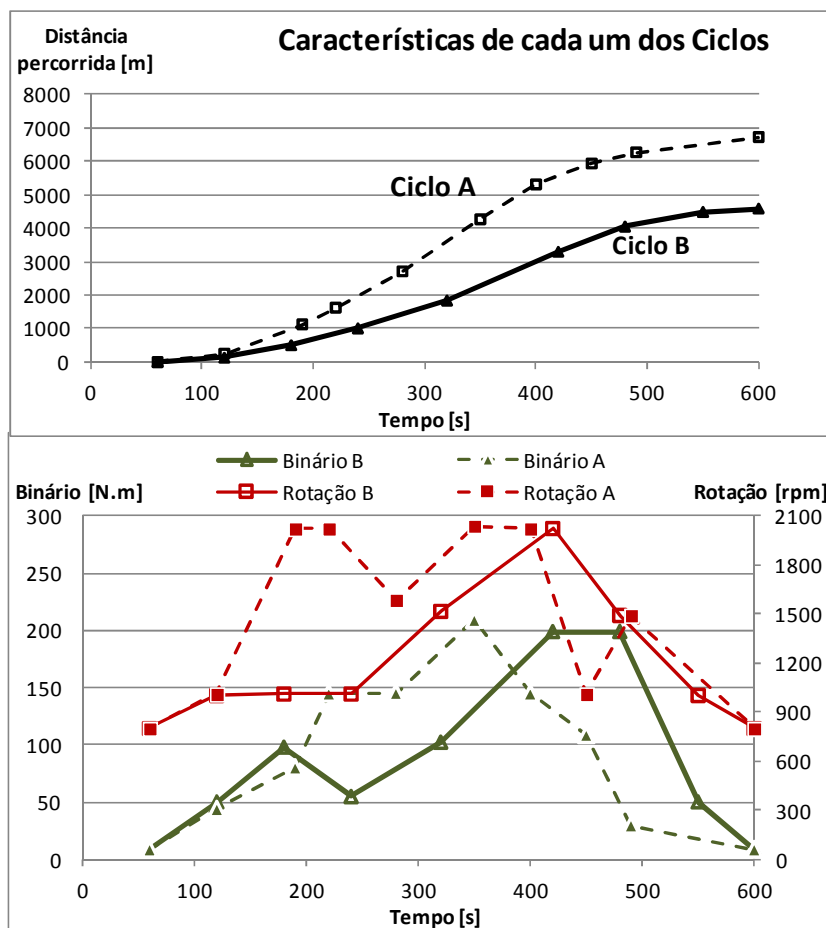


Fig. 4.12 – Representação dos parâmetros impostos em cada um dos ciclos transientes A e B.

Os testes foram realizados em duplicado, tendo sido possível garantir uma grande estabilidade das condições ambientais em termos de temperatura, uma vez que os dias em que foram efetuados tiveram condições atmosféricas semelhantes. Assim, após algum tempo para aquecimento e estabilização do motor, o ar no interior da sala de ensaios não apresentava grandes oscilações, dada a grande capacidade instalada de renovação do ar nesse espaço, com 4-5 renovações por minuto, e o

facto de a mesma ser obtida recorrendo a ar proveniente de um espaço interior de grandes dimensões.

Os dois ciclos implementados foram primeiramente efetuados através de controlo manual, o que possibilitou a realização de alguns ajustes. Após a verificação da capacidade do sistema e do motor para reagir adequadamente às solicitações impostas, foram introduzidos no software “CompComb” (L. Serrano 1999), os parâmetros que permitiram o controlo integral de cada ciclo e a aquisição dos dados respetivos relativos à resposta do motor. Este software desenvolvido pelo autor especificamente para a comparação de diferentes combustíveis, quando utilizados em motores montados no banco de ensaios de motores, permite a aquisição dos valores correspondentes aos parâmetros relevantes do funcionamento do motor e possibilita a automatização de ensaios pela definição de um ciclo. Para esta automatização são definidos os valores de binário e rotação correspondentes a cada passo e o tempo de duração nesse regime, pelo que o processo fica completamente autónomo, encarregando-se o computador de realizar a aquisição dos dados, de controlar as variáveis e enviar para as unidades de controlo do acelerador e do dinamómetro as informações necessárias ao cumprimento desse ciclo de ensaios. Com este procedimento e recorrendo a esta ferramenta, foi possível comparar de forma mais fiel os resultados dos vários ensaios, uma vez que os dados de controlo são mais comparáveis através da garantia de que o ciclo imposto é muito similar em todos os ensaios, logo as diferenças verificadas serão devidas apenas ao comportamento do motor quando alimentado por combustíveis com diferentes propriedades (Serrano, et al. 2009).

4.2.1.2.1 Resultados de consumo de combustível

Os dados relativos ao consumo de combustível foram obtidos através da média dos resultados de dois ensaios para cada ciclo, quando esses valores correspondentes a um mesmo ponto de operação do motor não apresentavam diferenças superiores a 2%. No caso dos valores de consumo correspondentes ao mesmo instante do ciclo apresentarem diferenças superiores a 2%, esses valores não foram considerados.

Conforme é possível verificar através da análise dos gráficos das figuras 4.13 e 4.14, o consumo volumétrico de combustível em função da quantidade de biodiesel incorporada é consideravelmente afetado pelo tipo de ciclo considerado, o que equivale a dizer que o tipo de operação do motor condiciona efetivamente o seu desempenho quando se trata de averiguar sobre os efeitos da presença de diferentes teores de biodiesel no combustível. Da análise das figuras 4.13 e 4.14, é notório que as misturas de combustível contendo menores quantidades de biodiesel têm um efeito algo díspar no consumo, nos dois tipos de ciclo. Tendencialmente o consumo aumenta com o aumento da quantidade de biodiesel introduzido no combustível mas, enquanto o cumprimento do ciclo B indica que essa variação é sempre crescente compensando a perda de poder calorífico do combustível, na situação do ciclo A, existe uma patamar de estabilização de consumos, entre B15 e B30, onde o consumo ronda os 3% de aumento, saltando para mais de 7% quando se trata de consumir B50. Este efeito é fundamentalmente explicado pela menor energia contida no combustível

de origem vegetal que, para responder à mesma exigência energética, necessita uma maior quantidade de combustível.

Esta diferença nos resultados nos dois ciclos é mais evidente quando se comparam diretamente o consumo de combustível obtido com o combustível B30, verificando-se um acréscimo de quase 5% para o ciclo B, enquanto esse valor baixa para 2,80% no ciclo A.

Esta análise volumétrica é importante fundamentalmente do ponto de vista económico, uma vez que o preço de venda de combustíveis é realizado numa base volúmica, permitindo assim concluir que a rentabilidade da aposta em biocombustíveis deve considerar a forma como os motores lidam com diferentes tipos de misturas e o modo de funcionamento mais frequente a que estes motores estão sujeitos.

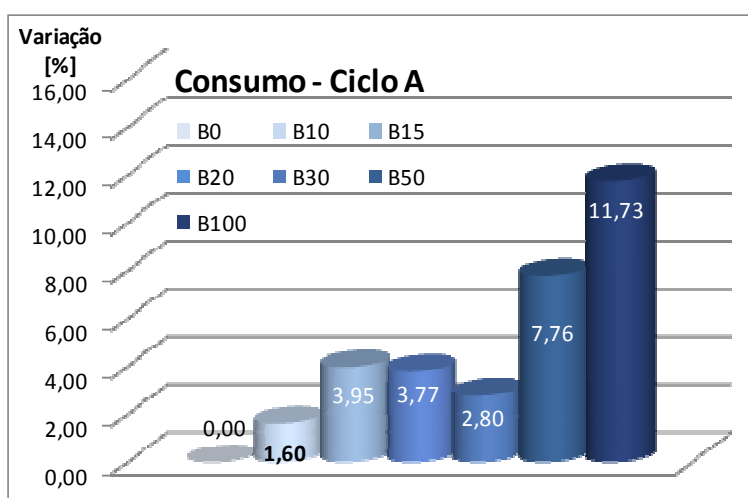


Fig. 4.13 - Variação do consumo volumétrico global no ciclo A para os combustíveis utilizados.

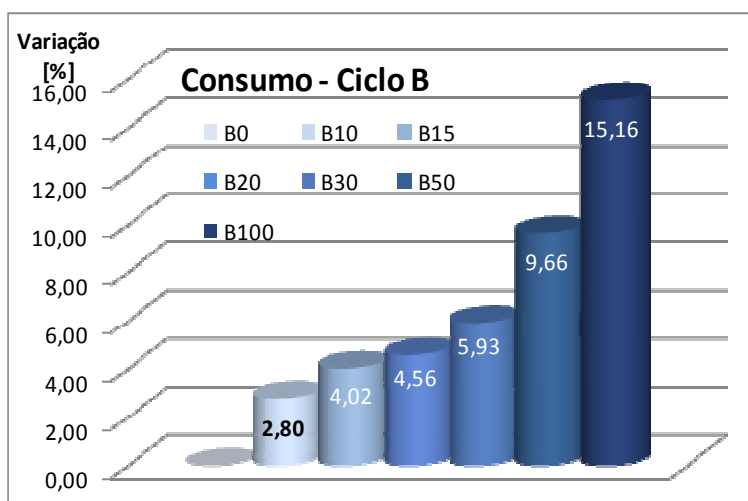


Fig. 4.14 - Variação do consumo volumétrico global no ciclo B para os combustíveis utilizados.

Para avaliar de forma mais correta as possíveis causas das diferenças registadas será necessário analisar as figuras 4.15 e 4.16. Nestes gráficos, está representada a eficiência de conversão energética (ECE) para as diferentes misturas de combustível para ambos os ciclos. Para determinar esta eficiência foi utilizada a fórmula representada abaixo (1) onde: "sfc" [g/kWh] é o consumo

específico obtido através do consumo correspondente em cada ponto de operação relativamente à potência desenvolvida pelo motor no período de medição respetiva; “PCS” é o poder calorífico de cada mistura, obtido experimentalmente e indicado na tabela 4.1.

$$ECE = \frac{1}{\frac{sfc}{3600 * 1000} * PCS} * 100 \quad (1)$$

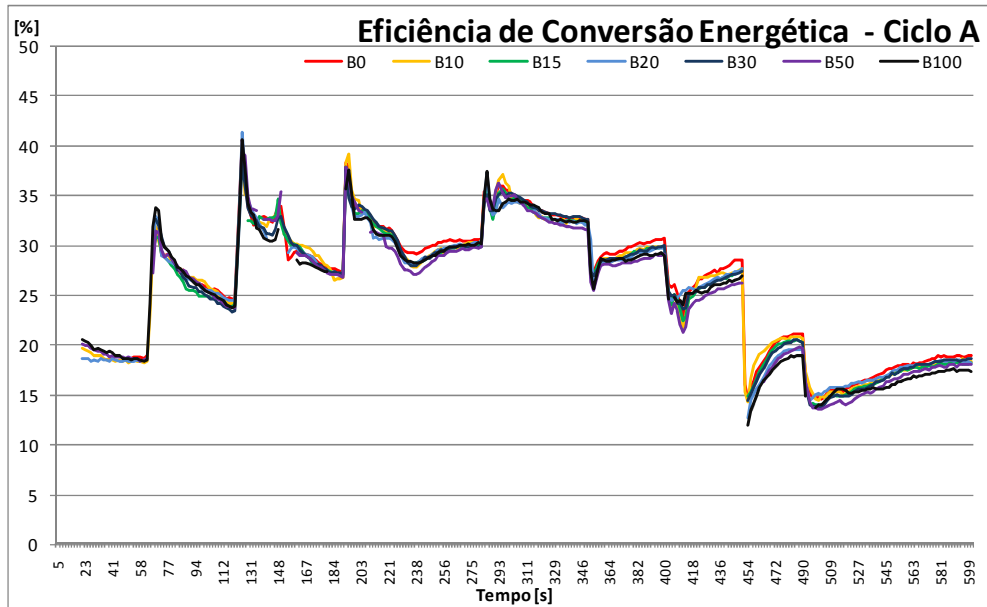


Fig. 4.15 - Valores de Eficiência de Conversão Energética (ECE) para os vários combustíveis para o ciclo A.

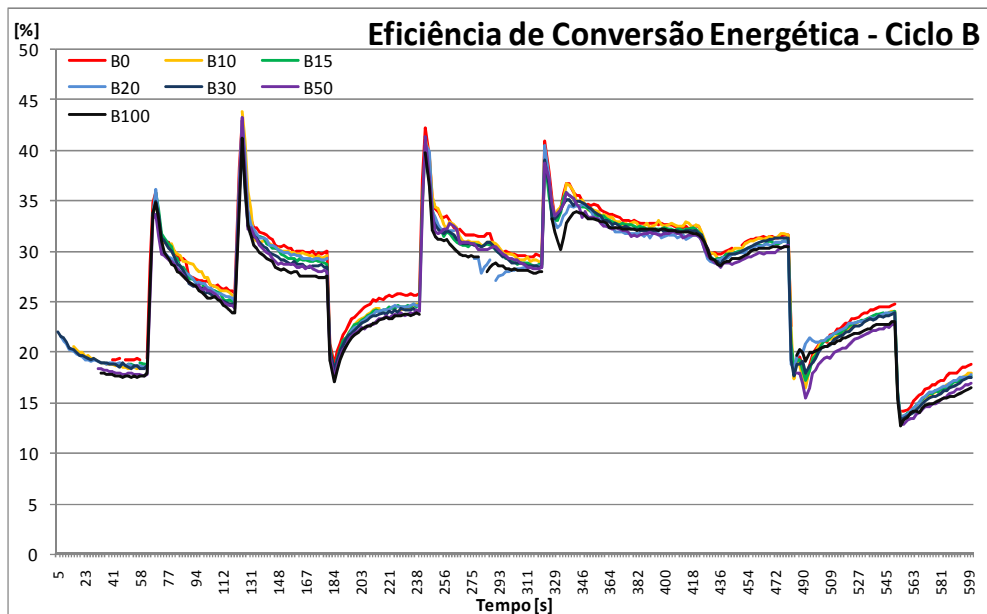


Fig. 4.16 - Valores de Eficiência de Conversão Energética (ECE) para os vários combustíveis para o ciclo B.

A avaliação da ECE no ciclo A revela que na 1ª parte do ciclo, até aos 220s (passos 1-4), quando ao motor é exigido um aumento ligeiro de rotação e de binário, existe uma grande coincidência da eficiência energética, apresentando mesmo a linha da mistura B100 valores superiores a todas as outras. Este facto também se revela na situação que ocorre no passo 6 entre os 280s e os 350s onde novamente as eficiências para as várias misturas são praticamente coincidentes. Relativamente aos passos onde a eficiência energética correspondente ao consumo de B0 se destaca das restantes, salientam-se as situações de redução de binário (passo 5), de rotação (passo 7) ou de ambos os parâmetros (passo 8), sem que aumente a exigência ao motor. Nestas circunstâncias há indícios de que o rendimento do motor diminui ligeiramente com a utilização de biodiesel. Em convergência com os resultados globais, nota-se que no ciclo B existe uma maior distinção entre as diversas situações testadas, sendo mesmo assim notória uma maior proximidade dos resultados para as situações onde é exigido simultaneamente um aumento de rotação e um aumento de binário.

Ainda da análise dos gráficos das figuras 4.15 e 4.16, é possível constatar que nas situações transientes, não é visível qualquer destaque em particular da eficiência de conversão energética para qualquer das situações, havendo em muitas das transições de regime uma sobreposição quase total de todas as linhas, seguindo-se em alguns pontos uma clarificação da ECE relativa a cada combustível à medida que o motor estabiliza o seu modo de operação. Esta situação é reveladora da importância que deve ser tratada a avaliação da utilização de biocombustíveis, contabilizando não apenas o comportamento estacionário, mas considerando adequadamente a componente transiente, contando com as dificuldades que esta análise acarreta.

O comportamento verificado nas transições de regime é possível de justificar pela conjugação da maior viscosidade, densidade e compressibilidade característica do biodiesel relativamente ao gasóleo fóssil. Quando uma alteração de regime é imposta ao motor, é possível observar um ligeiro incremento de eficiência com a utilização de biodiesel, devido ao facto de o combustível utilizado apresentar uma melhor capacidade de fornecimento pela melhoria da lubrificação dos vários componentes mecânicos. Também o aumento da densidade do combustível pode justificar o comportamento do motor, verificando-se que a maior quantidade de massa de combustível fornecida num dado instante, quando é necessário responder a uma alteração do regime do motor, irá certamente desempenhar um efeito de acelerar a capacidade de o motor responder a essa alteração, dado que o controlo de fluxo sendo volumétrico, conjugado com o fornecimento de um combustível ligeiramente mais denso implicará um aumento da quantidade de energia fornecida num mesmo intervalo de tempo, permitindo aumentar a potência disponível. Também o fator de compressibilidade é levemente superior no biodiesel do que no gasóleo fóssil. Este parâmetro, apesar de não ter sido caracterizado no presente trabalho, é apresentado normalmente com um valor mais elevado no biodiesel do que no gasóleo. Este facto permite também uma capacidade de resposta mais rápida quando é introduzida uma alteração do regime do motor, justificando a par com o aumento da lubrificidade, um fator determinante para o avanço à ignição usual nos motores equipados com sistemas de injeção mecânicos, como é o caso do motor utilizado neste estudo.

A existência de oxigénio junto na estrutura molecular do combustível pode também ser indicado como um fator determinante para alguma maior eficiência nas situações transientes, uma vez que as relações ar/combustível nestas transições são sempre um processo mais difícil de controlar e o facto de disponibilizar átomos de oxigénio junto com a introdução do combustível pode justificar uma

melhoria do processo de combustão e consequentemente uma melhoria da eficiência global do motor.

Na figura 4.17 estão representados os valores médios da ECE e do consumo específico para cada um dos combustíveis testados em cada um dos ciclos. Apesar de ser um conjunto de valores discretos, optou-se por unir os valores da ECE com uma linha tracejada, para que a análise da evolução seja mais facilmente visível.

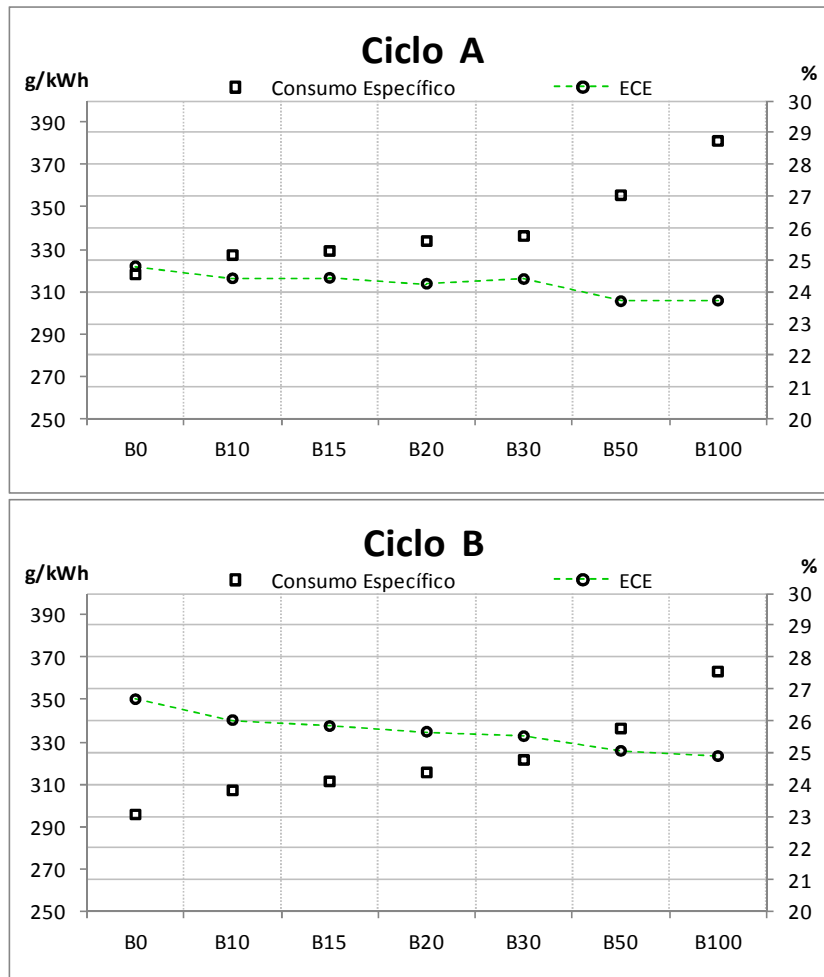


Fig. 4.17 - Variação do consumo específico e ECE para os vários combustíveis testados nos ciclos A e B.

Se relativamente ao consumo específico o valor vai aumentando, conforme se esperava pelos resultados anteriormente apresentados, já a ECE, apesar da manifesta tendência para alguma quebra proporcional ao aumento da quantidade de biodiesel consumida, revela contudo uma certa estabilidade nas situações B15, B20 e B30, após uma ligeira perda inicial, caindo também depois com a utilização de B50, aparentando então uma nova estabilidade até B100. Apesar de esta propensão ser mais clara no ciclo A, também no ciclo B ela se verifica de modo mais suave.

Conforme foi identificado anteriormente, a conjugação dos resultados relativos ao consumo e à avaliação energética consequente, permite indiciar que a conjugação de algumas propriedades do biodiesel, quando se utilizam misturas até B30, pode beneficiar o comportamento do motor. Pelos resultados dos testes realizados, será possível concluir que as variações nas propriedades do combustível, obtidas pela introdução de biodiesel terão um efeito positivo em termos de melhoria da eficiência do motor, sendo estas determinantes para a ocorrência de um máximo entre B20 e B30. Os

efeitos benéficos verificados pela introdução de biodiesel no combustível parecem perder influência com maiores percentagens de biodiesel, nomeadamente para as situações de B50 e B100.

4.2.1.2.2 Resultados de emissões de NOx

A avaliação das emissões de NOx representadas nas figuras 4.18 e 4.19, realizadas numa zona estável do funcionamento do motor, correspondendo cada medição a cada um dos passos do ciclo respetivo, permitem melhorar o entendimento relativamente à ECE. Aquilo que se pode verificar é que nas situações em que há binários mais elevados, ocorre aumento das emissões de óxidos de azoto (NOx). Uma das principais causas para o aumento deste tipo de emissões é a ocorrência de temperaturas elevadas na câmara de combustão, promovendo a dissociação da molécula de azoto diatómica que consequentemente conduz à formação dos óxidos de azoto, pela existência de oxigénio. A presença de NOx nos gases de escape é mais notória em situações de grande esforço e baixa rotação do motor, dado que se utiliza uma grande quantidade de energia, mas a rotação mais baixa não existe um fluxo de ar tão elevado que promova o arrefecimento da câmara de combustão, promovendo então a formação destes compostos. Tendencialmente, à medida que se aumenta a eficiência de combustão no motor, os óxidos de azoto têm também tendência para aumentar, devido à ocorrência de temperaturas mais elevadas.

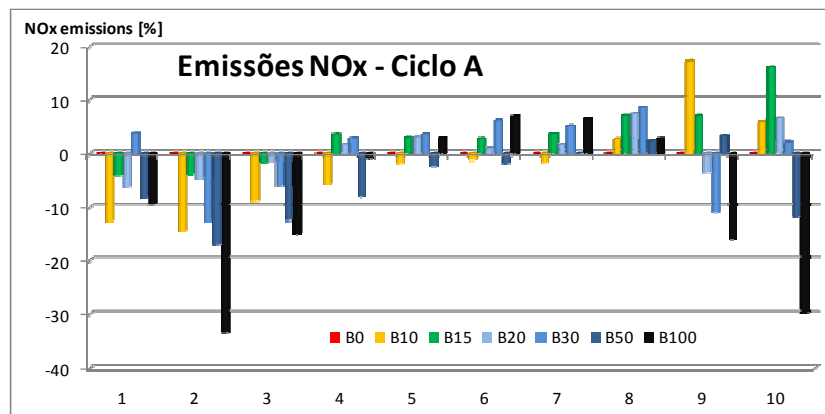


Fig. 4.18 - Comparação das emissões de NOx para os vários combustíveis no ciclo A.

Associando este efeito nos gases de escape com os valores de ECE já discutidos anteriormente, é possível de confirmar que existem pontos de funcionamento em que essa eficiência será responsável pelo ligeiro aumento de emissões de NOx, que se verifica mesmo para B100, especialmente nas situações de binário elevado. Por outro lado, nas situações em que o motor opera a baixo binário e elevada rotação a utilização de biodiesel traduz-se por uma ligeira diminuição de emissões de NOx, que é mais significativa quando se utiliza B100, apresentando um carácter aparentemente insensível relativamente às incorporações de menores quantidades de biodiesel no combustível. Este é também um fator que corrobora a existência de alguma estabilidade da eficiência de conversão energética para as situações B15 a B30.

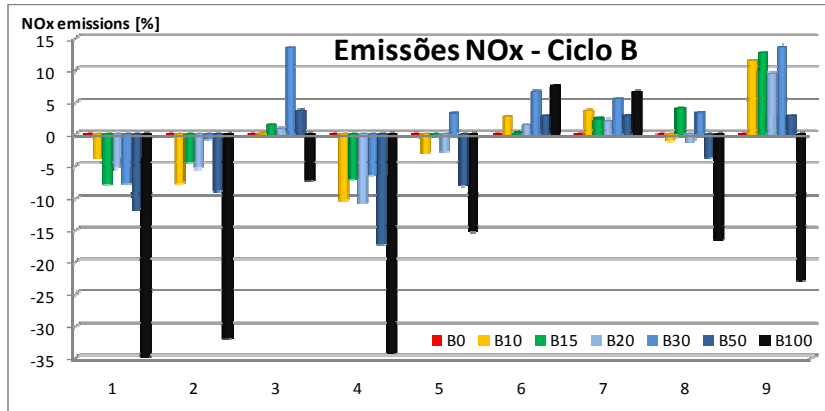


Fig. 4.19 - Comparação das Emissões de NOx para os vários combustíveis no ciclo B.

4.2.2 Análise de resultados de consumo numa frota de autocarros

Uma frota de autocarros que opera maioritariamente na região norte de Portugal foi considerada, sendo dividida em dois grupos em função dos tipos de percurso normalmente percorridos por cada veículo.

O primeiro grupo de autocarros corresponde aos Transportes Urbanos de Guimarães (TUG), sendo constituído por 33 veículos que circulam normalmente na cidade de Guimarães, através das vias urbanas, sujeitos ao tráfego citadino a uma baixa velocidade média de circulação e um tipo de operação de sucessivas paragens e arranques.

O segundo grupo, identificado como ARRIVA, denominação da empresa transportadora, inclui 168 autocarros, habitualmente utilizados em circulação extra-urbana, fazendo ligações entre povoações. Este grupo maior de veículos apresenta uma maior diversidade de trajetos que variam entre circuitos mais planos e outros com maiores variações de declive, entre estradas mais retilíneas e outras mais sinuosas, desde estradas secundárias de duas faixas estreitas, até percursos em auto-estrada.



Fig. 4.20 – Alguns autocarros da frota de veículos da empresa Arriva – Portugal, Guimarães.

Os circuitos de condução têm uma importante contribuição nos resultados de eficiência e de emissões de poluentes, estando estas influências refletidas nos dados obtidos nos ensaios realizados em banco de motores.

A frota de autocarros foi abastecida, durante o período em análise, com combustíveis provenientes da mesma origem dos combustíveis utilizados nos ensaios realizados no motor Volvo e cujos resultados foram apresentados anteriormente. A enorme quantidade de combustível consumido torna impraticável o controlo sobre todos os abastecimentos efetuados nos autocarros, contudo é possível verificar que quaisquer abastecimentos não controlados, não se traduzem por variações relevantes, quando relativizadas face à quantidade de combustível fornecido e ao grande número de abastecimentos realizados.

O presente estudo foi iniciado em Janeiro de 2008, onde foi encetado o abastecimento com B10 a todos os veículos da frota, enquanto até essa data estes veículos consumiam B0 ou B2, considerando o tipo de combustível comercializado na altura. Não é possível garantir com exatidão qual a quantidade de biodiesel incluído no combustível fornecido em Portugal na altura ou sequer se este

combustível continha algum biodiesel, sendo contudo confirmado que a ter algum biodiesel, a quantidade percentual volumétrica deste no combustível estaria certamente entre 0 e 2%.

Em Setembro de 2008 foi iniciado o abastecimento com B20, em vez do B10 utilizado no período Janeiro a Agosto de 2008. Em Janeiro de 2009 foi iniciado o abastecimento com B30.

A partir de Novembro de 2009 foi iniciada nova experiência por vontade do transportador. Este teste consistiu em que alguns veículos da frota ARRIVA, caracterizada por uma circulação essencialmente extra-urbana, passassem a ser abastecidos com o tipo de combustível comercializado em Portugal e por isso não controlado, mas que teria supostamente a incorporação de até 6% de biodiesel (B6), enquanto a restante parte dos veículos da frota ARRIVA continuaram a ser abastecidos com B30, proveniente do fornecedor/ produtor de biodiesel.

	ARRIVA	TUG
Pré-Euro	106	0
Euro 1	29	18
Euro 2	11	5
Euro 3	8	9
Euro 4	14	1
Total	168	33

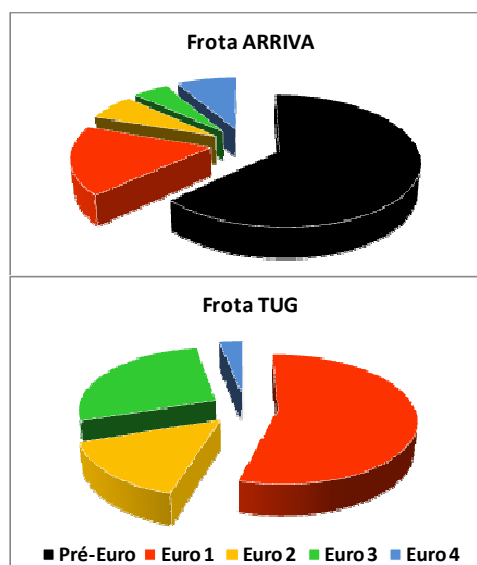


Fig. 4.21 - Constituição da frota de veículos em função da classificação da tecnologia do sistema de exaustão de gases de escape.

A frota é constituída por veículos equipados com motores de três marcas, Mercedes, Volvo e Scania, com anos de construção desde 1989 até 2007, com exceção de 3 veículos mais antigos (1983/1984). Este cenário corresponde a emissões de gases de escape desde as categorias pré-euro até euro 4, mas tendo em conta que quase metade da frota tem ano de fabrico de 1989 a 1991, a quantidade de veículos classificados como pré-euro é bastante representativa. O restante conjunto de veículos está dividido de forma mais ou menos equilibrada pelas restantes categorias, embora exista uma maior representatividade de veículos Euro 1, conforme poderá ser melhor avaliado pela análise da Figura 4.21.

Devido às questões associadas à política de gestão da empresa e às particularidades intrínsecas da frota, não foi possível garantir que os mesmos circuitos eram efetuados sempre pelos mesmos condutores. Foi estabelecido que preferencialmente os veículos e os condutores deveriam manter-se os mesmos durante o período de duração do estudo, mas de facto, a análise dos dados permite confirmar que houve vários arranjos entre estes dois conjuntos. Contudo, apesar da impossibilidade de controlar todas as variáveis, verifica-se que a aleatoriedade das alterações acaba por ter um impacto muito reduzido na informação global relativa à análise de consumo de combustível.

A análise global de consumo permitiu atingir dois grandes objetivos: em primeira instância possibilitará a obtenção de informação sobre a influência da utilização de biodiesel numa frota de veículos, definindo tendências sobre possíveis mais-valias ou défices na utilização deste tipo de

combustível e da percentagem de incorporação mais adequada; por outro lado, os resultados obtidos certamente permitirão a obtenção de informações relevantes para a caracterização de futuros trabalhos de forma mais focalizada e controlada, facultando a estruturação de um estudo mais detalhado com vista à obtenção de resultados mais precisos, avaliando de modo mais controlado uma parte mais pequena mas ainda assim que seja representativa da frota.

4.2.2.1 Resultados de consumo de combustível

De modo a definir uma base comparável foram avaliados os resultados de consumo dos meses de Fevereiro e Novembro de 2007, quando a frota de veículos era abastecida com o gasóleo comercializado nessa altura em Portugal, atendendo a que as condições meteorológicas são similares, não se registaram grandes perturbações na utilização dos veículos, pelo que as avaliações de consumo nesses períodos não apresentam diferenças significativas. Os resultados de consumo de combustível desses períodos foram assumidos como valores para comparação com os resultados relativos aos períodos similares dos anos 2008 e 2009, onde foram introduzidas combustíveis contendo diferentes quantidades de biodiesel. Deste modo, os resultados de consumo relativos a Fevereiro de 2007 foram utilizados para comparação com os dados de consumo relativos aos meses de Fev 2008 (B10) e Fev 2009 (B30). Os resultados de consumo correspondentes a Novembro de 2007 foram utilizados para analisar as variações relativas com os meses Nov 2008 (B20) e Nov 2009 (parte da frota a utilizar B30 e outra parte a utilizar B6).

A forma como foram obtidos os dados relativos ao consumo de cada autocarro, através das quantidades de combustível correspondente a cada abastecimento e dos quilómetros percorridos entre abastecimentos, permitiu obter para cada período entre abastecimentos um valor médio de consumo expresso em lts/km.

Uma primeira avaliação aos resultados de consumo correspondentes ao período de Fevereiro de 2007 com B0 permitiu revelar as diferenças existentes entre o consumo de autocarros com circulação tipicamente urbana, pertencentes à sub-frota TUG, apresentando consumo médio com valores próximos de 0,53 lts/km, e os que tinham uma circulação essencialmente extraurbana, constituindo a sub-frota Arriva, cujo consumo médio era aproximadamente de 0,41 lts/km. Também são visíveis as diferenças entre autocarros pertencentes à mesma sub-frota, essencialmente devido à diversidade de trajetos, ao tipo de condução específica de cada condutor e às características intrínsecas de cada veículo. Apesar das flutuações entre resultados da mesma sub-frota, a divisão do estudo entre as duas sub-frotas manifesta-se como acertada atendendo a que apesar das oscilações de resultados entre veículos, não ocorrem diferenças significativas no consumo global na comparação dos dados relativos a diferentes dias. Os resultados relativos ao consumo da sub-frota TUG revelaram-se de algum modo espantosos, permitindo verificar uma redução do consumo em termos globais, correspondente à utilização de combustível contendo biodiesel. A análise da figura 4.22 revela claramente uma tendência consistente, evidenciando uma redução volumétrica de 4 a 6%, manifestada pela comparação de consumo relativa aos meses de Fevereiro e Novembro. Ainda se evidencia que esta tendência de redução de consumo não se manifesta de modo proporcional à

incorporação de maiores quantidades de biodiesel, não sendo registadas grandes diferenças entre a utilização de B10, B20 e B30.

Quando comparados estes resultados com os obtidos nos ensaios realizados em banco de ensaios de motores, poderá encontrar-se uma justificação para estas diferenças que poderão estar relacionadas com o tempo que estes veículos estão ao *ralenti* e à utilização de elevados binários com rotação baixa, que podem representar uma boa parte do combustível consumido. A avaliação destes modos de funcionamento nos resultados obtidos em banco de ensaios revela pequenas diferenças entre os três combustíveis (B10, B20 e B30) relevando por outro lado resultados de consumo mais favoráveis, tal como manifestado nos resultados da sub-frota TUG.

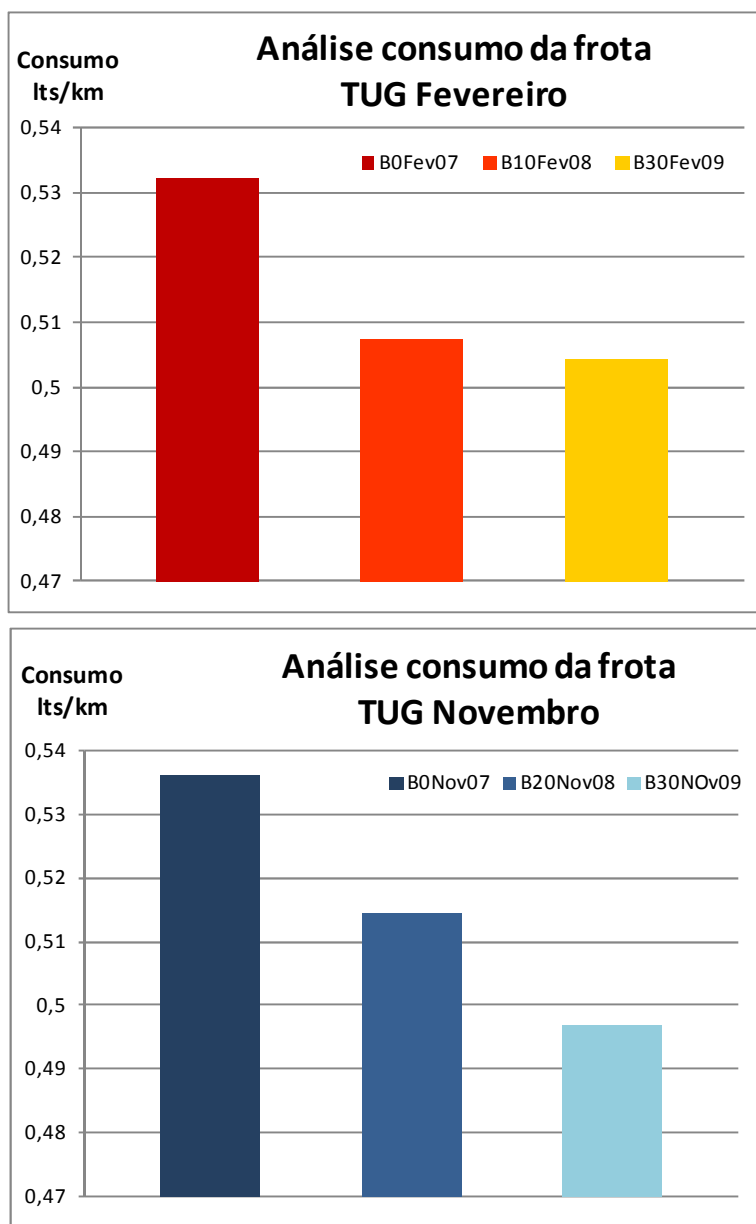


Fig. 4.22 – Resultados de consumo relativos à sub-frota citadina TUG.

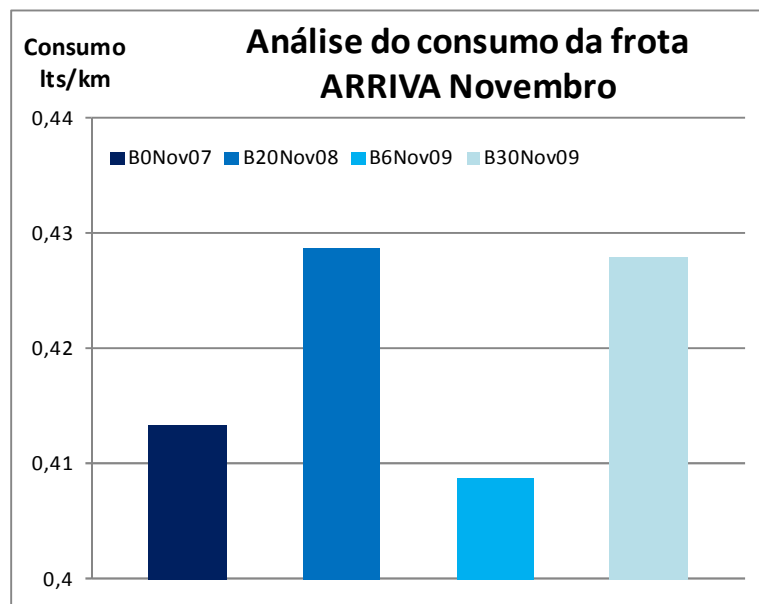
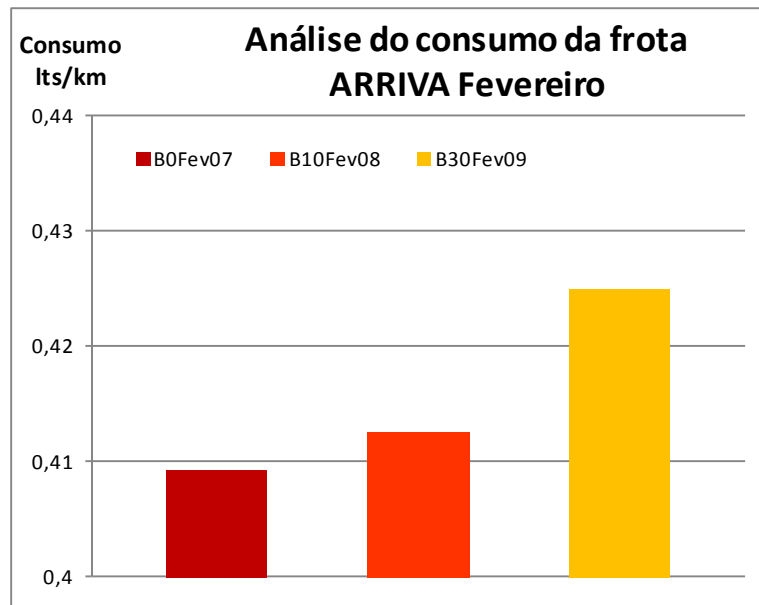


Fig. 4.23 - Resultados de consumo relativos à sub-frota extraurbana ARRIVA.

Considerando a variação das propriedades das misturas combustíveis resultantes da incorporação de biodiesel e atendendo aos valores obtidos, é possível apresentar uma justificação para a ocorrência destes resultados com base num evidente aumento da eficiência térmica fundamentalmente devido a uma melhor mistura ar/combustível. Com baixas velocidades de rotação, haverá menor turbulência do ar no interior do cilindro o que afeta a forma como ocorre a mistura de combustível no ar comprimido. Esta menor turbulência resulta em alguma perda de eficiência térmica que poderá ser minorada pela introdução de combustíveis contendo oxigénio na sua estrutura molecular. Com a utilização de biodiesel de facto introduz-se uma quantidade suplementar de oxigénio no processo de combustão mas reduz-se a quantidade de energia fornecida, devido ao menor poder calorífico deste tipo de combustíveis. Estes dois fatores interagem de modo diverso para a contribuição relativa ao efeito final de combustão do combustível consumido, o que sobressai da análise relativa das misturas

de combustível B10, B20 e B30, onde à medida que se introduz mais combustível com mais oxigénio, também se reduz a quantidade de energia disponível para a combustão.

Outras contribuições para este efeito poderão vir da melhor lubricidade do sistema de injeção propiciado pelo ligeiro aumento da viscosidade associada à utilização de biodiesel. Também um ligeiro avanço da ignição, pela utilização de biodiesel, poderá contribuir para os efeitos revelados, contudo não será certamente uma diferença significativa atendendo à ligeira diferença existente nos combustíveis relativamente ao índice de cetano, que é de aproximadamente 1 entre os combustíveis puros (52 no B100 e 51 no B0), sendo por isso bastante menor nos combustíveis utilizados (B10, B20 e B30).

A análise dos resultados de consumo de combustível da sub-frota Arriva, representados na figura 4.23, revela uma tendência esperada de subida de consumo com o aumento da quantidade de biodiesel presente no combustível utilizado. Na génese desta subida de consumo estará certamente o menor poder calorífico do biodiesel que é adicionado ao gasóleo. Este comportamento, diferenciado relativamente à sub-frota de circulação mais citadina, está certamente relacionado com a diferença dos regimes de funcionamento dos motores. No caso da circulação extra-urbana (frota Arriva), o funcionamento dos motores corresponde a velocidades de rotação mais elevadas e uma exigência mais moderada em termos de carga. Estes resultados têm alguma correspondência com os obtidos em banco de ensaios de motores.

Pode ainda ser referido relativamente aos resultados obtidos para a sub-frota Arriva quando comparados com os da sub-frota TUG que os mesmos efeitos ao nível da mistura ar/combustível poderão ser registados, contudo as contribuições associadas com a viscosidade e com a introdução de oxigénio através da utilização de um combustível oxigenado, não se revelam, nestas condições, suficientes para contrariar o efeito da menor energia proveniente do combustível com estas características. O consumo de combustível verificado com a utilização de biodiesel na sub-frota Arriva não é ainda assim proporcional à menor quantidade de energia disponível do combustível, sendo ligeiramente inferior, mas será certamente o menor conteúdo energético do combustível contendo biodiesel o fator mais determinante. Esta análise foi também verificada nos ensaios em banco de motores, resultando muito provavelmente da melhor mistura ar/combustível proporcionada por um funcionamento do motor a rotações mais elevadas com cargas médias e baixas.

4.2.2.2 Análise económica da utilização de biodiesel

Em Portugal em 2010 estava disponível a possibilidade de abastecer veículos com B10 ou B15 no mercado normal de fornecimento de combustível. Atendendo a que os combustíveis apresentam oscilações de preço relativamente frequentes, constituiu-se como valor de referência o preço do gasóleo vendido no mês de Novembro de 2010 para a análise económica relativa à utilização de biodiesel na frota de veículos considerada neste estudo (DGGE 2010). A diferença relativa entre os preços para os combustíveis contendo diferentes quantidades de biodiesel não varia de modo muito significativo com o tempo, mas o preço global dos vários combustíveis sofre alterações consideráveis.

Através da análise do preço dos combustíveis existentes no mercado em Novembro de 2010, foi possível determinar a diferença existente entre B10 e B15, o que permitiu calcular o custo expetável de B20 e B30, considerando uma variação linear nos preços, fundamentalmente associados à isenção de impostos sobre produtos petrolíferos promovida pelo governo português ao biodiesel. O preço dos combustíveis é apresentado na tabela 4.5, correspondendo a uma diminuição de 0.007€ para cada 5% de biodiesel incorporado no gasóleo.

ARRIVA	Preço Combust.	Consumo médio	Custo médio	Custo Global	Variação Global	
	[€/lts]	[lts/km]	[€/veículo/mês]	[€/mês]	[€]	[%]
B0 Nov07	1,179	0,4134	1754,8	294800,1	0,0	0,0
B10 Fev08	1,134	0,4125	1684,1	282926,8	-11873,3	-4,0
B20 Nov08	1,12	0,4288	1729,0	290469,7	-4330,4	-1,5
B30 Fev08	1,106	0,4250	1692,2	284294,3	-10505,8	-3,6
B30 Nov09	1,106	0,4279	1703,7	288474,5	-6325,6	-2,1
B6 Nov09	1,179	0,4087	1734,6			
TUG						
B0 Nov07	1,179	0,5360	3159,5	104262,6	0,0	0,0
B10 Fev08	1,134	0,5073	2876,4	94920,0	-9342,6	-9,0
B20 Nov08	1,12	0,5144	2880,5	95055,9	-9206,6	-8,8
B30 Fev08	1,106	0,5043	2788,8	92028,8	-12233,8	-11,7
B30 Nov09	1,106	0,4969	2747,9	90680,7	-13581,8	-13,0

Tab. 4.5 – Análise de custos associados ao combustível da frota considerada.

Esta análise económica foi suportada nos dados de consumo analisados anteriormente, tendo como intuito fundamental disponibilizar alguns indicadores que possam servir como base de trabalho para análises da potencialidade económica da utilização deste combustível, fundamentalmente para as empresas que estejam interessadas em utilizar biodiesel nas suas frotas.

O método utilizado nesta análise sobre a utilização de biodiesel em frotas de autocarros considerou a mesma distância mensal percorrida para todos os casos, correspondente a 3600 km/veículo da sub-frota Arriva e 5000 km/veículo da sub-frota TUG.

Torna-se claro pela análise dos resultados que a utilização de biodiesel permite obter alguma eficiência económica, visível pela diminuição dos custos operacionais mensais com combustíveis para qualquer das situações em que se utiliza biodiesel.

No caso da sub-frota TUG, seria expetável uma redução de custos relativos aos combustíveis atendendo à diminuição de consumo correspondente à utilização de biodiesel que, associado a um combustível mais barato, permitiria certamente essa redução de custos. O que se revela interessante no caso da sub-frota Arriva é que, nas condições apresentadas neste estudo, mesmo considerando a existência de um aumento de consumo de combustível, o menor preço dos combustíveis com biodiesel prevalece sobre o aumento do consumo, permitindo uma redução de custos que oscila entre 2 a 4%.

Para além do aspeto relacionado com a utilização destes dados para reflexão ao nível da administração de empresas de transportes já referido, será também importante que estes dados possam ser considerados pelos decisores políticos para estabelecer critérios e legislação apropriada que regule os preços dos combustíveis e permita a adequada sustentabilidade energética da

utilização de biocombustíveis, permitindo algumas vantagens para as empresas e indiretamente também para o estado.

4.2.3 Discussão de resultados

Da análise dos resultados obtidos é notório que o regime do motor influencia de forma muito significativa os registos de consumo quando se utilizam combustíveis com diferentes teores de biodiesel. O motor que foi utilizado não tem controlo eletrónico pelo que a quantidade volumétrica de combustível é sempre constante para o mesmo regime, mas tal não acontece relativamente à massa de combustível. Uma vez que a massa volúmica do biodiesel é maior, quanto maior for a percentagem de biodiesel utilizada, maior é a quantidade de combustível enviada para a câmara de combustão, para o mesmo regime, o que implica que a relação ar/combustível é diferente sempre que se utiliza um combustível com diferente densidade.

Para alguns dos regimes analisados, o consumo das misturas B10, B15, B20 e B30 é diferente do que seria de esperar, não apresentando uma correspondência direta com a menor quantidade de energia disponível no biodiesel, registando-se mesmo situações em que o consumo com estas misturas é inferior ao da utilização de gasóleo puro. Diferentes pontos de operação do motor são representados por resultados diversos ao nível da diferença de consumo entre os combustíveis com teor até 30% de biodiesel e o gasóleo. Torna-se claro que em alguns regimes de funcionamento do motor a eficiência energética é incrementada pela utilização de biodiesel, quando se usam as misturas B10, B15 e B20. Pode afirmar-se que a avaliação sobre os impactos da incorporação de biodiesel em gasóleo baseada numa amostragem de um pequeno número de pontos de funcionamento do motor pode conduzir a conclusões erráticas, principalmente se esses pontos não representarem o normal funcionamento do veículo em condições normais de circulação.

A análise aos resultados de consumo relativos a B50 e B100 revelam já valores que em grande parte se justificam pela diferença de poder calorífico entre os combustíveis, fixando-se num aumento da ordem de 5-6% quando se utiliza B50 e de cerca de 12% quando se consome B100.

Os resultados obtidos das emissões de NO_x em ensaios estabilizados em banco de motores revelam uma grande sensibilidade deste relativamente ao regime de funcionamento do motor, uma vez que as variações desta substância nos gases de escape são bastante grandes para diferentes cargas do motor e a diferentes velocidades de rotação. Em geral, pode afirmar-se que a emissão de NO_x aumenta com a quantidade de biodiesel existente no combustível, embora seja visível uma grande variabilidade destes resultados em função da rotação e do binário imposto ao motor, sendo maiores as diferenças nas situações de carga e rotação baixas, pronunciando o que já foi referido relativamente à análise energética, onde se identifica melhoria da eficiência de conversão energética nestes regimes.

O que importa aqui ressaltar é o comportamento não linear das misturas de combustível em função da quantidade de biodiesel incorporado, quer ao nível das emissões, quer ao nível do consumo e o comportamento diversificado das várias misturas em função do regime de funcionamento do motor.

Conclui-se pois que não basta avaliar um determinado regime de operação do motor para analisar o modo como esse motor lida com os diferentes combustíveis, sendo necessário efetuar testes que permitam avaliar as tendências registadas pelos vários combustíveis correspondentes a diferentes regimes de operação do motor.

Através da análise dos resultados obtidos através do processamento da informação da frota de autocarros que circula em tráfego urbano, é possível constatar o modo como os motores reagem quando abastecidos com combustível contendo biodiesel. Verificam-se pequenas reduções no consumo de combustível, apesar da menor quantidade de energia disponível no combustível quando incorpora biodiesel, sendo por isso confirmada a existência das perspectivas apresentadas nos resultados obtidos em banco de ensaios, no sentido da ocorrência de melhoria da eficiência de conversão energética quando se utilizam B10, B20 e B30.

Nos autocarros que circulam maioritariamente em estradas extraurbanas, em que os motores funcionam a regimes mais estabilizados a velocidades médias e altas, os resultados de consumo de combustível são mais condizentes com a menor quantidade de energia existente no biodiesel, compensada pelo aumento ligeiro do consumo. Este comportamento já tinha sido anteriormente verificado nos ensaios em banco de motores para os regimes de funcionamento do motor mais associado a este tipo de circulação.

Numa análise energética foi possível assinalar a importância da avaliação dos processos transientes. Relativamente aos vários regimes impostos verificou-se que há situações em que a eficiência energética é muito similar quando se utiliza biodiesel, mas para determinados regimes, fundamentalmente os que correspondem a processos de diminuição de binário, ou diminuição de rotação, ou diminuição de ambos, a eficiência do gasóleo puro é superior. À medida que se consideram misturas com maior quantidade de biodiesel a eficiência de conversão energética baixa.

Ao nível da eficiência de conversão energética em termos médios para todo o ciclo, foi possível confirmar que, apesar de a utilização de biodiesel em geral implicar uma ligeira diminuição deste parâmetro, ocorre uma certa estabilização para a gama de misturas entre B15 e B30, voltando depois a cair com a utilização de combustíveis com maior quantidade de biodiesel.

Através da avaliação das emissões de NO_x foi possível confirmar o que se verificou ao nível da eficiência energética, onde, para regimes correspondentes a operações de binário e rotação mais elevados havia ligeiros aumentos deste tipo de emissões. Contudo, para pontos de operação do motor em regimes menos exigentes, verifica-se uma diminuição que é mais significativa para o combustível constituído apenas por biodiesel (B100). Esta situação é comparável à detetada por outros investigadores (McCormick, Ross e Graboski 1997), (Hribernik e Kegl 2007) e (Sze, et al. 2007).

Estes resultados reforçam a importância que devem ter os ensaios transientes que cumulativamente respeitem a realidade da circulação dos veículos permitindo a validação em laboratório de situações correspondentes à real utilização dos veículos. Desta forma, tem-se em consideração a importância dos diferentes regimes sobre as análises energéticas e de performance.

Relativamente à situação em estudo não foram efetuadas análises das emissões em ensaios nos veículos em circulação em estrada. Este problema é relativamente complexo, atendendo à necessidade de utilizar os equipamentos em veículos quando em utilização normal. Será contudo objeto de estudo futuro, no sentido de conseguir desenvolver uma metodologia apropriada para conduzir este tipo de análises que, como se comprovou, é essencial para a compreensão real e concreta da influência da utilização de biodiesel em veículos.

4.3 Ensaios de veículos ligeiros

4.3.1 Ensaios em banco de rolos e em estrada

4.3.1.1 Estado da arte relativamente aos ensaios em estrada

O objetivo principal desta fase do trabalho foi desenvolver uma metodologia para testar e comparar misturas de combustíveis contendo biodiesel, em condições reais de operação em estrada, permitindo um elevado nível de confiança que garanta a sua aplicação a outros tipos de soluções energéticas para o setor dos transportes.

Existe já alguma pesquisa sobre o uso de biodiesel considerando o recurso a testes em estrada em condições reais [(Kousoulidou, et al. 2010), (Fontaras, Karavalakis, et al. 2009), (Özkan 2007), (Luján, et al. 2009), (Karavalakis, Stournas e Bakeas 2009), (McCormick, et al. 2006), (Tzirakis, et al. 2007), (Senda, et al. 2004), (Çetinkaya, et al. 2005) (Proc, et al. 2006) (Bakeas, et al. 2011)]. Neste tipo de abordagem, é muito problemático garantir as condições de reprodutibilidade e repetibilidade nos ensaios, devido às várias fontes de incerteza de controlo difícil ou mesmo impossível, como sejam os fatores relacionados com as condições meteorológicas exteriores, com a fluência do tráfego e com o comportamento dos condutores. É assim fundamental um planeamento da realização dos ensaios que minimize as influências que estes fatores, alguns dos quais sujeitos a uma grande aleatoriedade, podem vir a ter nos resultados dos testes.

Tem sido relatado na literatura (Fontaras, Karavalakis, et al. 2009), (André, Joumard, et al. 2006), (Yanowitz e McCormick 2009), (Serrano, Costa e Silva 2010)], que os testes normalizados, realizados em laboratório, sob condições muito bem reguladas e especificações muito precisas, são de facto bastante comparáveis, mas não representam a resposta do veículo real, sob condições em estrada. Não é fácil estabelecer um procedimento comum que tente simular as condições da estrada real a que alguns tipos de veículos podem ser submetidos. Existe alguma dificuldade para simular as condições transitórias, e mesmo que tal seja possível, os diferentes tipos de resposta de um motor, para uma determinada solicitação, podem ser mais adequados para um veículo do que para outro, podendo conduzir a resultados enganosos.

Foi realizado um estudo com 30 carros de passageiros, testados em banco de rolos, seguindo o ciclo de condução que simula as condições reais de estrada, ARTEMIS (Assessment and Reliability of Transport Emission Models and Inventory Systems), recorrendo aos padrões estabelecidos de circulação rodoviária como urbano, extraurbano e autoestrada, representantes de condução europeia (André, Joumard, et al. 2006). Esses mesmos 30 carros também foram testados em estrada real, cumprindo ciclos de condução específicos. Os dados de emissões demonstram que o procedimento de ensaio usual pode conduzir a diferenças grandes, particularmente nas categorias de veículos mais recentes. Há duas razões principais para as discrepâncias. Por um lado, há um conjunto único de ciclos de condução, desprezando as características do veículo. Isto pode resultar numa fragilidade ao nível da representatividade, uma vez que cada veículo tem o seu próprio comportamento em relação a algumas exigências energéticas. Por outro lado, os regulamentos e normas foram elaborados com o objetivo principal de definir as especificações para a aprovação do

veículo, não para definir diferenças nas características do combustível e nos resultados de combustão.

Os ensaios efetuados com motor VW TDI com sistema de injeção “*common-rail*”, utilizando ensaios de veículos em estrada permitiram a deteção de um aumento no consumo com o uso de combustível contendo diferentes quantidades de biodiesel (B5, B20 e B50) comparativamente ao gasóleo (Tzirakis, et al. 2007).

O uso do biodiesel proveniente de óleo vegetal usado foi estudado através de testes em estrada com um veículo equipado com um motor de injeção indireta, tendo sido possível detetar diferenças significativas no consumo, correspondente à circulação em autoestrada, mas sem diferenças em circuito urbano, quando comparado o uso de biodiesel com o uso do gasóleo (Senda, et al. 2004).

Uma investigação considerando um Renault Megane de 1900cm³ com injeção diesel “*common-rail*”, abastecido com combustível B20, foi realizada percorrendo 7500 km. Os resultados revelam que o consumo de combustível e a pressão de injeção são muito semelhantes para os dois combustíveis considerados, cuja explicação resulta do maior teor de oxigênio do biodiesel que compensa o menor teor energético do biodiesel (Çetinkaya, et al. 2005).

Através da utilização de nove veículos que utilizam dois combustíveis diferentes (4 com o gasóleo (B0) e 5 com B20) foram realizados testes em laboratório e em condições reais de circulação em estrada. As conclusões deste trabalho referem um aumento de 2% no consumo quando a mistura com biodiesel foi utilizada, mas isso não foi confirmado em testes reais de estrada onde os resultados de consumo entre os carros que consomem os dois combustíveis diferentes são muito semelhantes (Proc, et al. 2006).

Testes de dinamômetro de chassis conjugados com testes de estrada reais foram também realizados num carro VW Golf 1.9 TDI, com um motor de injeção direta “*common-rail*”, fornecendo resultados relativos ao consumo de combustível diretamente relacionados com a menor energia disponível no combustível. Foi contudo notado o impacto significativo sobre os resultados do uso do biodiesel em veículos tendo em consideração o facto de estes resultados serem obtidos em condições laboratoriais ou em estrada (Fontaras, Karavalakis, et al. 2009).

O uso de diferentes ciclos de testes de dinamômetro de chassis NEDC e ARTEMIS, considerando as influências sobre o comportamento do motor quando abastecido com biodiesel foram analisados (Bakeas, et al. 2011). Esta pesquisa apresenta resultados diferentes, mas todos revelam um aumento no consumo de combustível quando o motor foi alimentado com misturas que contêm vários tipos de biodiesel obtidos a partir de três diferentes origens (óleos de canola, óleo de palma e de fritura). Nesta perspetiva, foi avaliada a influência do uso de biodiesel em motores considerando diferentes regimes de operação, usando um banco de rolos e um banco de ensaios de motores. Os testes revelam que, em alguns regimes de funcionamento do motor, o uso de biodiesel aponta para uma diminuição do consumo, estabelecendo que esta situação exige uma análise complexa (Kousoulidou, et al. 2010).

De facto, é possível observar que a aplicação de biodiesel tem um impacto que depende fortemente das condições de condução (M. Kousoulidou, G. Fontaras, et al. 2008).

Revela-se como fundamental a definição de metodologias que permitam uma correta caracterização da utilização real de veículos e cumulativamente permita a obtenção de resultados de consumo e/ou emissões com suficiente qualidade e fiabilidade. Cumulativamente é revelada a necessidade de saber

com precisão como os motores dos veículos são afetados pelas condições da estrada, quando pequenas concentrações de BD forem utilizadas.

4.3.1.2 Metodologia utilizada nos ensaios em estrada

De modo a reduzir a influência dos fatores potencialmente perturbadores da possibilidade de comparação dos resultados obtidos nos ensaios de estrada, foi desenhada uma estratégia que assenta na utilização simultânea, em condições tão controladas quanto possível, de dois veículos idênticos alimentados com misturas diferentes de combustíveis. Os recentes desenvolvimentos e a maior acessibilidade das tecnologias de informação, particularmente no setor automóvel, possibilitam a monitorização das condições de funcionamento dos veículos e a aquisição dos dados sobre os trajetos, respetivamente através da utilização do protocolo de comunicação *On Board Diagnostics II* (OBD II) e do *Global Positioning System* (GPS).

Observando as pequenas diferenças nos consumos de veículos abastecidos com misturas com percentagens mais baixas de incorporação de biodiesel, é evidenciada a necessidade de uma elevada precisão nas metodologias de medição. Na verdade, os testes laboratoriais são bastante precisos, mas não representam fielmente a operação dos veículos em uso real. É óbvio que é difícil, nos ensaios em estrada, filtrar as influências de tráfego, do ambiente, do condutor, e outros aspetos de cariz aleatório, impossibilitando que em cada teste, se possa garantir que a influência sobre os resultados da utilização de combustíveis diferentes é exclusivamente devida às diferenças dos combustíveis.

A metodologia proposta foi pensada com o objetivo principal de aumentar a precisão dos resultados obtidos através de ensaios realizados em condições reais de estrada. Para tal foram utilizados dois carros semelhantes, um como veículo de referência (RV) e outro como veículo de teste (TV), que executam simultaneamente um mesmo trajeto, submetidos exatamente às mesmas condições de tráfego, utilizando diferentes combustíveis. A estratégia utilizada está representada esquematicamente na figura 4.24.

Foi estabelecida uma base de referência, considerando as condições de condução dos dois veículos, quando abastecidos com o mesmo combustível, no caso foi considerado gasóleo (B0) e, em seguida, o teste foi feito mudando o combustível do veículo de teste (TV) para uma mistura com 20% de biodiesel adicionado ao gasóleo (B20). A escolha desta mistura foi feita considerando três razões principais. Em primeiro lugar, tendo em conta o principal objetivo definido pela União Europeia para aumentar a percentagem de biocombustíveis no consumo total de combustíveis no setor dos transportes para a próxima década. Isto implica uma mistura entre 10 a 20% de biodiesel em gasóleo até ao final da década presente, para alcançar um total de 10% de todo o consumo de combustível do setor dos transportes. Em segundo lugar, menores percentagens de biodiesel representam pequenas alterações nas propriedades do combustível, que se manifesta em pequenas diferenças nos resultados e maiores dificuldades para detetar tendências e para distinguir entre as possíveis causas dessas diferenças e a incerteza dos resultados. Em terceiro lugar, hoje em dia o gasóleo comercializado para o público representa 5-7% de biodiesel, por isso é importante saber o que poderia acontecer no futuro próximo com percentagens mais elevadas, detetando possíveis vantagens ou desvantagens em misturas superiores.

O gasóleo puro (B0) foi obtido com as características do combustível obtido diretamente da refinaria de petróleo, sem qualquer quantidade de biodiesel. O B20 foi obtido misturando o gasóleo com biodiesel, com uma percentagem em base volumétrica de 80% de gasóleo e 20% de biodiesel. O biodiesel (B100) é constituído por uma combinação de óleo de soja (87,5%) e óleo de palma (13,5%) submetido a um processo de transesterificação, sendo produzido numa refinaria em Portugal e que está comercialmente disponível.

Parâmetros [unidades]	Biodiesel (soja 86.5% + Palma 13.5%)		Gasóleo
	Resultados	Método	Resultados
Densidade a 15°C [kg/m ³]	882	EN ISO 3675	840
Conteúdo em Ester [% (m/m)]	97,7	EN ISO 14103	--
Viscosidade a 40 °C [mm ² /s]	4,15	EN ISO 3104	2,89
Ponto Flash [°C]	>120	EN ISO 3679	>55
Conteúdo em água [mg/kg]	216,8	EN ISO 12937	--
Indicador de iodo [g iodo/100g]	117	EN ISO 14111	--
Conteúdo em enxofre [% (m/m)]	<0,02	ASTM D 874	--
Número de Cetano	>51	EN ISO 5165	51
Poder Calorífico Superior [kJ/kg]	39909	ASTM D 240	45620

Tab. 4.6 – Propriedades dos combustíveis base utilizados nos ensaios.

Na tabela 4.6 são apresentadas as propriedades do biodiesel (BD) e gasóleo. As propriedades foram obtidas em ensaios realizados por laboratórios acreditados. Os valores de viscosidade, densidade e valor de poder calorífico dos combustíveis foram medidos especificamente para este trabalho, conforme referido no capítulo III. O número de cetano do gasóleo não foi medido, é por isso que a tabela apresenta ">51", uma vez que este é o mínimo exigido pela legislação para estar disponível comercialmente. No entanto, esta propriedade é menos relevante nos sistemas de injeção "*common-rail*" do que noutros sistemas de injeção mais tradicionais (McCormick, Tennant, et al. 2005). É importante realçar as principais diferenças na comparação do biodiesel e do gasóleo, revelando as características mais sensíveis como a viscosidade, a densidade, o poder calorífico e o teor em oxigênio. O biodiesel apresenta uma viscosidade mais elevada que o gasóleo, permitindo uma melhor lubrificação do sistema de injeção; o gasóleo tem um valor mais elevado de conteúdo energético, o que significa que para a mesma quantidade de combustível em base mássica o gasóleo fornece uma maior quantidade de energia. No entanto, o controlo do fornecimento de combustível para o motor é feito de um modo volumétrico, o que implica que a maior densidade de BD, para a mesma quantidade volumétrica de combustível, corresponde a uma maior quantidade de massa de combustível que no entanto apresenta um nível inferior de energia como efeito de compensação.

Apesar do facto de o teor de oxigénio não ter sido medido, sabe-se que é de cerca de 10-12% no biodiesel enquanto o gasóleo não tem oxigénio na sua estrutura molecular. Este fator é correlacionável com a menor quantidade de energia disponível no biodiesel da mesma magnitude. Considerando o uso de B20, a percentagem de oxigénio neste combustível representa 2% da massa total, o que corresponde a uma diminuição do conteúdo energético do combustível em 2%. Atendendo a que o B20 tem uma densidade de 1% superior ao gasóleo, o conteúdo energético é da ordem de 1% mais baixo no biodiesel que no gasóleo. No entanto, as diferenças entre estes combustíveis implicam alterações da densidade, viscosidade e conteúdo em oxigénio, que irão introduzir vários efeitos nos fenómenos de combustão. É por isso que é importante perceber como o funcionamento do motor é afetado pelo uso de um combustível contendo biodiesel, quando ele é submetido a um trajeto sujeito a condições reais de circulação em estrada e de tráfego.

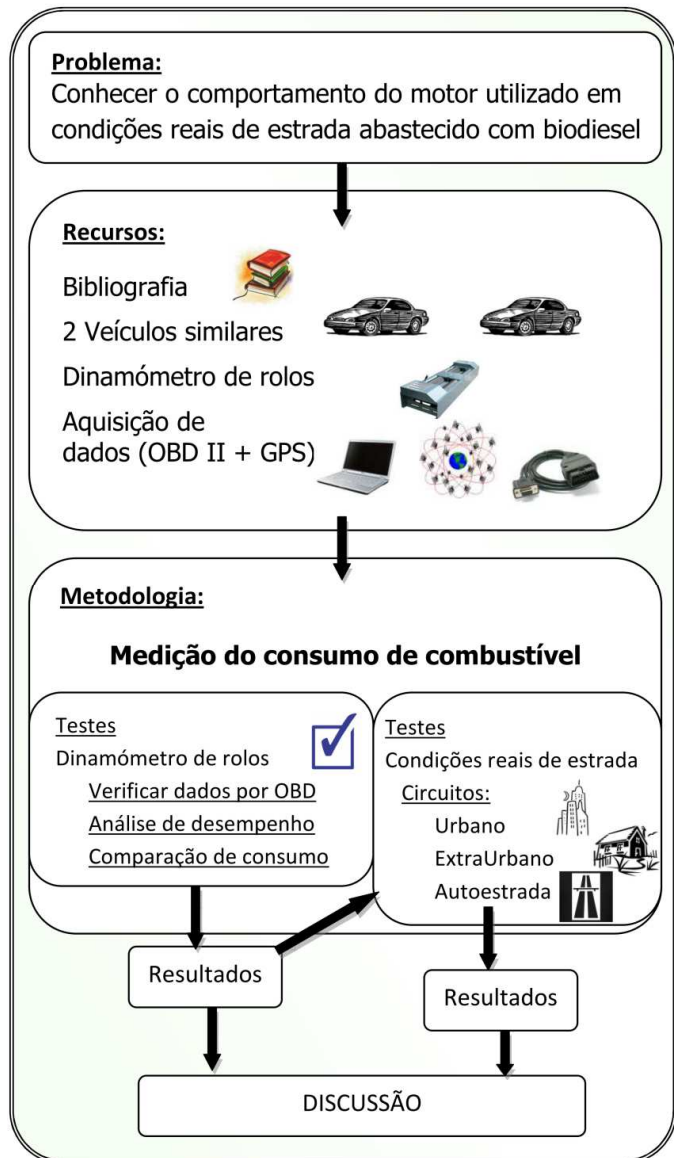


Fig. 4.24 – Estrutura da metodologia implementada.

4.3.1.2.1 Testes em banco de rolos

Para assegurar que os dois veículos estavam em condições comparáveis e avaliar a fiabilidade dos dados do sistema de gestão eletrónica dos veículos fornecidos pela ficha OBD II, os dois veículos foram submetidos a alguns testes preliminares em banco de rolos. Uma representação esquemática da montagem experimental utilizada nestes testes é apresentada na figura 4.25. O equipamento principal consiste num banco de rolos que foi utilizado para impor condições de funcionamento definidas por pares de velocidade e de binário resistente nas rodas do veículo. O consumo de combustível foi medido com uma balança de alta precisão, onde foi colocado o reservatório de combustível, tornando possível obter a diminuição da massa de combustível ao longo do tempo de realização dos testes. A velocidade de rotação do motor, as temperaturas do óleo, do combustível e as condições ambientais foram também monitorizadas.

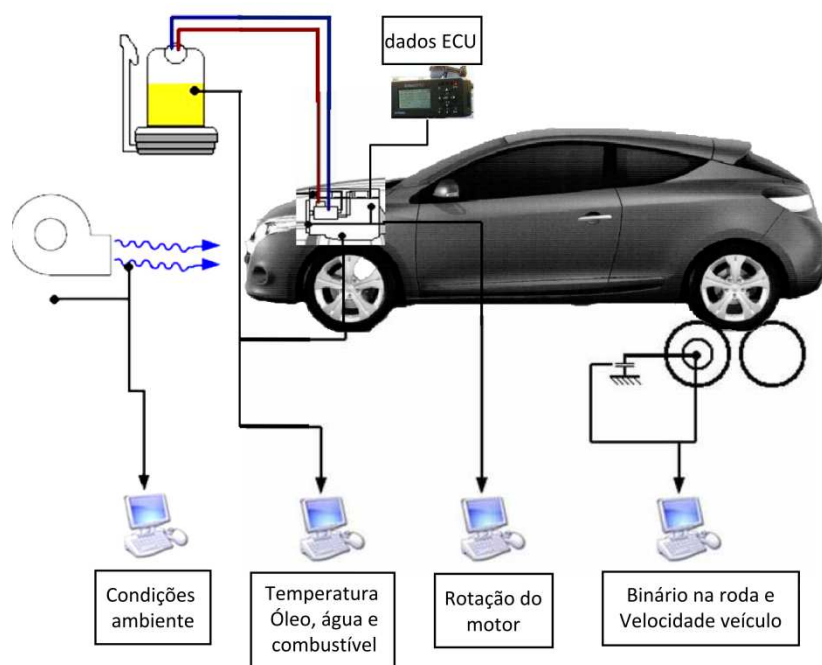


Fig. 4.25 – Esquema representativo da montagem experimental utilizada nos ensaios realizados em banco de rolos (medições feitas no eixo da frente – eixo de tração).

O objetivo destes testes era comparar os dois veículos em regime estabilizado e em condições transitórias. Para estas duas análises foram definidos dois tipos de testes diferentes. De forma a comparar a condição dos veículos em regime transitório, foi avaliado o desempenho em plena carga em toda a gama de velocidade do veículo, sendo ambos os veículos abastecidos com gasóleo (B0). Para verificar a condição do veículo em regime estabilizado, foram considerados 10 pontos estabilizados de operação, correspondentes a diferentes velocidades e cargas, correspondendo a pontos de funcionamento do motor amplamente utilizados em condições de estrada normais.

De modo a estabelecer um certo grau de confiança nos parâmetros do sistema de gestão eletrónica dos veículos obtidos na ficha OBDII, esses dados também foram adquiridos e comparados com as informações recolhidas a partir de equipamentos de laboratório. Os testes foram repetidos uma vez para cada veículo com o mesmo combustível para assegurar a consistência dos resultados.

Nas mesmas condições foram ainda realizados os mesmos testes no veículo TV, mas abastecendo o veículo com o combustível B20. Estes resultados permitem comparar os valores de desempenho e consumo para os mesmos pontos considerados, através da aquisição de dados de um mesmo veículo nas mesmas condições mas abastecido com combustíveis diferentes (B0 e B20).



Fig. 4.26 – Imagem da realização de ensaios em banco de rolos

4.3.1.2.2 Testes feitos em estrada

Nos testes de estrada foi considerada a utilização de 3 tipos diferentes de circulação:

- Um circuito urbano, feito na área urbana da cidade de Coimbra, composto por dois percursos diferentes: um sujeito a tráfego mais congestionado e outro com a circulação de veículos mais fluida, realizados em diferentes períodos do dia.
- Um circuito extraurbano, incluindo uma parte do percurso com uma rota mais acidentada em termos de declive do terreno e outra parte do percurso efetuado num terreno mais plano.
- Um percurso em auto-estrada a velocidades estabilizadas.

Os testes de estrada foram realizados seguindo um protocolo muito rigoroso. Cada veículo foi preparado com o mesmo equipamento, o mesmo peso, os mesmos pneus com a mesma pressão, e a mesma quantidade de combustível.

Para garantir a possibilidade de, em cada percurso, avaliar o consumo de combustível com grande precisão através de um processo de pesagem do reservatório utilizado no sistema de alimentação de combustível dos veículos ensaiados, a linha de alimentação normal e linha de retorno foram fechadas. Foi montada uma nova linha de fornecimento ligada à bomba de injeção, a partir de um reservatório portátil, que também recebe a linha de retorno a partir do sistema de injeção (figura 4.29).

Foi realizado o reconhecimento prévio dos circuitos de estrada para selecionar os trajetos mais adequados e para que os condutores tivessem o mesmo grau de conhecimento dos percursos.

Os reservatórios foram pesados numa balança de precisão e atestados com a mesma quantidade de combustível. Isto permitiu garantir valores muito semelhantes de temperatura do combustível em cada reservatório, antes e depois de cada teste, garantindo que este parâmetro não afetaria as diferenças de consumo de combustível observados nos dois veículos. Foi também estabelecido que os veículos apenas iniciariam os percursos quando estivessem a funcionar o tempo suficiente para que a temperatura do líquido de refrigeração atingisse 80°C. Nestas condições, desligavam-se os veículos e apenas nesse momento era efetuada a pesagem do combustível contabilizada para análise do consumo correspondente ao percurso que se iria iniciar.



Fig. 4.27 – Veículos utilizados nos ensaios em estrada.



Fig. 4.28 – Utilização dos equipamentos nos ensaios em estrada (aquis. Dados por OBD + GPS na imagem da esquerda e pesagem de reservatórios de combustível na imagem da direita).

Após cada medição, colocavam-se os reservatórios nos veículos, efetuavam-se as ligações necessárias e cada veículo funcionava durante um minuto exato sendo então desligado. Após este procedimento os dois carros eram considerados preparados para realizar os testes, sendo colocados a funcionar em simultâneo, no instante em que tudo estava preparado para efetuar a rota definida. Depois de cada circuito ou parte do circuito percorrido, os veículos regressavam ao laboratório e eram desligados em simultâneo, sendo efetuada a pesagem de cada reservatório, permitindo a medição da massa de combustível consumida por cada veículo. Este procedimento permitia assegurar que os ciclos de carga dos motores dos veículos e o correspondente tempo de operação eram iguais.



Fig. 4.29 – Imagem onde é possível identificar as ligações efetuadas na alteração do circuito de combustível, permitindo o abastecimento e retorno do combustível ao reservatório utilizado.

Nos primeiros testes ambos os veículos executaram os circuitos com gasóleo (B0), circulando a uma distância próxima, com o veículo TV à frente do veículo RV. Os condutores foram treinados e havia contacto por transmissores de rádio através dos passageiros dos veículos, assegurando que as alterações da relação de caixa eram realizadas com a mesma sequência e de forma sincronizada. Foi tido o devido cuidado com a distância entre os veículos, tentando, de acordo com o possível, mantê-la constante durante a execução dos diversos circuitos, mas variando essa distância de modo proporcional à velocidade dos veículos. Para velocidades mais elevadas, a distância entre os veículos foi estendida, assegurando que o arrasto aerodinâmico não afetava de forma diferente os dois veículos. Este procedimento pretendeu estabelecer uma ligação virtual entre os dois carros, impondo as mesmas evoluções temporais das condições de velocidade e de carga para ambos, assegurando que as diferenças de consumo só poderiam ser atribuídas ao combustível.

	Circuito Urbano	Circuito Extraurbano	Circuito Autoestrada
Percurso	Coimbra - Coimbra	Coimbra – Penacova – Coimbra – Ceira - Condeixa - Coimbra	Coimbra – Figueira da Foz - Coimbra
Controlo de velocidade	Limitador a 60km/h	Limitador a 90km/h	Regulador velocidade a 120km/h e a 130km/h
Distância entre veículos	Veículos tão próximos quanto possível	Veículos a uma distância mínima de 50m	Veículos a uma distância mínima de 300m

Tab. 4.7 – Metodologia utilizada para cada percurso selecionado.

O circuito urbano foi efetuado na cidade de Coimbra, o circuito extraurbano correspondeu ao percurso Coimbra-Penacova-Coimbra-Ceira-Condeixa-Coimbra e o circuito de autoestrada no troço entre Coimbra e a Figueira da Foz. Nos circuitos urbano e extraurbano a velocidade foi limitada a 60 km/h e 90 km/h respetivamente, tendo os veículos circulado a uma distância mais reduzida no percurso urbano e a uma distância mínima de 50m no extraurbano. No circuito de autoestrada os veículos circulavam a uma distância mínima de 300m e com utilização de regulador de velocidade com valores de 120km/h e 130 km/h em diferentes partes do circuito. Depois de um conjunto de testes realizados com os dois carros abastecidos com o mesmo combustível, no veículo TV foi substituído o combustível para B20 e todos os circuitos foram repetidos duas vezes, utilizando o mesmo procedimento. A comparação entre os resultados revelam claramente as diferenças introduzidas pelo uso de 20% de biodiesel.

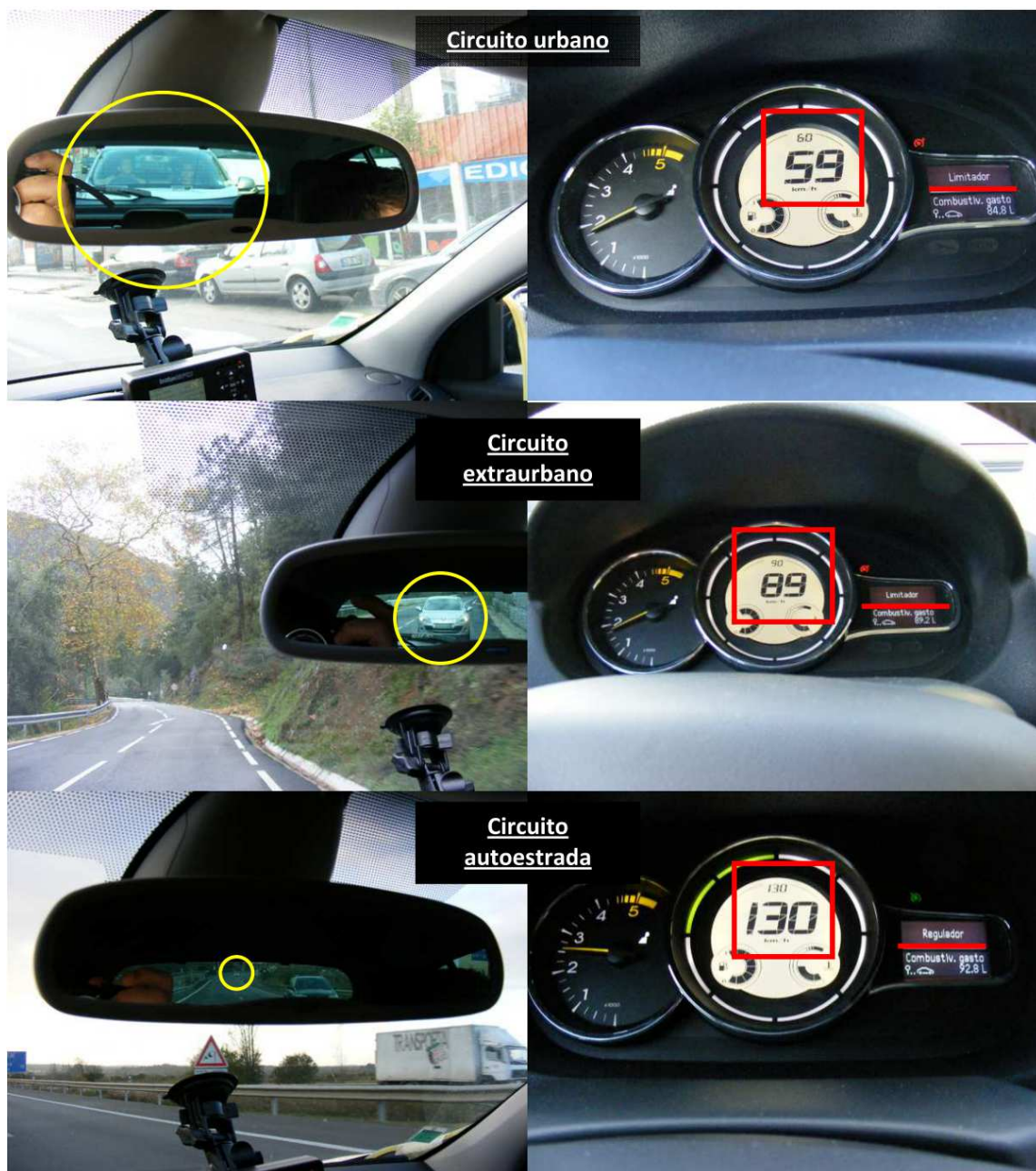


Fig. 4.30– Imagens representativas da circulação dos veículos cumprindo as distâncias definidas e modos de limitação ou regulação de velocidade impostos pelo protocolo.

O trajeto do circuito urbano realizado na cidade de Coimbra representa-se na figura 4.31, através do recurso ao software “Google Earth”. Os dados correspondentes aos parâmetros fornecidos pelo sistema de gestão eletrónica do veículo, como a velocidade de circulação, a velocidade de rotação do motor, o fluxo de ar de admissão a pressão de injeção de combustível e outros também foram adquiridos, com uma frequência aproximadamente de 0,7Hz, permitindo associar os dados do funcionamento do veículo aos diferentes pontos do percurso. Estes dados permitem comparar os dois veículos, em cada ponto do circuito e deste modo avaliar as eventuais diferenças.



Fig. 4.31 – Representação do circuito urbano percorrido na cidade de Coimbra, utilizando o software “Google Earth”.

4.3.1.3 Resultados

4.3.1.3.1 Resultados obtidos nos testes realizados em banco de rolos

Foram escolhidos 10 pontos de operação, considerando-se diferentes velocidades e cargas, com o seletor da caixa de velocidades em 4ª e 3ª, variando a velocidade do veículo entre 40 e 70 km/h. O automóvel TV foi submetido a cada um destes pontos seguindo-se um período de funcionamento estável, com uma duração de, pelo menos 30s, antes de mudar para outro ponto de funcionamento. Este período estável de funcionamento foi essencial para uma medição correta do combustível consumido, através da análise dos dados obtidos no sistema de aquisição do sinal da balança utilizada para pesar o reservatório de combustível de onde se efetuava o abastecimento. A temperatura do combustível foi também medida, permitindo controlar as diferenças existentes entre os vários testes. Depois da realização de dois testes e do teste de desempenho de plena carga com o veículo TV, foi mudado o combustível de B0 para B20, drenando todo o combustível existente no interior dos tubos e no sistema de injeção de combustível. A alteração do combustível no reservatório colocado na balança de onde se fazia o abastecimento foi efetuada e foram restabelecidas as ligações do circuito de combustível, deixando o veículo em funcionamento durante mais de um minuto, de modo a garantir o preenchimento do circuito apenas com o combustível B20.

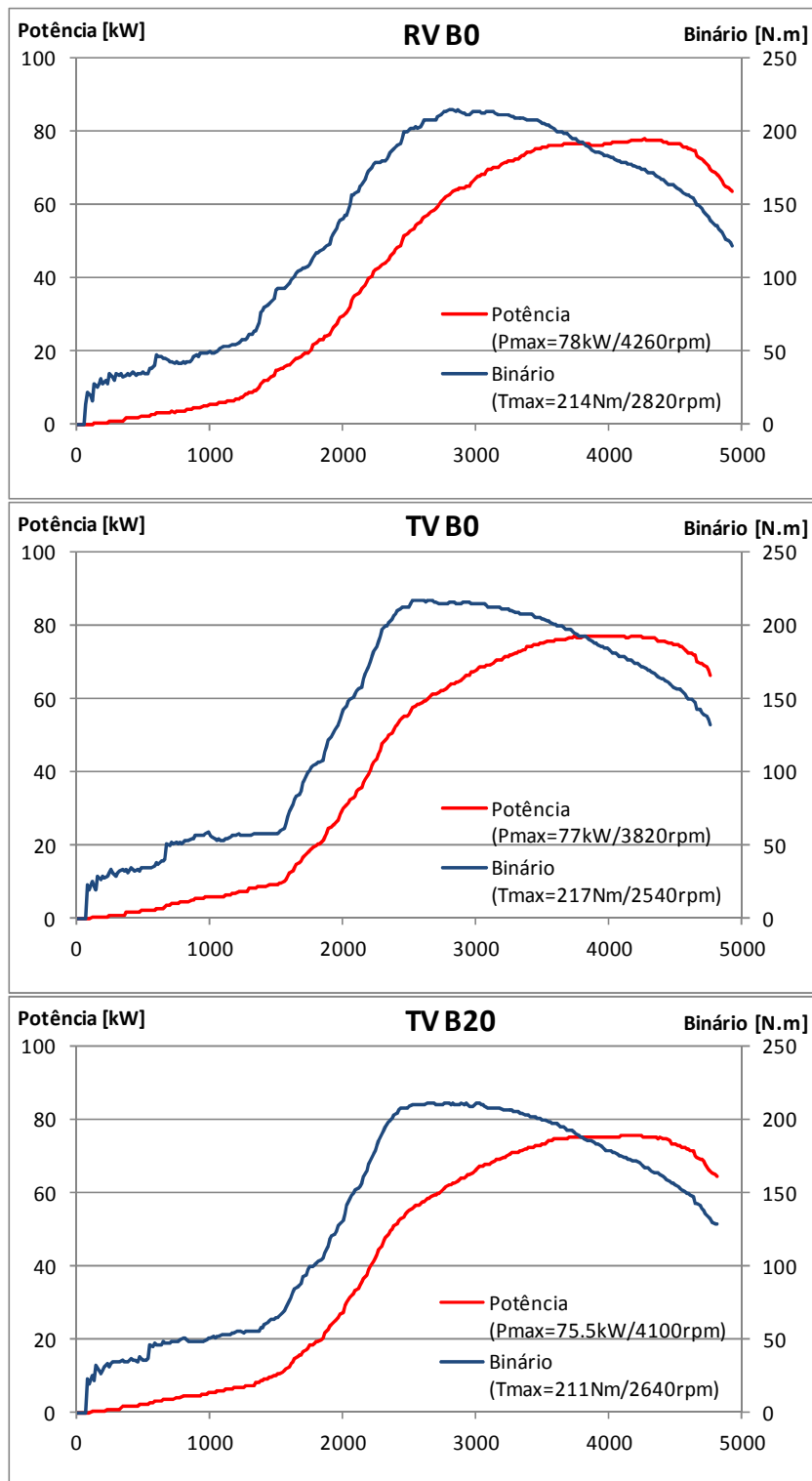


Fig. 4.32 – Resultados de desempenho para os dois veículos (RV e TV) com os dois tipos de combustíveis (B0 e B20).

O procedimento de teste de medição foi repetido com este combustível tendo depois sido efetuada a troca dos carros, executando o procedimento exatamente da mesma forma com o veículo RV, mas

testando apenas com B0, uma vez que este veículo não estava previsto experimentar qualquer tipo de combustível com biodiesel.

Os resultados dos testes de desempenho estão representados nos gráficos da figura 4.32, onde se apresentam dados semelhantes para as três situações (TV com B0, TV com B20 e RV com B20), que também são bastante semelhantes aos dados do fabricante (é indicado que o motor tem uma potência máxima de 80 kW, às 4000rpm). Estes resultados confirmam que os dois veículos são realmente muito idênticos, apresentando a mesma configuração da ECU e que a utilização de biodiesel (B20), representa uma diminuição muito ligeira de potência e binário, na ordem de 2%.

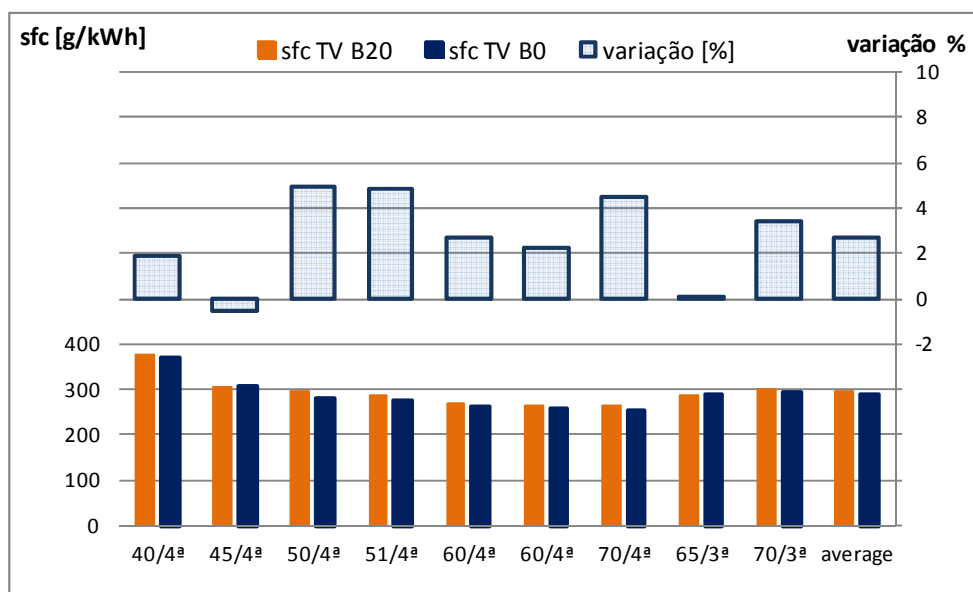


Fig. 4.33 – Comparação do consumo obtido no veículo TV nos ensaios em banco de rolos, quando abastecido com B0 e B20.

Os resultados de consumo revelam que a utilização de B20 conduz à existência de um pequeno aumento no consumo específico de combustível.

A comparação do consumo específico de combustível para a operação do veículo TV com B0 e B20 é apresentado na figura 4.33, sendo possível verificar que, para quase todos os pontos de operação, os valores mais elevados de consumo específico foram obtidos com B20. Isto é devido principalmente ao conteúdo mais baixo de energia no biodiesel que implica a disponibilidade energética 2% mais baixa no B20, perto da variação observada, em média, para todos os pontos de operação (2,66%). No entanto, os resultados também revelam que esse comportamento não é consistente em todos os pontos de operação, uma vez que existe uma variação desde -0,6% até quase 5%.

4.3.1.3.2 Resultados obtidos nos testes realizados em estrada

A comparação das evoluções temporais de velocidade dos dois veículos nos diferentes trajetos assegura que a sequência das cargas a que estiveram sujeitos os motores destes veículos é muito semelhante. Na verdade, esta análise representa o principal critério para a garantia de confiança nos resultados, desde que haja uma utilização sincronizada da caixa de velocidades de ambos os veículos. Considerando que os dois carros foram testados exatamente ao mesmo tempo, na mesma estrada, pode ser assegurado que as condições ambientais, de condução e de estrada são também as mesmas para ambos os veículos. Garantindo que os veículos viajam à mesma velocidade, as diferenças de consumo são apenas devidas às diferentes propriedades dos combustíveis e as diferentes formas como o motor lida com essas diferenças.

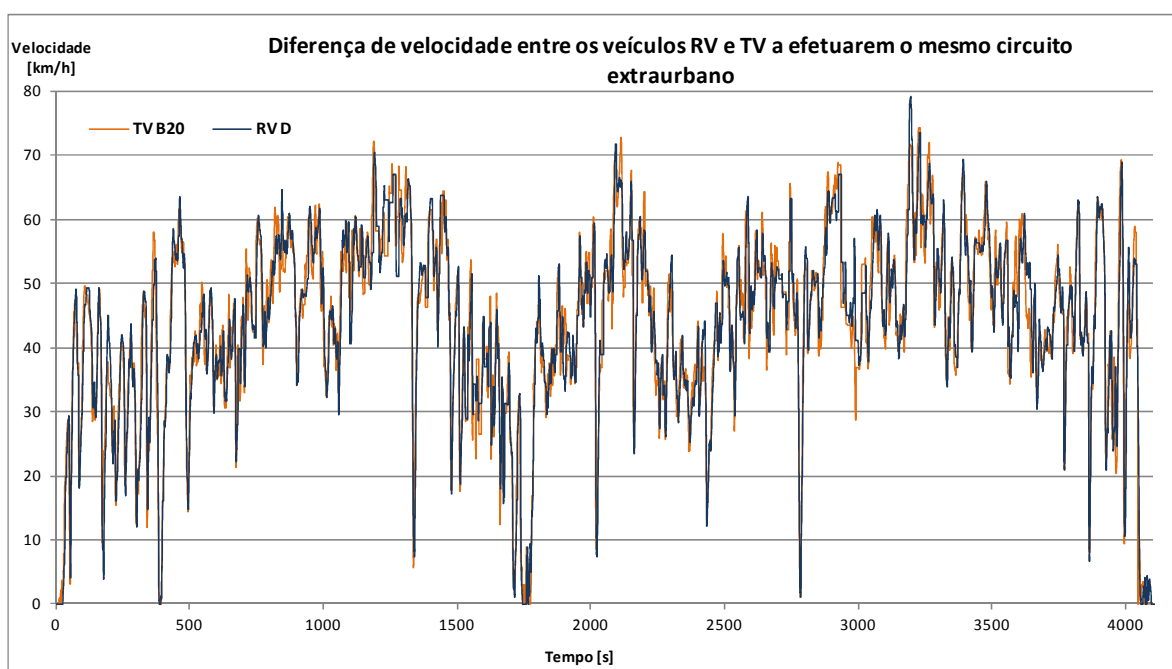


Fig. 4.34 – Evolução temporal das velocidades dos dois veículos nos testes no percurso extraurbano.

A Figura 4.34 representa a velocidade correspondente aos dois veículos, RV e TV, alimentados com B0 e B20, respetivamente. Torna-se evidente a semelhança das evoluções das velocidades de ambos os veículos no circuito extraurbano, sendo apenas observadas pequenas diferenças. Na medição deste parâmetro, é importante notar que o principal valor adquirido foi a velocidade de GPS, mas, uma vez que também os valores de velocidade dos veículos foram obtidos através de conexão OBD II, esses valores de velocidade foram usados para preencher as lacunas obtidas na medição GPS naqueles pontos onde os sinais dos satélites não estavam disponíveis.

Para ter a certeza sobre os dados de medição de velocidade, o valor médio dos valores de velocidade através de todo o ciclo foi obtido e comparado. Para o veículo RV a velocidade média no circuito extraurbano representado na figura 4.34 foi de 43,658 km/h com um valor de desvio padrão de 14,44 km/h, enquanto no veículo TV, a velocidade média foi de 43,630 km/h com um desvio padrão

valor de 14,57 km/h. Isto significa que, uma vez que os veículos executaram o mesmo percurso ao mesmo tempo, seria previsível a obtenção dos mesmos valores de velocidade média que se verifica com um erro de 28m para cada hora de percurso. Através da análise da figura 4.34 foi possível verificar que as diferenças nas velocidades entre os dois veículos não foram significativas, mas isto também foi confirmado pelo valor de 0,05 km/h correspondente à média das diferenças de velocidades entre pontos análogos, demonstrando que as variações nas velocidades em ambos os veículos têm uma amplitude muito similar e que os dois perfis são claramente bastante idênticos.

Os valores das diferenças de consumo só foram considerados no caso de se verificar uma variação inferior a 1% do valor médio dos resultados de consumo de combustível obtido para ensaios semelhantes, considerando a utilização do mesmo combustível. Sempre que os resultados não confirmaram este requisito, o valor correspondente não foi considerado. Este processo permite detetar e filtrar possíveis imprecisões associáveis à metodologia. No presente caso, houve efetivamente necessidade de rejeitar alguns resultados obtidos nos primeiros testes e que tiveram fundamentalmente a ver com a imaturidade do processo, mas cuja ocorrência permitiu otimizar todo o método.

A primeira evidência que se pode retirar da análise dos resultados é o facto de o mesmo veículo, percorrendo o mesmo circuito, com o mesmo motorista e consumindo o mesmo combustível num período de tempo diferente, se traduzir em diferenças substanciais sobre os resultados de consumo, confirmando as mais-valias deste método em comparação com outros métodos que utilizam apenas um veículo, atestando que existem vários aspetos que condicionam os resultados de consumo além das propriedades de combustível. Como exemplo claro desta situação pode citar-se a evidência relativamente à ligação entre a familiarização do piloto com o circuito, o que permite diminuir o consumo à medida que este vai sendo repetido nas mesmas condições. É claro que com vários testes esta situação pode ser superada, mas revela-se claramente que o uso de apenas um veículo executando um mesmo percurso, com dois combustíveis diferentes, em diferentes períodos de tempo não pode fornecer dados fiáveis sobre a influência das propriedades desses combustíveis, uma vez que é quase impossível reproduzir as condições de estrada, sendo por isso muito difícil garantir a reprodutibilidade das condições de teste, que permita a comparação dos resultados. Isto claramente reforça a relevância da metodologia apresentada.

Analisando de forma grosseira os resultados obtidos, parece claro que o uso do biodiesel em motores “*common-rail*” com sistema de injeção aumenta o consumo de combustível, mas, como assumido nas hipóteses do presente trabalho, a maneira como o biodiesel afeta o consumo é muito sensível ao tipo de utilização do veículo. De facto, em autoestrada e em circuitos urbanos, o consumo mássico de combustível é altamente afetado pela presença de biodiesel, aumentando o consumo em um pouco acima de 0,2 kg/100km, o que representa aproximadamente 5% de aumento. No entanto, em circuitos extraurbanos este aumento é muito ligeiro, representando apenas 1% no consumo mássico. Torna-se evidente depois de uma análise enérgica dos resultados que as condições de circuito extraurbanos conjugam uma situação mais vantajosa para a utilização de B20, enquanto em circuitos urbanos e autoestrada, é visível uma certa queda na eficiência energética, uma vez que é necessária mais energia para viajar exatamente na mesma rota, no mesmo ambiente, na mesma estrada e nas mesmas circunstâncias de tráfego. Isso é relevante porque seria esperado que o aumento de consumo ocorresse e fosse da ordem de 2%, tal como analisado nos testes em banco de rolos, revelando o menor teor energético do biodiesel. Parece contudo importante notar que para a utilização no circuito extraurbano há uma melhoria da eficiência energética com a utilização de B20.

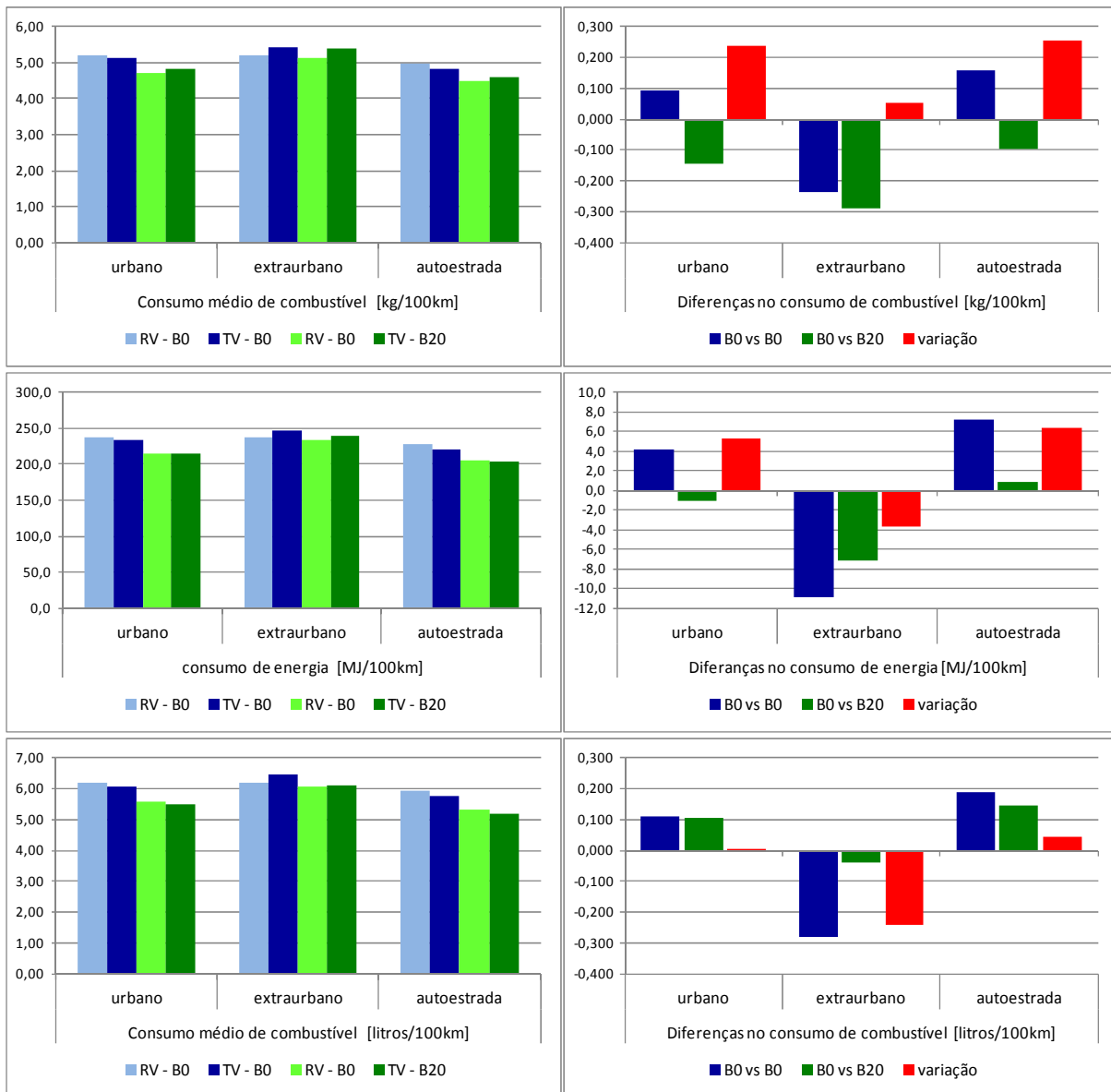


Fig. 4.35 – Representação dos resultados relativos ao consumo dos veículos nos testes em estrada considerando a: análise gravimétrica (a,b); análise energética (c,d); análise volúmica (e,f).

Atendendo a que o sistema de injeção de combustível controla os fluxos volumetricamente e que a comercialização de biodiesel também é feita em base volumétrica, é essencial efetuar a medição de consumo de combustível em massa, mas não é tão relevante avaliar os resultados nessa perspetiva, sendo mais importante fazer a análise dos resultados de consumo de combustível de um ponto de vista volumétrico. Analisando os resultados nos gráficos e) e f) da figura 4.35, é interessante verificar que o consumo em litros/100km não é afetado pela utilização de B20 no tráfego urbano. Na verdade, quando os veículos circulam em trajeto extraurbano, o consumo de combustível é reduzido em cerca de 0,1 litros/100km quando abastecidos com B20 relativamente ao consumo registado com B0. Apenas a condição de utilização de B20 em veículos em autoestrada representa um aumento no consumo de combustível, de 0,05 litros/100km. Torna-se claro que a operação estabilizada do motor, circulando em autoestrada, revela as diferentes propriedades energéticas dos combustíveis, mas

com cargas baixas e médias e velocidades baixas e médias, principalmente com transições frequentes, a influência energética é minimizada pelo efeito conjugado da densidade, viscosidade e maior disponibilidade de oxigênio no biodiesel. A maior viscosidade e maior densidade apresentada no biodiesel podem representar um ganho energético para o motor, dado que, em situações transitórias, pode possivelmente dispor de mais combustível mais rapidamente, permitindo melhorar ligeiramente a resposta na injeção de combustível. A maior densidade permite a introdução de mais combustível considerando a mesma quantidade volumétrica de combustível injetado. Por outra perspectiva, pode ainda referir-se a disponibilidade de oxigênio do biodiesel, que pode traduzir-se numa ligeira melhoria em termos de eficiência energética do processo de combustão, principalmente nas situações de transição, onde o ar e o combustível apresentam diferentes níveis de inércia. A presença de oxigênio extra já incorporado no combustível pode influenciar o processo de combustão nos regimes de alteração dos fluxos de ar e combustível. Cada um destes fatores apresenta apenas pequenas influências, mas a contribuição conjugada destes aspetos pode possivelmente explicar a tendência observada.

4.3.1.4 Desempenho do método de ensaios em estrada

De modo a analisar a qualidade dos dados obtidos e de alguma forma efetuar uma discussão prévia desses resultados, tendo em conta o cariz inovador da metodologia implementada, entende-se necessário efetuar seguidamente uma comparação desses resultados com os que foram obtidos por outros investigadores no âmbito de trabalhos similares.

Os resultados obtidos no presente trabalho, de certa forma contradizem a afirmação feita por Grabosky e McCormick (Graboski e McCormick 1998), que referem não ser esperada uma degradação ou melhoria da eficiência energética a partir de misturas de biodiesel utilizado nos motores, uma vez que a economia de combustível exhibe as diferenças ao nível do respetivo poder calorífico. Na verdade, Aggarwal (A. K. Aggarwal 2007) revela que B20 é a concentração de mistura ideal correspondente a uma melhoria no desempenho do motor e maior eficiência térmica, menor consumo específico de combustível, quando comparando com B0. Na revisão da literatura feita por Xue et al (Xue, Grift e Hansen 2011) afirma-se que a condição de funcionamento do motor como a pressão de carga, a injeção, a velocidade e o tempo representam um fator importante para a economia de combustível ao usar biodiesel. O consumo de combustível global aumenta quando aumentar a utilização de biodiesel, mas esta tendência é enfraquecida com a redução do biodiesel na mistura com gasóleo. Lapuerta et al (Lapuerta, Armas e Rodriguez-Fernández 2008) revelam que o biodiesel não causa qualquer perda de energia, com exceção das situações em que é exigido ao motor que debite a potência máxima. O consumo específico de combustível com a utilização de B20 apresenta maior variabilidade do que a utilização de biodiesel puro (B100), correspondendo a uma variação entre 3% de redução até 9% de aumento, valores que são similares aos resultados obtidos no presente trabalho.

Tzirakis et al (Tzirakis, et al. 2007) fizeram alguns testes em estrada, usando um percurso de três quilómetros de comprimento, considerando que os veículos não ultrapassam os 40km/h, concluindo que a utilização de biodiesel promove o aumento do consumo. Mesmo considerando o recurso de condições reais de circulação em estrada, este método não representa a realidade de utilização dos veículos. O uso de testes de estrada reais é indicado por outros autores, em testes de longa duração.

Çetinkaya et al (Çetinkaya, et al. 2005) usaram alguns testes considerando uma distância total de 7500km, descobrindo que o uso de B20 em vez de gasóleo revela resultados similares ao nível do consumo de combustível. Em concentrações mais baixas de biodiesel a eficiência térmica é melhorada, mas com misturas mais elevadas, é possível detetar a degradação na avaliação energética. Nestes casos, o menor teor energético de biodiesel perde relevância, sendo relativizado pela existência de oxigénio no combustível. Através de um estudo semelhante envolvendo 9 veículos que utilizaram durante dois anos a mesma rota (Proc, et al. 2006) é revelado um aumento de consumo de combustível em condições laboratoriais quando B20 foi comparado com B0. Estes resultados foram muito semelhantes aos valores obtidos no presente estudo. No entanto, os resultados reais de utilização não apresentam diferenças no consumo de combustível. O aumento no consumo resultante está em conformidade com o referido por Bakeas et al. (Bakeas, et al. 2011).

Uma pesquisa em profundidade sobre as condições de funcionamento do motor e os resultados de consumo foi feita por Kousoulidou et al. (M. Kousoulidou, G. Fontaras, et al. 2010) e Fontaras et al (Fontaras, Karavalakis, et al. 2009). Fontaras et al. reforça o facto que o uso de biodiesel (B10) pode apresentar variações que vão de -2% (diminuição) até + 4% (aumento) no consumo de combustível, quando os veículos são sujeitos à realização de ciclos NEDC e AREMIS em laboratório. Isso pode ser correlacionado com os resultados de ensaios em estrada considerando o percurso total de 2000 km em condições de trânsito real, usando B10. Para baixas rotações do motor o combustível consumido pode aumentar 5% (com cargas elevadas) e diminuir 1% (para cargas mais baixas). Para velocidades mais elevadas do motor verifica-se o aumento do consumo em de cerca de 4%.

Na verdade os resultados obtidos no presente trabalho foram muito semelhantes aos apresentados por outros trabalhos de pesquisa, com a vantagem de se diferenciarem os circuitos, detetando claramente a tendência na variação do consumo considerando a utilização de B20.

4.3.2 Ensaios em banco de motores

Na continuidade do trabalho estruturado inicialmente, foi utilizado o banco de ensaios de motores para a realização de testes com motor moderno de um veículo ligeiro. Estes ensaios garantem uma elevada precisão dos resultados obtidos, permitindo recolher uma vasta quantidade de informação relativa ao comportamento de um motor deste tipo quando sujeito à utilização de biodiesel.



Fig. 4.36 – Banco de ensaios de motores com o motor VW 1.9 TDI instalado.

A possibilidade de utilizar uma estrutura já preparada para a realização de ensaios em motores, concebida inclusivamente para as gamas de utilização de motores como os que normalmente equipam os veículos ligeiros, era um fator que não podia deixar de ser considerado no presente estudo, permitindo uma avaliação pormenorizada particularmente sobre as diferenças relativas ao consumo e às emissões de NO_x.


Idealmente, era intenção conjugada do presente trabalho a obtenção de dados relativos à utilização de biodiesel através do estudo realizado em banco de ensaios de motores e a análise comparativa desses resultados com os obtidos nos ensaios em estrada. Contudo, para que tal objetivo fosse alcançado em plenitude, seria necessário utilizar o mesmo motor, ou um motor com características similares ao que equipa os veículos utilizados nos ensaios em estrada. Tal não foi possível, mas reconhecendo a impossibilidade de fazer comparações diretas dos resultados, uma vez que o motor utilizado nos ensaios em banco de motores apresenta uma tecnologia mais antiga que o dos veículos que intervieram nos ensaios em estrada, foram, ainda assim, avaliados os dados obtidos pelos dois métodos, tentando encontrar alguns indicadores comuns através das duas metodologias distintas.

Atendendo à experiência adquirida no desenrolar do presente trabalho, foram tomadas 2 decisões que condicionaram a metodologia a seguir nos ensaios em banco de motores com o motor de um veículo ligeiro e que distinguiram bastante a abordagem dos ensaios relativamente ao que foi efetuado nos ensaios do motor de um veículo pesado.

Atendendo às pequenas diferenças registadas para combustíveis com baixas quantidade de biodiesel, conforme constatado pela bibliografia consultada e pelos resultados obtidos nos ensaios realizados com os motores de veículos pesados, optou-se por efetuar um estudo com maior profundidade em termos de pontos de operação do motor, mas com menos misturas de combustíveis. Deste modo, atendendo também ao referido anteriormente, foi selecionada a mistura B20, para ser comparada com os resultados do gasóleo B0. Deste modo, seria possível a avaliação comparativa entre resultados de estrada e em laboratório, permitindo uma maior cobertura da gama de operação do motor, sem aumentar muito o tempo de operação do banco de motores, que implica sempre um custo elevado.

4.3.2.1 Metodologia

Os equipamentos disponíveis para a realização de ensaios em motores de veículos ligeiros foram os já referidos no capítulo 2 e que foram também considerados na realização dos ensaios no motor de veículos pesados, com exceção do opacímetro. Este equipamento, apesar de ter sido sujeito a um processo de reparação, manteve alguns problemas no processo de medição. Assim, atendendo também ao referido no que concerne às questões relativas à validade dos dados obtidos por este equipamento e da sua relação com a emissão de partículas, foi decidido não efetuar medições de opacidade, tendo-se dedicado uma maior atenção à medição de gases poluentes, com maior incidência sobre os valores de emissões de NO_x, pelas razões também já invocadas anteriormente.

	MOTOR	VW 1.9 TDI
	CÓDIGO	1Z/AHU
	TIPO	4 Cilindros em linha, 8 valv.
	CILINDRADA	1896 cm ³
	RELAÇÃO COMPRESSÃO	19,5:1
	SISTEMA INJEÇÃO	Bomba rotativa com injeção direta de controlo eletrónico
	TURBO-COMPRESSO	Sim, com intercooler
	RECIRCULAÇÃO GASES ESCAPE	Sim (Euro II)
	POTÊNCIA MÁX.	66 kW (89cv) @ 4000 rpm
	BINÁRIO MÁX.	202 Nm @ 1900 rpm

Tab. 4.8 – Principais características do motor utilizado nos ensaios em banco de motores.

O motor utilizado foi disponibilizado pelo Laboratório de Automóvel do Instituto Politécnico de Leiria, tratando-se do motor VW TDI 1.9 que equipou uma grande parte da gama de veículos do grupo VW com grande sucesso, destacando-se a título de exemplo os modelos VW Passat, VW Golf, Audi A3 e A4 e Seat Ibiza. As características principais deste motor encontram-se descritas na tabela 4.8, sendo de destacar o facto de ser um motor com turbocompressor e EGR, com 4 cilindros em linha perfazendo uma cilindrada total de 1896 cm³.

Trata-se de um motor com grande fiabilidade, permitindo que o binário máximo seja obtido a uma rotação relativamente baixa (1900rpm).

Nas primeiras avaliações do funcionamento do motor verificou-se que havia alguns problemas que condicionaram a realização dos testes. A ideia original era efetuar uma análise pormenorizada de todo o mapa de parametrização do motor. Deste modo foi estabelecida a realização de uma série de ensaios em regimes estabilizados que permitissem a obtenção do consumo e das emissões de gases de escape relativamente ao funcionamento do motor desde o *ralenti* até às 4000rpm de forma sucessiva com incrementos de 500rpm e desde 0% carga até 80% de carga, com incrementos de 20%.

Verificou-se contudo que em determinados regimes o funcionamento do motor se tornava bastante instável devido a várias ocorrências: a abertura e fecho da válvula “EGR” de recirculação de gases de escape; o funcionamento do turbocompressor e da válvula “waste gate” que ajusta a sua pressão de funcionamento e pelo excesso de aquecimento do motor em regimes correspondentes a cargas mais elevadas. Deste modo, após algumas tentativas de estabelecer um procedimento que permitisse a obtenção de dados fiáveis e simultaneamente desse a garantia de operacionalidade e fiabilidade do motor sem lhe causar danos, optou-se por um quadro de 30 pontos apresentados na figura 4.37, que garantem a cobertura da esmagadora parte do regime de operação do motor quando em funcionamento normal a tracionar um veículo ligeiro.

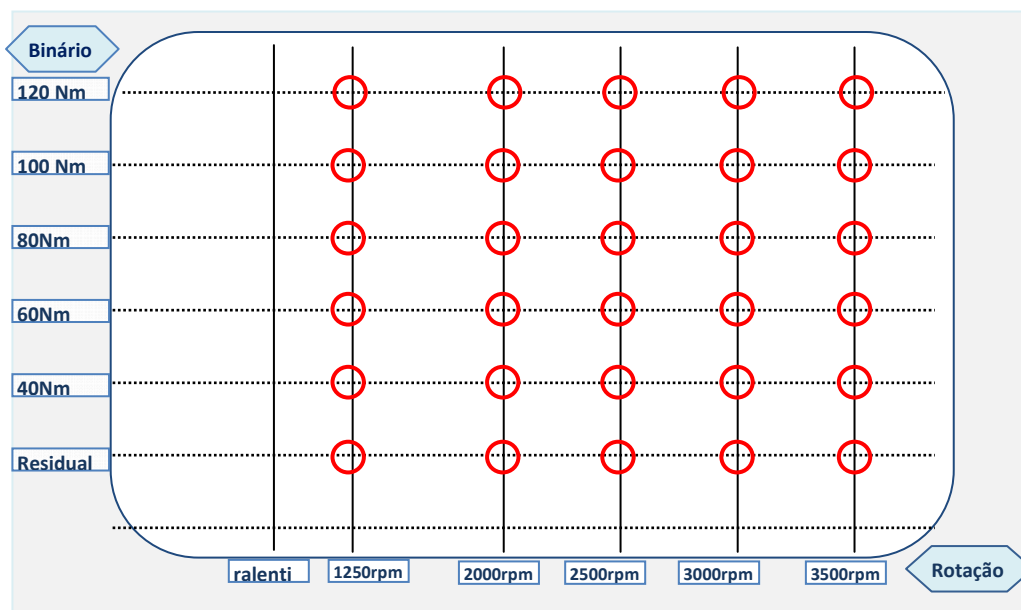


Fig. 4.37 – Representação dos pontos correspondentes aos parâmetros de funcionamento estabilizado para medição de consumo e emissões.

A sequência de realização dos ensaios foi a seguinte:

Após assegurar as condições estabilizadas de funcionamento normal do motor no banco de ensaios, a velocidade de rotação é ajustada às 1250rpm, com o binário resistente do freio no seu valor mínimo, correspondente ao binário residual que é o somatório das perdas energéticas devidas ao atrito e à inércia que é necessário vencer para manter o motor à rotação desejada.

Após estabilização, leitura e aquisição da informação sobre o funcionamento do motor neste ponto de operação, é incrementado o valor de binário para os 40Nm, para a mesma rotação, aguardando-se a estabilização do funcionamento dos vários parâmetros para se fazer a aquisição dos dados. Este processo é repetido em passos sucessivos para vários valores de binário resistente até atingir o valor

de 120Nm. Após a recolha de dados neste ponto, é incrementada a rotação para as 2000rpm. Seguidamente à estabilização a essa rotação, repete-se o ciclo já efetuado, mas decrescendo sucessivamente o valor do binário exigido ao motor em 20Nm, com a correspondente descida da posição do acelerador.

O processo é repetido mantendo a sequência descendente de binário até que o acelerador atinja a posição mínima. Quando este ponto de operação estiver devidamente caracterizado, será repetido todo o processo com o aumento da rotação para as 2500rpm, seguida do acréscimo em termos de binário até ao valor 120Nm, efetuando-se o mesmo no sentido descendente, com incrementos sucessivos de 500rpm, repetindo-se esta sequência até que a rotação atinja as 3500rpm. Nas situações de regime mais exigente, como são as rotações acima de 3000rpm e 3500rpm com valores de binário acima dos 80Nm, verificou-se como necessária a interrupção do processo sequencial, para permitir um arrefecimento do motor. Deste modo, quando a temperatura do óleo do motor deixava de ficar estável, procedia-se a uma interrupção do ciclo, de modo a poder dissipar alguma da energia acumulada, continuando posteriormente o processo estabelecido.

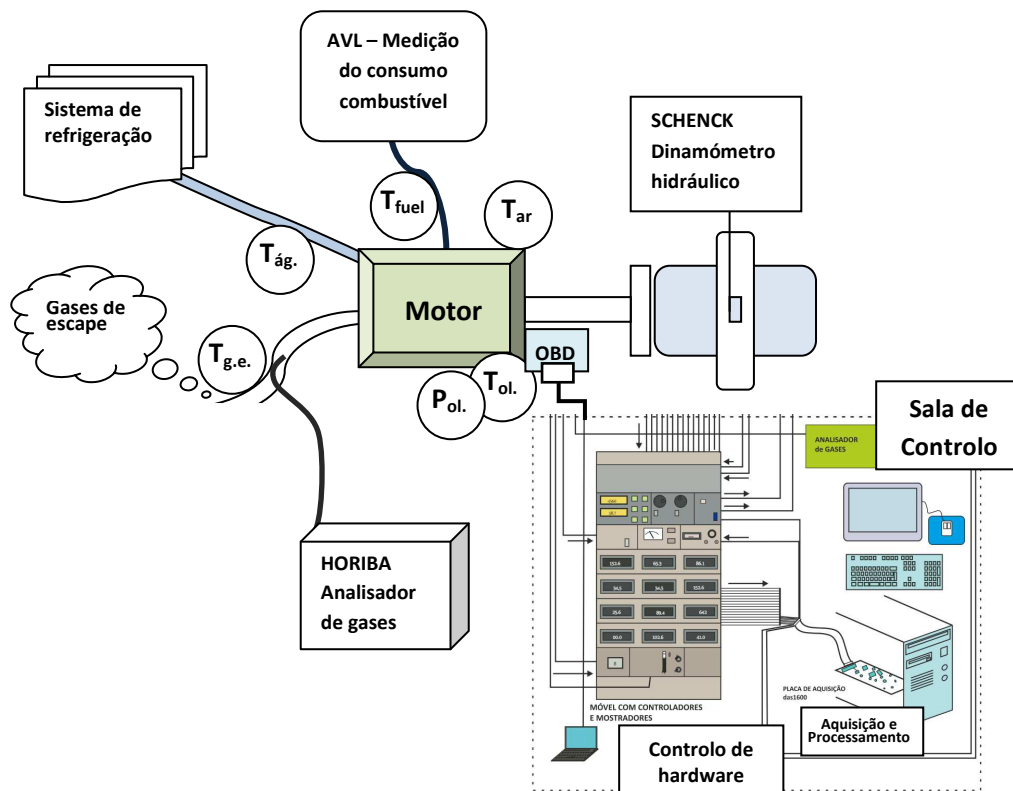


Fig. 4.38 – Esquema representativo da montagem experimental existente no banco de ensaios de motores e utilizada nos ensaios do motor VW 1.9TDI.

Os equipamentos e sistemas de aquisição utilizados foram os existentes no banco de ensaios do Laboratório da ADAI, já utilizados nos ensaios no motor Volvo. Relativamente a estes ensaios deve salientar-se a utilização da ligação da ficha OBD II disponibilizada pelo motor VW, que permitiu adquirir alguns dados fornecidos pela ECU de controlo do motor. Um esquema da montagem experimental utilizada é representado na figura 4.38.

Os combustíveis utilizados nestes ensaios foram os mesmos que os utilizados nos ensaios de estrada, B0 e B20, constituídos pelos combustíveis base cujas propriedades foram apresentadas na tabela 4.6.

4.3.2.2 Resultados

Cada um dos ciclos definido na metodologia foi repetido 2 vezes, de acordo com uma determinada sequência que possibilitaria analisar possíveis degradações no funcionamento e no desempenho do motor. Deste modo, foram efetuadas 2 medições com B0, seguidas de 3 medições com B20 e uma nova medição com B0. Os resultados obtidos resultam da média das 3 medições se estas não diferirem mais do que o desvio padrão das 3 medições realizadas. Se tal acontecer, não é considerado o valor que apresente desvios mais elevados relativamente ao valor médio, resultando o valor final considerado da média dos dois valores que cumprem o critério definido.

De toda a informação recolhida, grande parte servia como forma de controlo do processo de modo a garantir a comparabilidade dos resultados e para verificar a ocorrência de algumas situações, conforme foi verificado relativamente ao controlo da circulação de gases de escape e do turbocompressor por exemplo.

Os dados que são apresentados referem-se aos dois aspetos mais relevantes deste trabalho, o consumo de combustível e as emissões de NO_x, sendo estes os que representam mais controvérsias relativamente ao modo como a utilização de biodiesel afeta o motor. As emissões de CO e HC não são as emissões mais problemáticas para este tipo de motor e, considerando a baixa resolução do equipamento na medição de CO, resolveu-se dedicar maior atenção às emissões de NO_x, não tendo sido consideradas as emissões de CO e HC, apesar de se terem recolhido os dados relativos a estes produtos da combustão.

4.3.2.2.1 Consumo de combustível

Analogamente ao que foi efetuado no caso dos ensaios em estrada os resultados apresentados são relativos ao consumo em base mássica, através do resultado do consumo específico [g/kWh], tendo em conta que a medição era efetuada segundo um processo gravimétrico, atendendo às razões já explicadas anteriormente. Uma vez que a análise económica, à qual estamos mais familiarizados, é normalmente em termos volúmicos, foi então convertida em [lts/kWh] a informação do consumo de cada um dos combustíveis utilizados, recorrendo aos respetivos valores da densidade. Considerando a importância que o processo de eficiência tem na avaliação dos motores, são ainda apresentados os resultados em termos de eficiência de conversão energética (ECE), utilizando para tal os diferentes valores de energia disponíveis em cada um dos combustíveis, o que permitirá avaliar a forma como a partir de diferentes níveis de energia disponíveis, consegue o motor rentabilizar essa energia em potência útil.

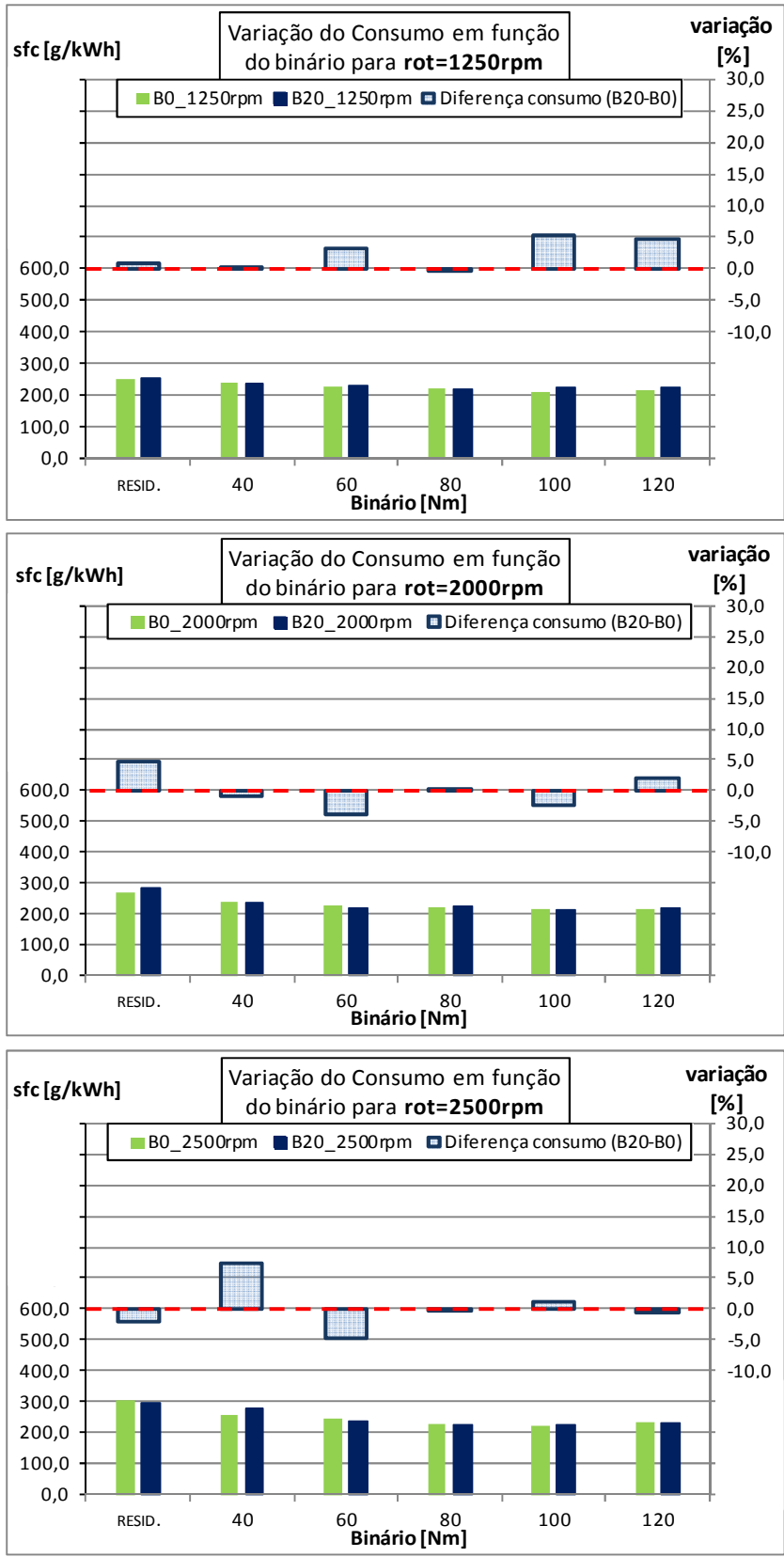


Fig. 4.39 – Comparação dos resultados de consumo específico [g/kWh] com B0 e B20.

A apresentação gráfica dos resultados é feita recorrendo à representação dos valores de consumo medidos com os dois tipos de combustível nas barras estreitas, lido no eixo vertical à esquerda e representando a diferença relativa nas barras largas lidas no eixo vertical à direita. O valor da diferença relativa é calculado tendo como referência o caso do consumo de B0. Deste modo, se a barra estiver acima da linha tracejada vermelha traduz-se num aumento de consumo, eficiência ou emissões; se, pelo contrário, a barra estiver abaixo da linha vermelha representa uma diminuição dos parâmetros em causa.

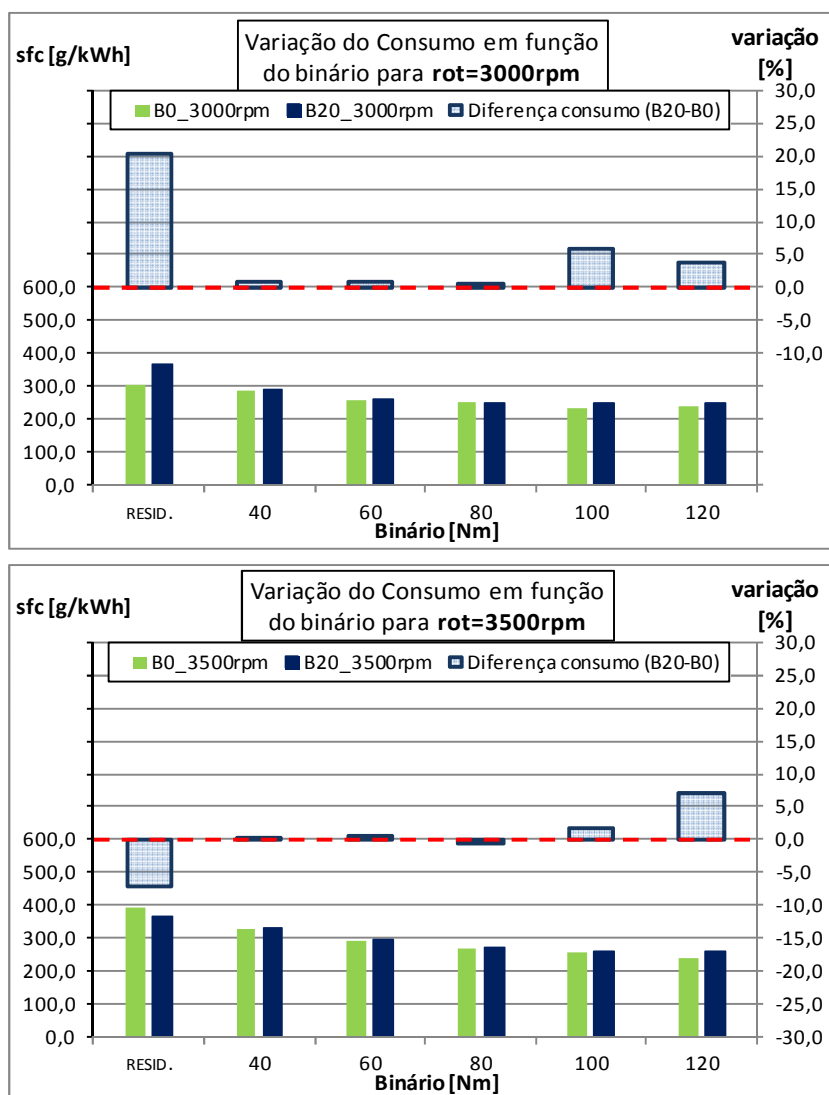


Fig. 4.39 (continuação) – Comparação dos resultados de consumo específico [g/kWh] com B0 e B20.

A análise dos resultados obtidos com este motor permite confirmar aquilo que tem vindo a ser constatado ao longo do presente trabalho. O consumo mássico de combustível representado graficamente na figura 4.39 não apresenta um comportamento proporcional à introdução de biodiesel e à correspondente ligeira diminuição de energia associada ao facto de se utilizar esse tipo de combustível. É visível que em determinados regimes, normalmente associados a elevados valores de binário, o consumo específico aumenta quando se utiliza B20, contudo as variações são muito

ligeiras para valores de binário de 40 e 60Nm. Salienta-se nesta situação alguma alternância em termos de consumo específico, registando-se um ligeiro aumento para baixa rotação (1250rpm), em contraponto com a ligeira redução correspondente às 2000rpm, sendo visível que às 2500rpm ocorre um aumento superior a 5% para 40Nm e uma redução de cerca de 5% para 60Nm. Às 3000rpm com binário residual ocorre um valor anormalmente elevado de consumo quando se utiliza B20, contudo, atendendo a que esta situação é bastante improvável de acontecer em situação normal de utilização dos veículos e verificando que neste regime o motor apresenta um comportamento algo instável, muito por culpa do funcionamento algo oscilante do turbocompressor, não se considerou relevante um estudo mais aprofundado desta situação.

Em termos globais, não se poderá afirmar cabalmente que a utilização de biodiesel numa mistura contendo 20% de biodiesel e 80% de gasóleo se traduza num aumento direto consumo específico de combustível, havendo no entanto uma tendência para que esse aumento se verifique quando o motor é sujeito a binários elevados em situações de altas rotações (3000 e 3500rpm) e rotação muito baixa (1250rpm).



Fig. 4.40 – Comparação dos resultados de consumo específico [lts/kWh] com B0 e B20.

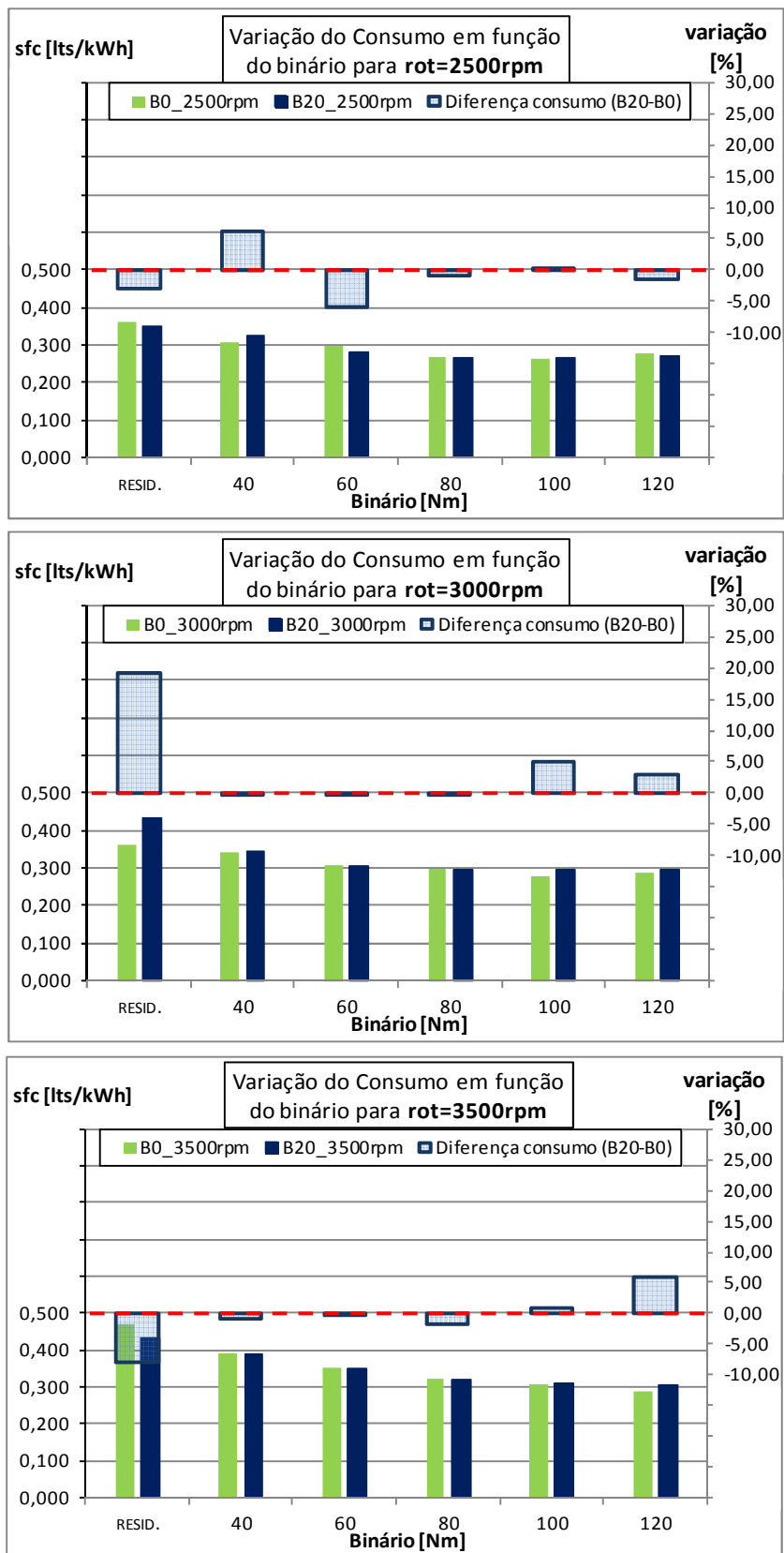


Fig. 4.40 (continuação) – Comparação dos resultados de consumo específico [lts/kWh] com B0 e B20.

Avaliando os resultados obtidos quando se contabiliza a maior densidade do combustível promovida pela incorporação de biodiesel, através da comparação dos consumos numa base volumétrica, apresentados na figura 4.40, obtêm-se uma acentuação do que foi já apontado na análise mássica, ou seja, apenas na situação de binário de 40Nm às 2500rpm e 60Nm às 1250rpm se verifica um aumento de consumo, se forem excetuados os casos de binário mais elevado (100Nm e 120Nm). Pode mesmo considerar-se que em termos volumétricos, a utilização de B20 promove muito poucas alterações ao nível do consumo total de combustível. Nas situações mais normais de funcionamento do motor quando em circulação normal de estrada, que correspondem a valores de binário baixos e velocidades de rotação baixas e médias, poderá ser possível observar uma ligeira redução do consumo de combustível.

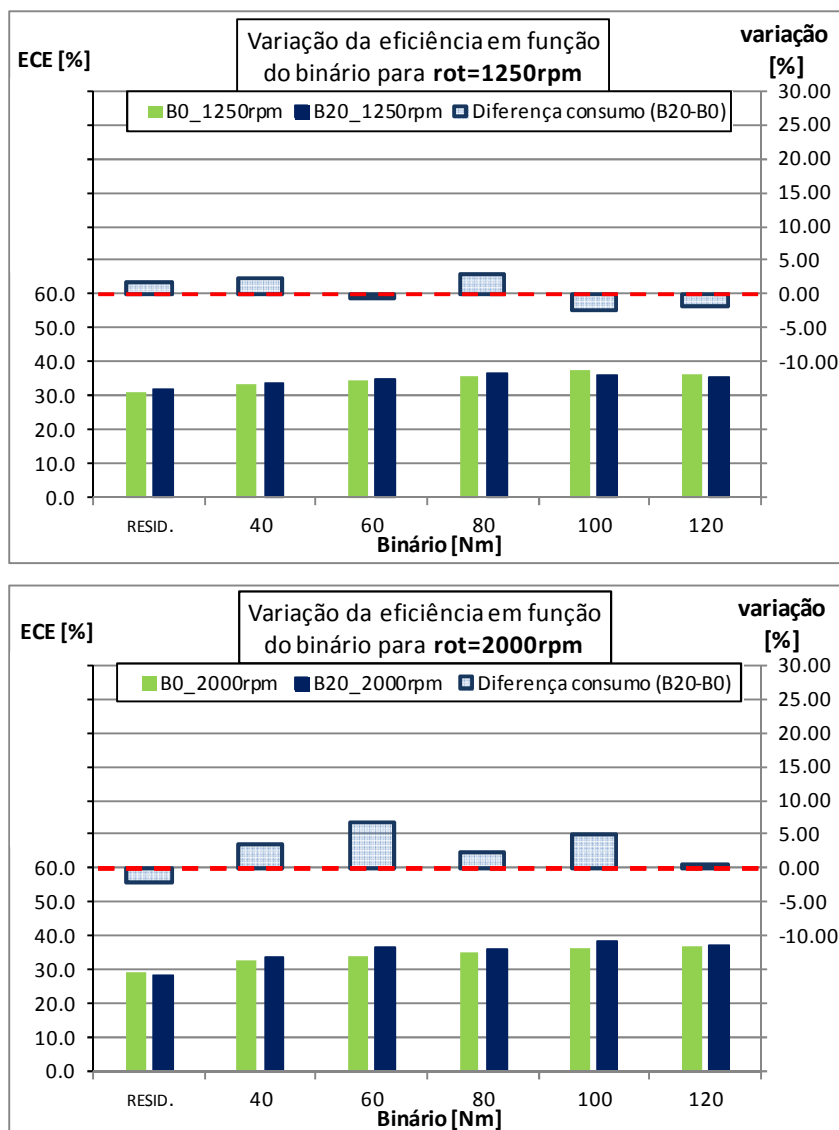


Fig. 4.41 – Comparação dos resultados de eficiência de conversão energética [%] com B0 e B20.

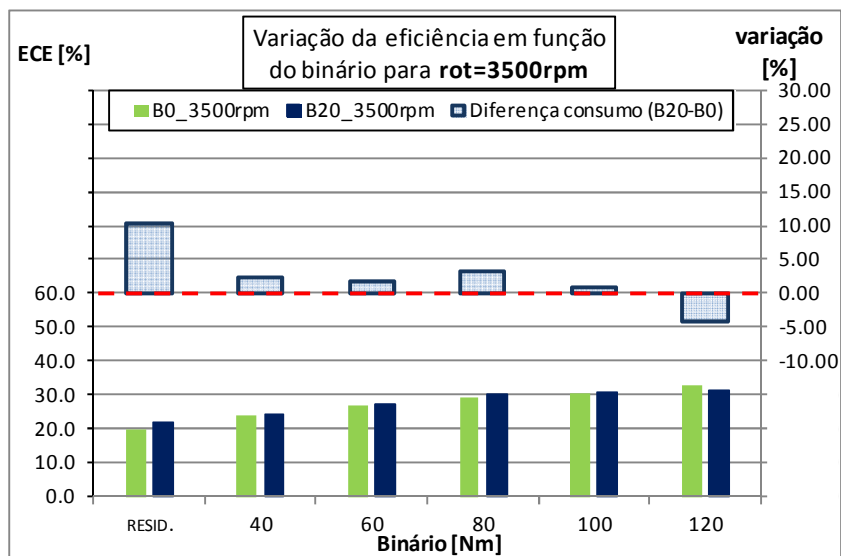
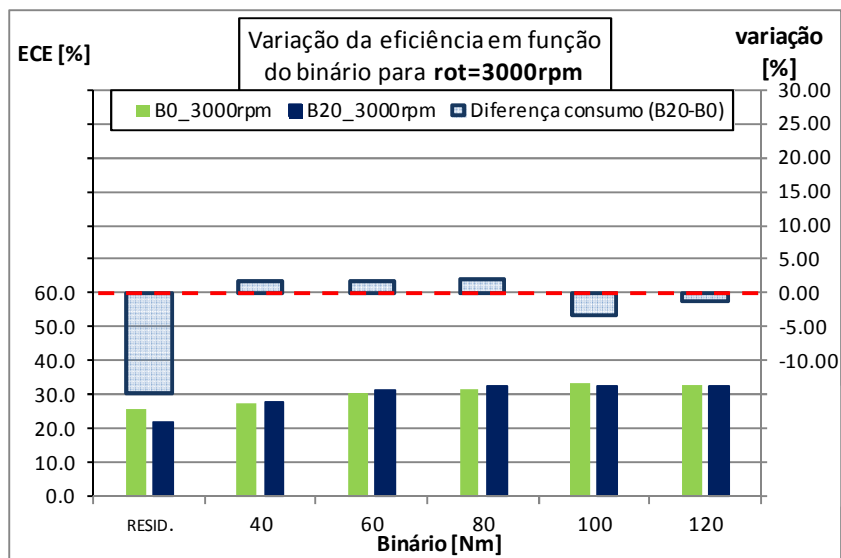
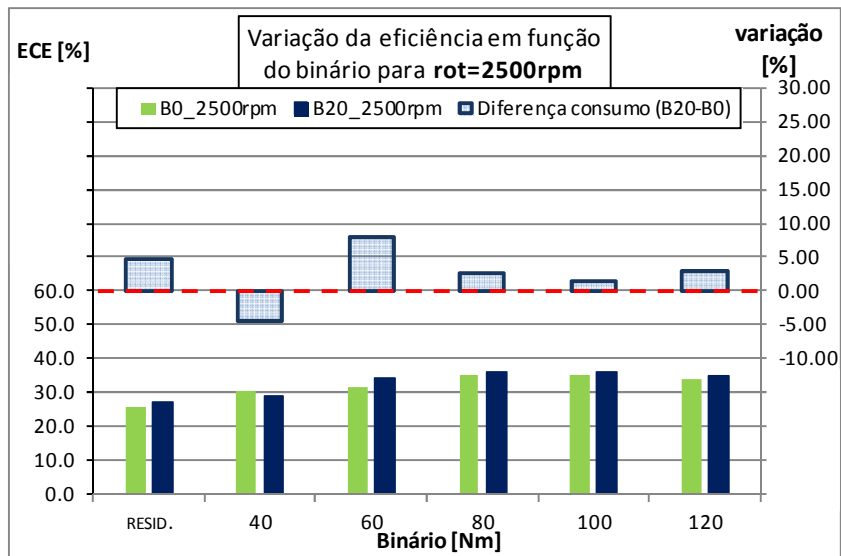


Fig. 4.41 (continuação) – Comparação dos resultados de eficiência de conversão energética [%] com B0 e B20.

Da análise dos resultados relativos à eficiência de conversão energética (ECE), representados na figura 4.41, ressalta aquilo que foi já verificado na avaliação dos resultados relativos ao consumo, ou seja, para carga até 80Nm verifica-se um aumento mais ou menos ligeiro da eficiência de conversão da energia existente no B20 relativamente ao B0, apenas com exceção do caso em que o motor debita 40Nm de binário às 2500rpm. Ainda que apenas ligeiro, trata-se de um aspeto que importa analisar com detalhe de modo a potenciar este ganho energético. Para as situações de maior binário (100Nm e 120Nm), tal como também indicado na avaliação de consumo, verifica-se em termos globais alguma perda de eficiência de conversão energética quando se abastece o motor com B20.

Tal como apontado anteriormente, ocorrem valores algo diferenciados em termos de magnitude nos casos de rotação elevada (3000 e 3500rpm) em circunstâncias de binário residual, onde ao motor apenas é exigido o esforço mínimo necessário para vencer as perdas mecânicas. Nestas circunstâncias que são muito raras de acontecer em circulação real, o motor apresenta um comportamento com alguma instabilidade, em que o turbocompressor tem um comportamento oscilatório e o consumo é relativamente baixo, potenciando que pequenos desvios ocorridos pelo comportamento do motor em termos de controlo se revelem de modo mais notório em termos globais. Não são contudo pontos de operação que sejam muito significativos em termos dos objetivos deste trabalho atendendo à sua insignificante contribuição para a representação global do comportamento do motor quando circula em condições normais em estrada.

Nos restantes pontos analisados e considerando as circunstâncias normais de funcionamento do motor, quando instalado num veículo sujeito à condução real em estrada, poderá afirmar-se que existem sérios indicadores da possibilidade de ligeiros aumentos da eficiência do motor quando abastecido com B20, comparativamente ao consumo de B0, principalmente quando são exigidos regimes de funcionamento baixos e médios, correspondentes à operação em circuito urbano e extraurbano. Num regime de funcionamento mais exigente, como a circulação em estradas com elevada inclinação ou em autoestrada, onde a operação do motor requerida é suportada em valores de binário mais elevado, a utilização de B0 indicia uma ligeira vantagem relativamente ao B20 em termos energéticos.

4.3.2.2.2 Emissões de NOx

Tal como referido anteriormente, foi elaborado o estudo sobre o impacto nas emissões de NOx pela utilização de B20 comparativamente à utilização de B0. Os resultados abaixo apresentados são o reflexo desse estudo permitindo avaliar, para os vários regimes de funcionamento do motor selecionados, qual a influência que o consumo de B20 tem nas emissões de NOx, quando comparado com o consumo de gasóleo. De modo a tornar os resultados analisados mais comparáveis, o valor da percentagem volumétrica de NOx presente nos gases de escape foi dividida pela energia obtida correspondente a cada ponto de funcionamento do motor selecionado, sendo apresentados graficamente os resultados da figura 4.42 em [ppm/kWh], correspondente às emissões NOx específicas.

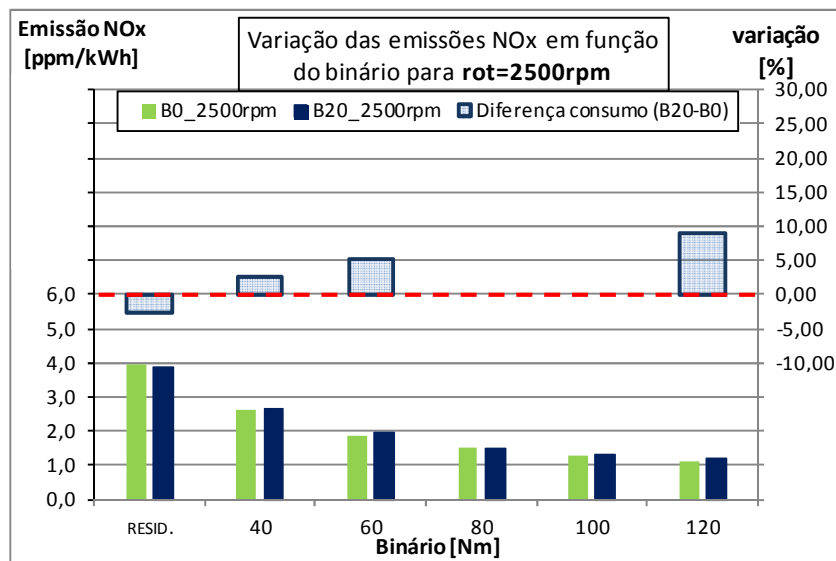
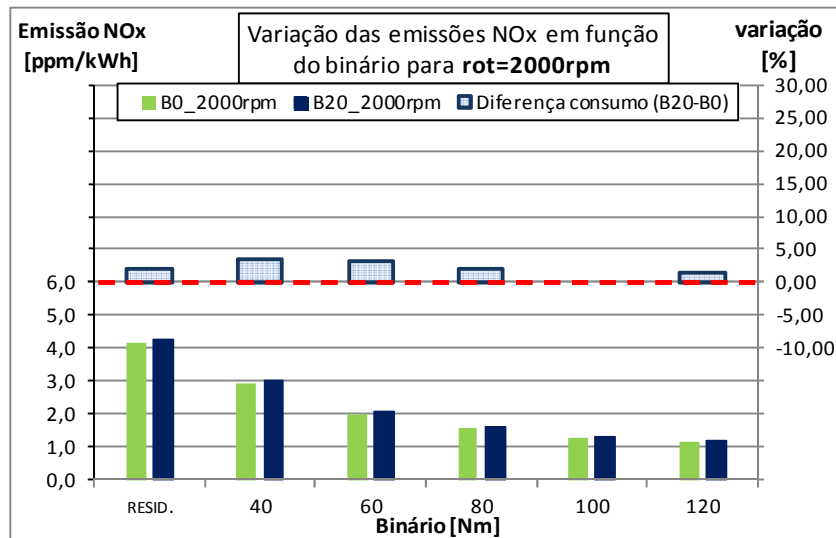
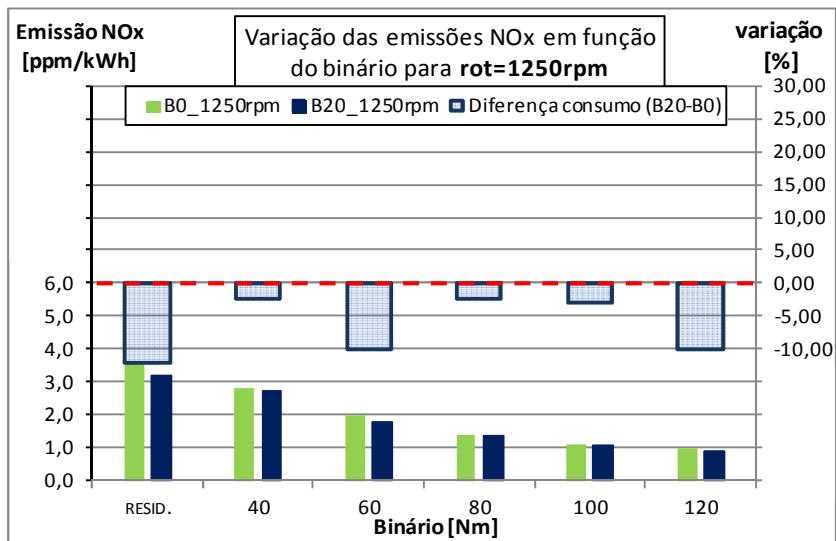


Fig. 4.42 – Comparação dos resultados de emissões de NOx [ppm/kWh] com B0 e B20.

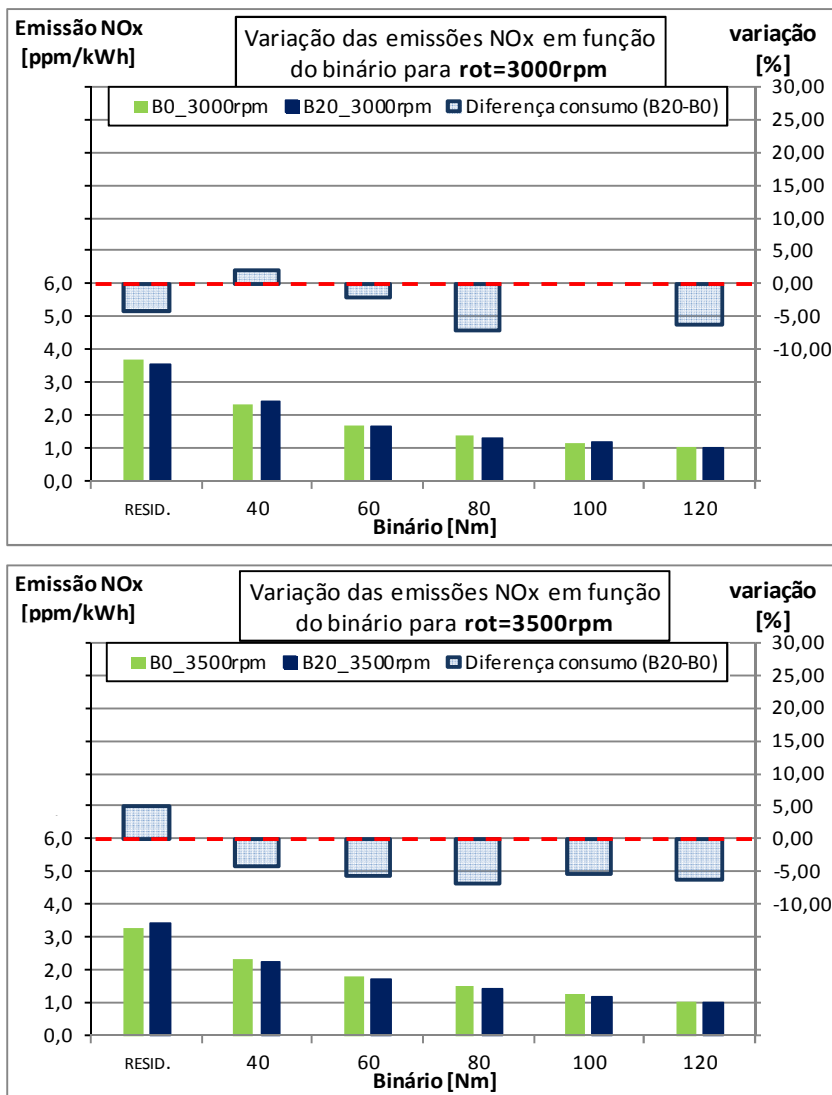


Fig. 4.42 (continuação) – Comparação dos resultados de emissões de NOx [ppm/kWh] com B0 e B20.

A análise dos resultados de emissões específicas de NOx apresentados nos gráficos da figura 4.42 revela um comportamento interessante e que provavelmente explica aquele que tem sido o maior foco de controvérsia ao nível da utilização de biodiesel.

De facto, em função do regime de funcionamento do motor, pode verificar-se tipicamente um aumento das emissões de NOx pela utilização de biodiesel ou também uma diminuição destas emissões devido à utilização de biodiesel. A análise dos gráficos relativos à representação dos resultados das emissões de NOx permite concluir que quando o motor opera a baixa rotação e a alta rotação, a utilização de biodiesel, no presente caso manifesta uma diminuição, contudo, para rotações médias (2000rpm e 2500rpm), a utilização de B20 traduz-se num aumento das emissões específicas de NOx. Relativamente ao modo como as diferenças nas emissões de NOx são influenciadas pela carga, excetuando o caso dos ensaios realizados a 2500rpm, em que à medida que se aumenta a carga, ocorre um aumento das emissões de NOx motivadas pela utilização de B20, nas

restantes situações avaliadas não parece existir uma relação direta da influência da carga sobre as diferenças nas emissões de NOx relativas aos dois combustíveis considerados.

O efeito relativo das emissões de NOx poderá estar associado ao aumento de eficiência de conversão energética que potenciará um aumento da temperatura de combustão responsável pela eventual formação de compostos NOx, por via térmica (processo de formação de Zeldovich). Este contudo não será o único responsável por esta situação, até porque se confirma da análise conjunta dos resultados, que não é apenas o aumento da eficiência de conversão energética que explica as oscilações verificadas ao nível das emissões de NOx.

De facto, a existência de oxigénio no combustível permite que o processo de combustão seja realizado de modo diverso do que acontece com o gasóleo, permitindo que ocorra uma diferente evolução da libertação de calor que poderá potenciar ou atenuar a formação de NOx. Também concorrem para este efeito as diferenças ao nível da formação do *spray* de combustível, motivadas pelas diferentes propriedades do combustível e os diferentes níveis de saturação das moléculas que o constituem.

Resulta claro do presente estudo que não é possível assinalar diretamente um aumento ou uma diminuição das emissões motivado pela utilização de biodiesel, sem que seja caracterizado o modo como o veículo equipado com determinado motor opera em condições normais de funcionamento. Contudo, as variações ao nível do NOx não são significativas quer em termos de aumento quer em termos de diminuição e, atendendo a que os resultados foram obtidos sem que os gases de escape passassem por qualquer sistema de tratamento, poderá concluir-se que não se poderá associar qualquer conotação negativa à utilização de biodiesel associada às emissões de NOx, considerando que as pequenas variações verificadas pela utilização de B20, sejam positivas ou negativas, são sempre inferiores a 10%, pelo que serão praticamente anuladas pela utilização de sistemas de tratamento de gases.

4.3.2.3 Discussão dos resultados

O que se verificou no presente trabalho ao nível das emissões de NO_x, permite esclarecer em parte as dúvidas que existem sobre este assunto com a existência de resultados díspares provenientes de diferentes estudos, avaliando o comportamento dos motores a uma dada rotação ou a um dado binário. Na realidade, apenas através de um estudo como o realizado no presente trabalho, considerando uma grande quantidade de pontos de funcionamento, é possível traçar uma real abrangência de resultados que permitam o cruzamento com a caracterização típica de funcionamento de um motor quando instalado num veículo, conduzindo a valores concretos e reais das emissões de NO_x emitidas por esse motor para a atmosfera, quando abastecido por biodiesel ou por outro qualquer combustível.

Comparando os resultados obtidos com os de outros investigadores torna-se claro que apenas nas situações similares, em que foi considerado um conjunto bastante alargado de pontos de funcionamento do motor foi possível registar oscilações positivas e negativas nos valores das emissões de NO_x devidas à utilização de biodiesel (Wang, et al. 2011) (Panwar, et al. 2010) (M. Kousoulidou, G. Fontaras, et al. 2010) (Agudelo, Benjumea e Villegas 2010). Torna-se evidente através da análise da bibliografia que a maioria dos trabalhos refere a ocorrência de um aumento nas emissões de NO_x, contudo também se torna óbvio que essa situação reflete a realização de testes numa banda estreita da gama de funcionamento do motor, normalmente correspondente a pontos para uma rotação com variação da carga ou para uma situação ou duas de carga, com a variação da rotação do motor, conforme se poderá constatar da tabela de revisão bibliográfica apresentada em anexo.

Conforme já identificado por Yanowitz e McCormick (Yanowitz e McCormick 2009), quando se efetua a média nas emissões de NO_x mascara-se a complexa variabilidade que ocorre relativamente à emissão destas substâncias quando se utiliza biodiesel nos motores, sendo também importante lembrar o que é referido por Hribernick e Kegl (Hribernik e Kegl 2007), confirmando que a influência do biodiesel na combustão e emissões num motor não podem ser generalizadas, uma vez que são parâmetros específicos de cada motor. De facto, o tipo de motor, a tipologia do circuito e o modo de condução, alteram completamente a forma como o motor opera quando abastecido com combustíveis contendo biodiesel em diferentes proporções. Os diferentes combustíveis, oferecem diferentes propriedades, nomeadamente ao nível da presença de oxigénio, da densidade e viscosidade, da volatilidade, do conteúdo energético e do grau de saturação, sendo estes fatores responsáveis pela ocorrência de diferentes comportamentos no processo de injeção de combustível, do modo como este se mistura no ar e, principalmente, no modo como ocorre a combustão e a libertação de calor daí resultante que provocará diferenças nas emissões de NO_x. Também é ainda importante notar que resultados obtidos com motores monocilíndricos, motores de veículos ligeiros e motores de veículos pesados conduzem a conclusões diferenciadas, pelo que se torna necessário que as análises sejam também distintas. Esta complexidade é confirmada pela análise efetuada aos resultados obtidos pelo presente trabalho que vêm ajudar a perceber aquilo que são as conclusões obtidas pelo trabalho de outros investigadores nesta área, realçando mais uma vez a necessidade de avaliar o comportamento de veículos em circulação real em estrada, complementando esses resultados com os obtidos em laboratório.

A análise relativamente aos resultados do consumo de combustível ou de energia revelam aquilo que foi identificado nos resultados em estrada. Reforça-se deste modo a necessidade de avaliar o comportamento do veículo em situação real, para que seja possível perceber a forma como esse comportamento afetará o consumo de combustível. Atendendo a que o motor utilizado nos ensaios em estrada não é semelhante ao utilizado nos ensaios realizados em banco de motores, não é possível efetuar uma relação direta entre esses resultados. Contudo, pode ser efetuada uma avaliação destes resultados e tentar encaixar o tipo de comportamento expectável em estrada para um veículo ligeiro e perceber quais seriam os resultados globais de consumo. Deste modo, é possível verificar que o consumo específico mássico apresenta pequenas oscilações que eram já esperadas, atendendo à pouca significativa diferença no poder calorífico dos dois combustíveis avaliados (B0 e B20), contudo, as diferenças tornam-se mais significativas apenas nas circunstâncias relativas a rotação mais elevada e carga também alta, o que poderá corresponder à circulação típica de autoestrada onde a velocidade é alta, o que implica uma rotação do motor elevada e também cargas elevadas uma vez que a força de arrasto aerodinâmico se torna bastante relevante. Para as restantes situações, correspondentes à circulação urbana e extraurbana, caracterizadas por rotações baixas e médias e cargas baixas e médias, as diferenças ao nível do consumo são muito pequenas, revelando uma tendência muito elevada para a diminuição de consumo quando se abastece o motor com B20, principalmente se for feita uma análise de consumo em base volumétrica. Também se pode ainda justificar que em circunstâncias de circulação urbana, será mais frequente o recurso a um binário mais elevado pelas constantes paragens e arranques, principalmente em declives ascendentes. Atendendo a que é possível identificar situações de maior consumo de combustível correspondente à utilização do motor com carga mais elevada, mesmo a baixa rotação (1250rpm), será expectável que a utilização de B20 neste tipo de circulação não seja tão vantajosa.

Mesmo considerando que os motores avaliados estão equipados com tecnologias de injeção de combustível diferentes, é possível estabelecer um padrão similar em termos de consumo para as duas metodologias utilizadas. Esta situação é também motivada pelo facto de o gasóleo e o biodiesel terem valores de índice de cetano muito similares, pelo que o avanço da injeção não é alterado pelo sistema utilizado pelos dois veículos, o que não aconteceria se o índice de cetano fosse diferente uma vez que o sistema “*common-rail*” é menos sensível a este parâmetro que o sistema de bomba injetora, embora as diferenças ao nível da pressão de injeção promovam certamente algumas diferenças no modo como o combustível é injetado na câmara de combustão, a avaliação dos resultados permite traçar uma conclusão bastante similar para ambas as situações, o que reforça a qualidade dos resultados e permite atestar da validade da metodologia utilizada através do recurso a ensaios em estrada.

4.4 Sumário do capítulo

No presente capítulo foram estabelecidas diversas metodologias para atingir o mesmo fim, centrado na avaliação comparativa da utilização de gasóleo e biodiesel em motores de combustão interna com ignição por compressão.

Foi efetuada uma análise separada por tipo de motor, tendo em conta a utilização de motores em veículos pesados e em veículos ligeiros.

A utilização de um banco de ensaios de motores onde foi instalado um motor de 6 cilindros em linha, do fabricante Volvo, permitiu a realização de uma série de testes tendo em conta a utilização de diversas misturas de gasóleo com biodiesel (B0, B10, B15, B20, B30, B50 e B100), considerando ensaios em regime estabilizado e em regime transitório.

Os resultados obtidos em laboratório foram comparados com valores de consumo de combustível de uma frota de veículos. Sabendo que esta frota estava dividida em duas sub-frotas com tipologias de circulação diferenciadas (urbana e extraurbana), foi também a análise feita de modo diferenciado, tendo possibilitado a obtenção de resultados muito interessantes e que permitiram de algum modo avaliar os dados obtidos em banco de ensaios.

Foi instalado no banco de ensaios de motores um motor típico de um veículo ligeiro, no caso um motor de 4 cilindros do fabricante VW, modelo 1.9 TDI. Com base neste motor foi efetuada uma análise de consumo e emissões tendo em consideração apenas dois tipos de combustíveis (B0 e B20), mas cobrindo uma grande parte do regime de funcionamento do motor. Os resultados obtidos nestes ensaios foram avaliados tendo em conta os resultados obtidos em testes em estrada, tendo sido esta metodologia desenvolvida especificamente no desenrolar do presente trabalho.

A metodologia de ensaios em estrada permitiu caracterizar de modo fiel as condições normais de circulação de um veículo num trajeto urbano, extraurbano e em autoestrada. Com este processo, foi possível obter os consumos reais de um veículo quando é abastecido com biodiesel (no presente caso B20) e gasóleo, tendo ainda considerado a integração de ensaios em banco de rolos. Estes permitiram por um lado caracterizar e garantir a semelhança dos veículos utilizados nos ensaios em estrada e por outro lado permitiram avaliar ainda o impacto que a utilização de biodiesel poderá ter sobre o consumo de combustível em condições estabilizadas, para 10 diferentes pontos de funcionamento.

Todos os resultados obtidos foram analisados e a sua discussão permitiu a obtenção de diversas conclusões, resumidas mais à frente neste texto, tendo ainda possibilitado o cumprimento dos objetivos propostos inicialmente.

4.4.1 Resumo

- ✓ A utilização de resultados obtidos em condições reais de circulação em estrada foi um dos principais impulsionadores para o presente trabalho. Tal foi estruturado e conseguido com sucesso.
- ✓ Foram elaboradas duas metodologias distintas com objetos diferenciados, tendo em conta o estudo de veículos pesados e de veículos ligeiros.
- ✓ Os ensaios realizados em banco de ensaios com o motor típico de um veículo pesado consideraram um ciclo estacionário e um ciclo transiente que conduziram a resultados muito interessantes numa vertente energética, tornando evidentes alguns benefícios do biodiesel relativamente ao gasóleo, principalmente quando se utilizam misturas B10, B15, B20 e B30, sendo possível detetar alguma melhoria ligeira da eficiência de conversão energética para estes combustíveis relativamente ao gasóleo (B0) para alguns regimes de funcionamento.
- ✓ O estudo relativo aos dados da frota de cerca de 200 autocarros permitiu constatar sobre a mais-valia do presente estudo, principalmente no que diz respeito à importância ostentada sobre a utilização de dados reais de circulação. Foram neste estudo validados os resultados obtidos em banco de ensaios de motores, tendo sido possível observar a diferença ao nível do consumo de combustível correspondente aos diferentes combustíveis, para as situações de circulação urbana e circulação extraurbana. É de salientar o facto de que a utilização de biodiesel (B10, B20 e B30) nos autocarros pertencentes à subfrota de circulação urbana motivou uma diminuição ligeira de consumo de combustível.
- ✓ Também se verificou uma grande variação dos resultados relativos às emissões de gases de escape, tendo sido efetuada uma análise mais concreta às emissões de NOx. Tornou-se possível destacar a importância de analisar também o comportamento dos veículos de modo a poder ter uma vertente mais concreta e real relativa ao efeito do consumo de biodiesel sobre as emissões de NOx provenientes dos veículos pesados.
- ✓ Foi ainda elaborada uma análise económica sobre a utilização de biodiesel nos autocarros, utilizando os dados relativos aos preços praticados na data da realização do estudo, sendo destacável que para todos os cenários analisados, resulta uma diminuição dos custos operativos relativos à utilização de biodiesel, mesmo quando se verificava um aumento do consumo de combustível associado à incorporação de biodiesel.
- ✓ Foram realizados ensaios em banco de motores, em banco de rolos e em estrada para a análise do consumo de biodiesel em veículos ligeiros, tendo nesta vertente sido desenvolvida uma nova abordagem sobre o modo de realizar ensaios em estrada, no sentido de avaliar diferenças de consumo entre dois veículos similares abastecidos por combustíveis diferentes. No presente caso foi comparada a utilização de gasóleo com a utilização de B20.
- ✓ A metodologia de ensaios em estrada permitiu a obtenção de resultados muito interessantes ao nível do consumo, permitindo obter conclusões semelhantes às detetadas nos veículos pesados, embora seja neste caso mais visível uma ligeira diminuição do consumo quando se utiliza B20 para a situação de circulação extraurbana, verificando-se uma quase neutralidade nos trajetos urbanos e um ligeiro aumento de consumo nos trajetos em autoestrada. Este comportamento

reflete a melhoria da eficiência de conversão energética em situações de circulação extraurbana e urbana pela utilização de B20 face ao consumo de gasóleo (B0) verificando-se uma aparente nulidade deste parâmetro nos trajetos em autoestrada.

- ✓ A análise dos resultados obtidos em banco de rolos manifesta uma muito ligeira alteração ao nível da perda de potência quando comparada a utilização de B20 com B0, embora o valor do consumo, num estudo em que foram considerados 10 pontos de funcionamento do motor, revele em termos médios um aumento ligeiro (2,66%) pela utilização de B20, que não se mantém constante para todos os regimes avaliados, sendo registadas situações onde se verifica inclusivamente uma diminuição do consumo.
- ✓ Ao nível do consumo de combustível verificou-se mais uma vez uma grande variabilidade de resultados nos ensaios de um motor de um veículo ligeiro, que se traduziram por aumentos e diminuições ligeiras de consumo de combustível pela utilização de B20 face ao consumo de gasóleo. Dos dados apresentados deve contudo salientar-se que numa boa parte dos 30 pontos de funcionamento do motor avaliados, se verificou uma melhoria da eficiência de conversão energética associada à utilização de B20.
- ✓ Ao nível das emissões de NO_x, também foi possível verificar a variabilidade de acordo com o regime do motor, sendo absolutamente necessário caracterizar o funcionamento preferencial do veículo de modo a poder obter valores concretos sobre os impactos da utilização de biodiesel relativamente às emissões de NO_x.
- ✓ Será objeto de um novo passo na metodologia desenvolvida a integração da medição em tempo real das emissões de NO_x e de partículas, permitindo a obtenção de resultados efetivos relativamente à libertação destas substâncias para a atmosfera e do modo como a utilização de biodiesel poderá exercer um impacto positivo ou negativo sobre essa emissão.

4.4.2 Análise crítica do capítulo

- 1º Objetivo:** Foi possível avaliar o modo como o consumo de combustível é afetado pela utilização de biodiesel como parte constituinte desse mesmo combustível, sendo possível concluir que nem sempre o resultado é obtido diretamente a partir do conteúdo energético diferenciado dos combustíveis, principalmente nas misturas com menor incorporação de biodiesel. Na realidade, para diferentes modos de funcionamento do motor, verificam-se diferentes comportamentos. Esta constatação é evidenciada tanto nos motores de veículos ligeiros, como nos motores de veículos pesados, sendo possível assinalar algumas situações onde se identificam diminuições de consumo, principalmente numa análise volumétrica, onde as diferenças energéticas entre os combustíveis são esbatidas.
- 2º Objetivo:** A análise das emissões de NOx emitidas pelos motores quando abastecidos por biodiesel permite concluir que também neste caso, esta substância não tem uma ligação direta com a utilização de biodiesel no combustível, sendo visível que apesar de em alguns regimes existir de facto um aumento das emissões de NOx pela utilização de biodiesel, também é verdade que em algumas situações, correspondentes a determinados regimes de funcionamento, se verifica a diminuição nas emissões de NOx ou oscilações quase insignificantes. Sendo mais uma vez notória a relevância do tipo de operação preferencial do motor para uma avaliação concreta da utilização de biodiesel sobre as emissões destas substâncias.
- 3º Objetivo:** Foi possível avaliar a importância das metodologias que considerem o trajeto de veículos com recurso a condições de circulação autênticas. Atendendo aos resultados obtidos ao nível do consumo de combustível e das emissões de NOx, é de realçar o pleno cumprimento deste objetivo, tendo sido possível a obtenção de resultados que permitiram reforçar a importância da caracterização do tipo de operação dos motores para que seja possível obter resultados sobre as reais implicações para os motores relativamente à utilização de biodiesel.

Esta página foi intencionalmente deixada em branco.

CONCLUSÃO

Sumário:

1. Análise sobre a situação do consumo de energia no setor dos transportes.
2. Avaliação do presente trabalho e da contribuição para o esclarecimento das questões relativas à utilização de biocombustíveis nos veículos automóveis.
3. Do ponto de vista energético, ambiental e económico, vale a pena utilizar biodiesel em veículos?
4. Que trabalhos podem ser realizados no sentido da continuidade deste estudo?

Esta página foi intencionalmente deixada em branco.

5.1 Sinopse

A energia é hoje um bem essencial para os vários setores da sociedade, constatando-se que a maioria das fontes para obtenção dessa energia são atualmente de origem fóssil. No setor dos transportes, a dependência do petróleo é ainda mais acentuada e a utilização deste tipo de combustível é fonte de vários problemas ambientais, políticos e económicos. Neste contexto verifica-se como essencial a necessidade de procurar alternativas para a propulsão de veículos, surgindo os biocombustíveis como uma dessas alternativas.

A utilização de biocombustíveis em veículos terrestres foi regulamentada com a entrada em vigor, a 1 de Janeiro de 2011, do decreto-lei 117/2010 de 25 de Outubro (Ministério da Economia 2010), que transpõe para Portugal a diretiva 2009/28/CE (Conselho e Parlamento Europeu 2009), estabelecendo novos incentivos à utilização de biocombustíveis no setor de veículos terrestres, como substitutos aos combustíveis fósseis. Esta legislação pretende definir o contributo para que seja atingida a meta de 31% do consumo final de energia com origem renovável em 2020, mitigando um pouco a dependência energética externa relativamente ao petróleo e seus subprodutos. No setor dos biocombustíveis, com o estabelecimento do decreto-lei 117/2010, pretende-se que a percentagem de incorporação de biocombustíveis seja crescente ao longo do tempo até 2020, permitindo até essa altura atingir pelo menos 10% de incorporação. Ainda de acordo com o mesmo decreto-lei, especificamente para o caso do biodiesel, é definido no artigo 28º, o objetivo de que a incorporação deste combustível no gasóleo atinja pelo menos 6,75% até ao final de 2014, estando esta meta atingida em Portugal no presente ano de 2012, sendo salientado no decreto-lei 49/2009 o objetivo

de atingir 20% de incorporação de biodiesel no gasóleo até 2020. Uma determinação importante do decreto-lei 117/2010, suportado pela diretiva 2009/28/CE, é a definição de critérios de sustentabilidade que permitem garantir que a produção de biocombustíveis segue determinadas soluções que assegurem efetivamente uma redução de emissões com gases de estufa relativamente ao combustível fóssil substituído. Estes critérios visam o estabelecimento dos denominados títulos de biocombustíveis (TdB).

Um objectivo fulcral do presente trabalho é estabelecer os reais efeitos associados à utilização de biocombustíveis nos motores de veículos terrestres, nomeadamente nos transportes rodoviários. É clara a atualidade do trabalho, que se pretende que constitua uma contribuição relevante neste setor.

São abordadas duas situações distintas. Uma respeitante à categoria de veículos pesados e outra considerando veículos ligeiros, através do recurso a metodologias distintas, de modo a conseguir caracterizar adequadamente a utilização de veículos em circunstâncias reais de circulação, paralelamente à realização de ensaios em laboratório. Esta abordagem motivou alguma exatidão complexidade pela conjugação de diversos meios e pela abrangência de recursos utilizados. A perspetiva utilizada teve o condão de permitir a obtenção de dados concretos relativamente à representatividade das circunstâncias a que os veículos são sujeitos na realidade.

Das várias ferramentas e diversos meios utilizados podem-se destacar: o banco de ensaios de motores, o banco de ensaios de rolos, a possibilidade de utilizar os dados de consumo de combustível de uma frota de veículos de transporte pesados de passageiros, o acesso a biodiesel com propriedades que permitem o cumprimento da norma EN 14214 e a utilização de equipamentos que garantem a possibilidade de caracterizar esse combustível e ainda o desenvolvimento de uma metodologia de realização de ensaios em estrada.

A resolução das dificuldades inerentes à utilização tão abrangente de meios permitiu na realidade atingir os pressupostos iniciais definidos, como o desenvolvimento de uma metodologia credível para a realização de ensaios em estrada, a obtenção de resultados relativamente ao consumo de combustível e às emissões de NOx. O trabalho permitiu a estruturação de um conjunto de informações num documento que poderá ser utilizado pelos vários intervenientes na área dos transportes, de modo a aumentar a capacidade de análise e assertividade relativamente às opções sobre o tipo de combustível utilizado nos veículos.

5.2 Discussão sobre as metodologias utilizadas e resultados obtidos

Com o objetivo de analisar a comparação de consumo de combustível, a avaliação das emissões de gases de escape e da análise do desempenho de motores foram utilizadas três metodologias distintas com recurso a três diferentes ferramentas, envolvendo um banco de ensaios de motores, um banco de ensaios de rolos e equipamentos para a realização de ensaios em estrada, tendo neste contexto sido desenvolvida uma metodologia que permitiu obter resultados fiáveis na comparação do consumo e das emissões quando se utilizam duas fontes energéticas distintas. No caso do presente estudo, foi possível avaliar de modo comparativo o comportamento de motores de ignição por compressão quando utilizam biodiesel em substituição do gasóleo. A utilização de resultados obtidos em condições reais de circulação em estrada, tendo sido um dos principais impulsionadores para o presente trabalho, foi estabelecida com sucesso.

Foram deste modo utilizadas duas abordagens distintas, tendo em conta o estudo de veículos pesados e de veículos ligeiros. Como base comum aos dois estudos salienta-se, no caso da análise de veículos pesados, o recurso ao banco de ensaios de motores complementados com resultados obtidos através de dados reais de uma frota de veículos pesados de passageiros. Para a análise de veículos ligeiros, os resultados obtidos em banco de ensaios de motores foi complementado com os dados resultantes dos ensaios em banco de rolos e através das informações recolhidas nos ensaios em estrada.

Foi desenvolvido trabalho no sentido de conhecer melhor e caracterizar mais detalhadamente os combustíveis que vão ser utilizados, tendo sido avaliada a variação da viscosidade, da densidade e do poder calorífico dos combustíveis em função da quantidade de biodiesel misturado. Destes aspetos deve salientar-se o comportamento da viscosidade com a temperatura para diferentes teores de biodiesel misturado no gasóleo. Esta variação não ocorre de forma linear nas misturas contendo até 20% de biodiesel (B20), sendo aproximadamente linear para valores de incorporação superiores a 20%. Pela análise dos resultados obtidos é ainda possível concluir que a variação do poder calorífico diminui proporcionalmente com a quantidade de biodiesel misturado no combustível, sendo, para o caso do B100, registada uma diminuição de aproximadamente 12,5% relativamente ao gasóleo numa análise mássica e cerca de 8% em termos volumétricos.

Na análise dos resultados obtidos para veículos pesados foi possível detetar alguns benefícios energéticos do biodiesel relativamente ao gasóleo, principalmente quando se utilizam misturas B10, B15, B20 e B30, sendo detetável uma melhoria ligeira da eficiência de conversão energética para estes combustíveis relativamente ao gasóleo (B0), confirmada pelo estudo relativo aos dados da frota de cerca de 200 autocarros. Foi ainda constatável a importância de se considerar a utilização de dados reais de circulação, sendo de destacar a diferença obtida pelos veículos sujeitos a circulação tipicamente urbana face aos veículos de circulação extra-urbana, salientando-se que a utilização de biodiesel (B10, B20 e B30) nos autocarros pertencentes à subfrota de circulação urbana, motivou uma diminuição ligeira no consumo de combustível.

Também ao nível das emissões de NO_x provenientes dos veículos pesados, pela análise dos resultados obtidos em banco de ensaios de motores, se verificou que existe uma real necessidade

que a avaliação seja mais concreta, contemplando a obtenção de dados de circulação efetivos, sendo este um passo importante em termos de trabalho futuro.

Um parâmetro bastante sensível para que a aceitação da utilização de biocombustíveis seja um facto é o custo associado à sua utilização. Deste modo foi elaborada uma análise económica sobre a utilização de biodiesel nos autocarros, utilizando os dados relativos aos preços praticados na data da realização do estudo, sendo visível uma ligeira diminuição dos custos operativos relativos à utilização de biodiesel, mesmo quando se verificava um aumento do consumo de combustível associado à incorporação de biodiesel.

Relativamente aos resultados obtidos no estudo de veículos ligeiros, contrariamente à abordagem efetuada nos veículos pesados, foi apenas contemplada a utilização de gasóleo face à utilização de B20.

A metodologia de ensaios em estrada, dividindo também as tipologias de circulação, permitiu a obtenção de resultados que refletiram a melhoria da eficiência de conversão energética em situações de circulação extraurbana e urbana pela utilização de B20 face ao consumo de gasóleo (B0) verificando-se uma aparente nulidade deste parâmetro nos trajetos em autoestrada.

A comparação destes resultados relativos à utilização real de veículos foi ao encontro do que foi obtido em banco de ensaios de motores, onde foi possível constatar uma grande variabilidade de resultados, sendo evidentes aumentos e diminuições ligeiras de consumo de combustível pela utilização de B20 face ao consumo de gasóleo, sendo contudo de salientar que existe uma melhoria da eficiência de conversão energética associada à utilização de B20, numa boa parte dos 30 pontos de funcionamento do motor avaliados. Será contudo importante lembrar que os motores considerados nos ensaios em estrada e em banco de motores caracterizavam-se por terem distintas tecnologias de injeção de combustível. A importância da metodologia utilizada, tendo em conta a utilização de ensaios em estrada, ressalta quando comparados os resultados obtidos através deste processo e os resultados dos ensaios em banco de rolos, onde se revela em termos médios um aumento ligeiro (2,66%) pela utilização de B20, que na realidade não é confirmada pela utilização em estrada dos veículos, evidenciando a importância da análise real face à simulação das condições realizada em laboratório.

Os resultados das emissões de NOx obtidos nos ensaios em banco de motores registam igualmente uma significativa variabilidade positiva ou negativa em função do regime do motor, tornando evidente a necessidade de caracterização do funcionamento preferencial do veículo de modo a poder obter valores concretos sobre os impactos da utilização de biodiesel relativamente às emissões de NOx.

5.3 Análise crítica do trabalho

De acordo com o que foi estabelecido no capítulo I, far-se-á de seguida uma análise sobre o grau de concretização dos objetivos delineados inicialmente para o presente trabalho.

1º objetivo: Foram realizados vários ensaios tendo em conta a utilização de veículos em percursos tipicamente portugueses, utilizando os trajetos urbanos de Coimbra nos veículos ligeiros e de Guimarães nos veículos pesados, bem como percursos extra-urbanos, considerando zonas caracterizadas por declives mais acentuados e outros mais planos, que permitem, de certo modo, representar as estradas nacionais. Neste contexto foi analisado o modo como a utilização de biodiesel afeta o consumo e o desempenho de veículos. Pode afirmar-se que este objetivo foi cumprido com considerável sucesso, tendo sido desenvolvida uma metodologia que permitiu a obtenção de informações bastante precisas, tendo em consideração a utilização de veículos em condições mais difíceis de controlar do que as registadas em laboratório, mas que, em todo o caso, a utilização da metodologia permitiu contornar.

2º objetivo: De modo a avaliar o efeito que a utilização de biodiesel poderia ter para o ambiente, fundamentalmente pelo incremento ou pela diminuição das emissões poluentes mais graves provenientes de motores de ignição, foram analisadas as emissões de NOx e de partículas nos ensaios em banco de motores. Todavia, este propósito não foi completamente atingido. Em primeira instância ocorreram alguns problemas com o equipamento de análise de fumos pelo que este parâmetro não foi caracterizado do modo como se pretendia. Relativamente às medições de emissões de NOx, conseguiram-se resultados que permitiram concluir que este parâmetro, à semelhança do que ocorre com o consumo de combustível, apresenta uma variabilidade significativa, sendo fortemente influenciado pelo regime de funcionamento do motor, pelo que apenas uma análise concreta da utilização do veículo em condições reais permitirá traduzir o impacto ambiental ao nível das emissões de NOx, quer pela realização de testes em estrada, quer através da transposição dessas condições para o banco de ensaios de motores.

3º objetivo: Julga-se ajustado afirmar que o presente documento, mesmo que assente numa estrutura científica, permite concentrar algumas informações essenciais ao entendimento sobre os efeitos que a utilização de biodiesel nos veículos poderá implicar, permitindo a produtores de biodiesel, investidores, empresas de transportes e utilizadores em geral uma maior compreensão sobre este assunto. Considera-se pois este objetivo plenamente cumprido, embora exista algum trabalho a fazer, no sentido de acompanhar a evolução nesta área de conhecimento.

4º objetivo: Conforme já referido, foi desenvolvida uma metodologia que permite representar de modo concreto o comportamento efetivo de veículos ao nível do consumo, quando abastecidos por diferentes combustíveis ou propulsionados por diferentes fontes energéticas. Este passo, embora ainda incompleto, permitiu contudo estabelecer uma base de trabalho bastante sólida no sentido em que permite a obtenção de informações bastante fiáveis, embora necessite de maior desenvolvimento e principalmente de incrementar as potencialidades ao nível das emissões de gases de escape e da obtenção de dados instantâneos de consumo e emissões.

5.4 Conclusões

A dependência energética do setor dos transportes é uma evidência clara, estando neste momento em Portugal apenas a ser efetivamente minimizada pela utilização de biodiesel. Pode argumentar-se que esta tecnologia será apenas de transição e que num futuro mais ou menos próximo surgirão outras soluções com outras potencialidades, atendendo a que apesar de diminuir os impactos de emissões de gases com efeito de estufa, essa diminuição não é tão relevante como se desejaria. Contudo, nas atuais circunstâncias, esta é efetivamente uma solução real e já com algumas provas dadas, surgindo com a capacidade de substituir o gasóleo que é o combustível mais utilizado pelos transportes rodoviários em Portugal.

O presente trabalho é uma avaliação concreta dos efeitos que a utilização de biodiesel em substituição do gasóleo traria em termos dos consumos de combustível e das emissões de gases com efeito de estufa. Pode concluir-se que não existe um impacto significativo devido à utilização de biodiesel, principalmente quando se considera a utilização de incorporações até 20% de biodiesel no gasóleo. Contrariamente ao que é taxativamente referido em várias publicações, não é absolutamente claro que a utilização de biodiesel, pelo facto de possuir menor conteúdo energético por litro de combustível, traduza essa característica diretamente num aumento do consumo. Há razões para se pensar que em determinadas situações ocorre um aumento da eficiência energética, sendo possível que, mesmo com a utilização de um combustível com menor quantidade de energia, resulte uma maior disponibilidade energética. É também claro, através dos resultados obtidos, que em função do comportamento dos motores quando sujeitos a diferentes tipos de exigência, correspondentes a diferentes tipologias de percurso, ocorre uma distinta avaliação em termos de consumo e emissões de NO_x, quando o motor é abastecido com uma mistura de biodiesel em gasóleo.

É necessário ter em atenção que atualmente os motores são concebidos para utilizarem gasóleo, não considerando à partida a utilização de biodiesel. Foi já dado um passo pela União Europeia no sentido de assegurar a obrigatoriedade de incorporação de biodiesel no gasóleo e de garantir que o biodiesel utilizado corresponde efetivamente a uma diminuição das emissões de gases com efeito de estufa. Através desta garantia da utilização de uma forma sustentada de produção desta fonte energética, será também importante que o desenvolvimento dos motores corresponda à utilização preferencial de uma dada quantidade de biodiesel incorporada no gasóleo, de modo a poder daí retirar o máximo de rendimento.

Ainda em relação à obtenção de resultados, conforme foi já reconhecido pela própria comunidade europeia, não basta ter caracterizado determinado ciclo de ensaios para homologação de motores e utilizá-lo na caracterização do comportamento desses motores quando abastecidos por combustíveis com diferentes proveniências. Será necessário integrar o recurso a ensaios de veículos em circulação em condições reais de tráfego, estrada e ambiente, permitindo uma caracterização mais fiel e menos padronizada de modo a conduzir a uma resposta mais adequada às reais condições em que os veículos serão utilizados. Neste contexto, também o trabalho efetuado permitiu conduzir a uma metodologia que, embora necessite de algumas melhorias, aumentando as capacidades de obtenção de resultados, permite ainda assim dar um passo seguro na obtenção de resultados com bastante fiabilidade relativamente à avaliação comparativa da utilização de sistemas de propulsão distintos.

5.5 Trabalho de continuidade a realizar no futuro

De acordo com aquilo que foi sendo referido ao longo do texto, é possível identificar 3 fortes perspetivas em termos da continuidade do presente estudo:

- 1- Utilizar o banco de ensaios motores para realizar ensaios em motores com tecnologias mais recentes de injeção de combustível, nomeadamente "*common-rail*", de modo a poder realizar um estudo similar ao realizado com o motor VW TDI, mas com maior grau de comparabilidade relativamente aos ensaios em estrada.
- 2- Encontrar soluções que permitam a análise mais completa dos ensaios, nomeadamente a capacidade para avaliar os efeitos da utilização de biodiesel nas emissões de partículas.
- 3- Desenvolver a metodologia de ensaios em estrada, para permitir efetuar medições instantâneas do consumo, e melhorar as potencialidades do sistema de aquisição, integrando a medição de emissões de NOx e de partículas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Esta página foi intencionalmente deixada em branco.

- Aggarwal, A. K. (2007).** Biofuels (alcohols and biodiesel) applications as fuels for internal combustion engines. *Progress in Energy and Combustion Science*, 33 - Elsevier Ltd. , 233-271.
- Aggarwal, S. (1998).** A review of spray ignition phenomena: present status and future research . *Prog. Energy Combustion Science Vol. 24 - Elsevier Science Limited. , 565-600.*
- Agudelo, J., Benjumea, P., & Villegas, A. P. (2010).** Evaluation of nitrogen oxide emissions and smoke opacity in a HSDI diesel engine fuelled with palm oil biodiesel. *Revista Facultad de Ingeniería, 51 - Universidad de Antioquia , 62-71.*
- Ahmed, I. (2001).** Oxygenated Diesel: Emissions and Performance Characteristics of Ethanol-Diesel Blends in CI Engines. *2001-01-2475- SAE Technical paper .*
- Albuquerque, M.C.G.; Machado, Y.L.; Torres, A.E.B.; Azevedo, D.C.S.; C.L. Cavalcante, Jr.; Firmiano, L.R.; E.J.S. Parente, Jr. (2009).** Properties of biodiesel oils formulated using different biomass sources. *Renewable Energy 34 - Elsevier Science Ltd. , 857–859.*
- Alessandrini, A., Orecchini, F., Ortenzi, F., & Campbell, F. V. (2009).** Drive-style emissions testing on the latest two Honda hybrid technologies. *Eur. Transport Research Rev.1 - Springer , 57–66.*
- Ali, Y., Eskridge, K. M., & Hanna, M. A. (1995).** Testing of alternative diesel fuel from tallow and soybean oil in cummins n14-410 diesel engine. *Bioresource Technology, 53 - Elsevier Ltd. , 243-245.*
- Ali, Y., Hanna, M. A., & Leviticus, L. I. (1995).** Emissions and Power Characteristics of diesel engines on methyl soyate and diesel fuel blends. *Bioresource Technology, 52 - Elsevier Science Ltd. , 185-195.*
- Alleman, T. L., & McCormick, R. L. (2003).** Fischer-Tropsch Diesel Fuels – Properties and Exhaust Emissions: A Literature Review. *SAE Technical paper 2003-01-0763 .*
- Anand, K., Ranjan, A., & Mehta, a. P. (2010).** Estimating the Viscosity of Vegetable Oil and Biodiesel Fuels. *Energy Fuels 24 - ACS , 664-672.*
- André, M. (2004).** The ARTEMIS European driving cycles for measuring car pollutant emissions. *Science of the Total Environment 334–335 - Elsevier Ltd. , 73–84.*
- André, M., Joumard, R., Vidon, R., Tassel, P., & Perret, P. (2006).** Real-world European driving cycles, for measuring pollutant emissions from high- and low-powered cars. *Atmospheric Environment, 40 - Elsevier Ltd. , 5944–5953.*
- Armas, O., Hernández, J. J., & Cárdenas, M. D. (2006).** Reduction of diesel smoke opacity from vegetable oil methyl esters during transient operation. *Fuel, 85 - Elsevier Ltd. , 2427-2438.*
- Armas, O., Yehliu, K., & Boehman, A. L. (2010).** Effect of alternative fuels on exhaust emissions during diesel engine operation with matched combustion phasing. *Fuel, 89 - Elsevier Ltd. , 438–456.*
- Atkins, R. D. (2009).** *An introduction to engine testing and development.* Warrendale - USA: SAE International.
- Babu, A. K., & Devaradjane, G. (2003).** Vegetable Oils And Their Derivatives As Fuels For CI Engines: An Overview. *SAE Technical paper 2003-01-0767 .*
- Bakeas, E., Karavalakis, G., Fontaras, G., & Stournas, S. (2011).** An experimental study on the impact of biodiesel origin on the regulated and PAH emissions from a Euro 4 light-duty vehicle. *Fuel, 90 - Elsevier Ltd. , 3200–3208.*
- Balat, M. (2006).** Fuel characteristics and the use of biodiesel as a transportation fuel. *Energy sources, part.A 28 - Taylor and Francis Group. , 855-864.*
- Ban-Weiss, G. A., Chen, J. Y., Buchholz, B. A., & Dibble, R. W. (2007).** A numerical investigation into the anomalous slight NOx increase when burning biodiesel; A new (old) theory. *Fuel Processing Technology, 88 , 659-667.*
- Barata, J. (2008).** Modelling of biofuel droplets dispersion and evaporation. *Renewable Energy, 33 , 769-779.*

- Bartle, J. R., & Abadi, A. (2010).** Toward Sustainable Production of Second Generation Bioenergy Feedstocks. *Energy Fuels*, 24 - ACS Publications , 2-9.
- Basavaraja, T., Reddy, R. P., & Swamy, V. (2005).** Effect of injection pressure on emission performance of bio-diesel and its blends. *SAE Technical paper 2005-26-030* .
- Basha, S. A., & Gopal, K. R. (2012).** A review of the effects of catalyst and additive on biodiesel production, performance, combustion and emission characteristics. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16 - Elsevier Ltd. , 711-717.
- Batista, P. C., Silva, C. M., Farias, T. L., & Heywood, J. B. (2012).** Energy and environment impacts of alternative pathways for the Portuguese road transportation sector. *Energy Policy*, 51 , 802-815.
- Benjumea, P., Agudelo, J., & Agudelo, A. (2008).** Basic properties of palm oil biodiesel-diesel blends. *Fuel* 87 - Elsevier Science Ltd. , 2069-2075.
- Bhale, P. V., Deshpande, N. V., & Thombre, S. B. (2009).** Improving the low temperature properties of biodiesel fuel. *Renewable Energy* 34 - Elsevier Science Ltd. , 794-800.
- Biluck Jr., J., & Bourbon, E. M. (2002).** The Medford Twp., New Jersey Biodiesel School Bus Project. *SAE Technical paper 2002-01-1944* .
- Bloem, H., Monforti-Ferrario, F., Szabo, M., & Jäger-Waldau, A. (2010).** *Renewable Energy Snapshots 2010*, . European Commission, DG Joint Research Centre, Institute for Energy, Renewable Energy Unit. EUR 24440 EN, June 2010, European Union.
- Boehman, A.; Alam, M.; Song, J.; Acharya, R.; Szybist, J.; Zello, V.; Miller, K. (2003).** Fuel formulation effects on fuel injection, combustion, emissions and emission control. *Proceedings of DOE 2003 Diesel Engine Emissions Reduction Conference*, (pp. 1-9). Newport, Rhode Island - USA.
- Bondioli, P., Gasparoli, A., Bella, L. D., Tagliabue, S., & Toso, G. (2003).** Biodiesel stability under commercial storage conditions over one year. *Eur. J. Lipid Sci. Technol.* 105, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim , 735-741.
- Borgelt, S., Kolb, T. S., & Schumacher, L. G. (1994).** Biodiesel : World Status. *Proceedings of an Alternative Energy Conference*, (pp. 67-76). Kansas City, Missouri - USA.
- Borman, G. L., & Ragland, K. W. (1998).** *Combustion Engineering*. Singapore: McGraw-Hill International Editions.
- Bozbas, K. (2006).** Biodiesel as an alternative motor fuel: Production and policies in the European Union. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12 - Elsevier Ltd. , 542-552.
- Breuer, C. (1995).** The influence of fuel properties on the heat release in DI-diesel engines. *Fuel Vol.74 No.12 - Elsevier Science Limited* , 1767-1771.
- Bridgewater, A. V., & Double, J. M. (1994).** Production costs of liquid fuels from biomass. *International Journal of Energy Research*, 18 , 79-95.
- Canakci, M. (2007).** Combustion characteristics of a turbocharged DI compression ignition engine fueled with petroleum diesel fuels and biodiesel. *Bioresource Technology* 98 - Elsevier Ltd. , 1167-1175.
- Canakci, M., & Gerpen, J. H. (2001).** Comparison of Engine Performance and Emissions for Petroleum Diesel Fuel, Yellow Grease Biodiesel, and Soybean Oil Biodiesel. *ASAE Annual International Meeting*, (pp. 1-26). Sacramento, California, USA.
- Candeia, R. A., Freitas, J., Souza, M., Conceição, M. M., Santos, I. M., Soledade, L., Souza, A.G. (2007).** Thermal and rheological behavior of diesel and methanol biodiesel blends. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, Vol. 87 3 - Akadémiai Kiadó, Budapest* , 653-656.
- Cansino, J., Pablo-Romero, M. d., Román, R., & Yñiguez, R. (2012).** Promotion of biofuel consumption in the transport sector: An EU-27 perspective. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16 , 6013-6021.

- Carraretto, C., Macor, A., Mirandola, A., Stoppato, A., & Tonon, S. (2004).** Biodiesel as alternative fuel: Experimental analysis and energetic evaluations. *Energy, 29 - Elsevier Ltd.* , 2195–2211.
- Çetinkaya, M., Ulusoy, Y., Tekin, Y., & Karaosmanoglu, F. (2005).** Engine and winter road test performances of used cooking oil originated biodiesel. *Energy Conversion and Management, 46* , 1279–1291.
- Chen, Y.-C., & Wu, C.-H. (2002).** Emission of submicron particles from a direct injection diesel engine by using biodiesel. *Journal of Environmental Science and Health, part A, 37; 5* , 829-843.
- Clark, N. N., Daley, J. J., Nine, R. D., & Atkinson, C. M. (1999).** Application of the New City-Suburban Heavy Vehicle Route (CSHVR) to Truck Emissions Characterization . *1999-01-1467 SAE Technical paper* .
- Coelho, P., & Costa, M. (2007).** *Combustão*. Amadora - Portugal: Edições Orion.
- Colaço, M. J., Teixeira, C. V., & Dutra, L. M. (2010).** Thermal analysis of a diesel engine operating with diesel–biodiesel blends. *Fuel 89 - Elsevier Ltd.* , 3742–3752.
- COMISSÃO EUROPEIA. (2011).** *Roteiro do espaço único europeu dos transportes – Rumo a um sistema de transportes competitivo e económico em recursos*. Bruxelas: COMISSÃO EUROPEIA.
- Conselho do Parlamento Europeu. (28 de Setembro de 2005).** **Diretiva 2005/55/CE.** *Jornal Oficial L 275, 20/10/2005* . Bruxelas: Comunidade Europeia.
- Conselho do Parlamento Europeu. (11 de Fevereiro de 2004).** **Diretiva 80/1268/CE.** *Jornal Oficial L49 de 19/2/2004* . Bruxelas: Comunidade Europeia.
- Conselho e Parlamento Europeu. (23 de Abril de 2009).** **Diretiva 28/2009/CE.** *Promoção do uso de energias renováveis* .
- Coronado, C. R., Jr., J. A., Yoshioka, J. T., & Silveira, J. L. (2009).** Determination of ecological efficiency in internal combustion engines: the use of biodiesel. *Applied Thermal Engineering, 29 - Elsevier Ltd.* , 1887–1892.
- Corrêa, S. M., & Arbilla, G. (2006).** Aromatic hydrocarbons emissions in diesel and biodiesel exhaust. *Atmospheric Environment; 40 - Elsevier Ltd.* , 6821–6826.
- Demirbas, A. (2008).** *Biodiesel, a realistic fuel alternative for diesel engines*. London: Springer-Verlag London Ltd.
- Demirbas, A. (2007 a).** Importance of biodiesel as a transportation fuel. *Energy Policy, 35 - Elsevier Ltd.* , 4661–4670.
- Demirbas, A. (2007 b).** Progress and recent trends in biofuels. *Progress in Energy and Combustion Science, 33 - Elsevier Ltd.* , 1–18.
- Demirbas, A., & Demirbas, M. F. (2011).** Importance of algae oil as a source of biodiesel. *Energy Conversion and Management, 52 - Elsevier Ltd.* , 163–170.
- Demirbas, M., & Balat, M. (2006).** Recent advances on the production and utilization trends of bio-fuels: A global perspective. *Energy, Conversion and Management, 47 - Elsevier Ltd.* , 2371-2381.
- Desantes, J. M., J., B., Riesco, J. M., & De Rudder, K. (2004).** The influence of injection pressure, boost pressure and egr on emissions and fuel consumption of a heavy-duty diesel engine. *FISITA 2004*. Barcelona, Spain: International Federation of Automotive Engineering Societies.
- DGGE. (Novembro de 2010).** Obtido em 22 de 10 de 2011, de www.dgge.pt
- Diesel Fuel Injection Equipment Manufacturers. (September de 2009).** Fuel Requirements for Diesel Fuel Injection Systems – Joint FIE Manufacturers Statement.
- Dietsche, K.-H., & Klingebiel, M. (2007).** *Automotive Handbook, 7th edition*. England: John Wiley & Sons Ltd.

- Dorado, M., Ballesteros, E., Arnal, J., Gómez, J., & López, F. (2003).** Exhaust emissions from a Diesel engine fueled with transesterified waste olive oil. *Fuel*, 82 - Elsevier Science Ltd. , 1311-1315.
- Durbin, T. D., & Norbeck, J. M. (2002).** Effects of biodiesel blends and arco ec-diesel on emissions from light heavy duty diesel vehicles. *Environmental Science and Technology*, 36 - American Chemical Society , 1686-1691.
- Dwivedi, D., Agarwal, A. K., & Sharma, M. (2006).** Particulate emission characterization of a biodiesel vs diesel-fuelled compression ignition transport engine: A comparative study. *Atmospheric Environment*, 40 - Elsevier Ltd. , 5586–5595.
- Earley, J., & Mckeown, A. (2009).** *Smart choices for biofuels*. USA: Lisa Mastny.
- Erazo Jr., J. A., Parthasarathy, R., & Gollahalli, S. (2010).** Atomization and combustion of canola methyl ester biofuel spray. *Fuel* 89 - Elsevier Ltd. , 3735–3741.
- Ericsson, E. (2001).** Independent driving pattern factors and their influence on fuel-use and exhaust emission factors. *Transportation Research D*, 6 - Elsevier Ltd. , 325-345.
- EU, E. C. (17 de 10 de 2012).** COM(2012) 595 final . *Proposal for a Directive of the European Parliament and of the Council* . Bruxelas.
- Fanick, E. R. (2008).** Diesel keeping pace with diesel engine technology. *2008-01-1808 SAE technica paper* .
- Fazal, M., Haseeb, A., & Masjuki, H. (2011).** Biodiesel feasibility study: An evaluation of material compatibility; performance; emission and engine durability. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15 , 1314-1324.
- Ferguson, C. R., & Kirkpatrick, A. T. (2001).** *Internal Combustion Engines, Applied Thermosciences - 2nd edition*. United States America: John Wiley & Sons, Inc.
- Fernando, S., Hall, C., & Jha, S. (2006).** NO x Reduction from Biodiesel Fuels. *Energy & Fuels*, 20 - American Chemical Society , 376 - 382.
- Fontaras, G., Karavalakis, G., Kousoulidou, M., Tzamkiozis, T., Ntziachristos, L., Bakeas, E., Stournas, S.; Samaras, Z.(2009).** Effects of biodiesel on passenger car fuel consumption, regulated and non-regulated pollutant emissions over legislated and real-world driving cycles. *Fuel* 88, Elsevier Ltd. , 1608-1617.
- Fontaras, G., Kousoulidou, M., Karavalakis, G., Tzamkiozis, T., Pistikopoulos, P., Ntziachristos, L., Bakeas, E., Stournas, S.; Samaras, Z. (2010).** Effects of low concentration biodiesel blend application on modern passenger cars. Part 1: Feedstock impact on regulated pollutants, fuel consumption and particle emissions. *Environmental Pollution*, 158 - Elsevier Ltd. , 1451–1460.
- Franke, B., & Reinhardt, G. (1998).** Environmental impacts of biodiesel use. *BioEnergy'98: Expanding BioEnergy Partnerships* , (pp. 1032-1041). Madison, Wisconsin - USA.
- Frey, H. C., & Kim, K. (2004).** *Operational Evaluation of Emissions and Fuel Use of B20 Versus iesel Fueled Dump Trucks*. North Carolina State University - Raleigh, NC 27695-7908: Joint Environmental Research Program - Center for Transportation and the Environment/NCDOT .
- Frondel, M., & Peters, J. (2007).** Biodiesel: A new Oildorado? *Energy Policy*, 35 - Elsevier Ltd. , 1675–1684.
- Gogoi, T., & Baruah, D. (2010).** A cycle simulation model for predicting the performance of a diesel engine fuelled by diesel and biodiesel blends. *Energy*, 35 - Elsevier Ltd. , 1317–1323.
- Golovitchev, V. I., & Yang, J. (2009).** Construction of combustion models for rapeseed methyl ester bio-diesel fuel for internal combustion engine applications. *Biotechnology Advances*, 27 - Elsevier Ltd. , 641–655.
- Gomez, M. E., Howard-Hildige, R., Leathy, J. J., O'Reilly, T., Supple, B., & Malone, M. (2000).** Emission and performance characteristics of a 2 litre toyota diesel van operating on esterified waste cooking oil and mineral diesel fuel. *Environmental Monitoring and Assessment*, 65 - Kluwer Academic Publishers , 13-20.

- Gopinath, A., Puhan, S., & Nagarajan, G. (2009).** Theoretical modeling of iodine value and saponification value of biodiesel fuels from their fatty acid composition. *Renewable Energy - Elsevier Ltd.* , 1806–1811.
- Graboski, M. S., & McCormick, R. L. (1998).** Combustion of fat and vegetable oil derived fuels in diesel engines. *Progress Energy Combustion Science*, 24 , 125-164.
- Graham, L. A., Rideout, G., Rosenblatt, D., & Hendren, J. (2008).** Greenhouse gas emissions from heavy-duty vehicles. *Atmospheric Environment*, 42 - Elsevier Ltd. , 4665–4681.
- Guarierio, L. L., Souza, A. F., Torres, E. A., & Andrade, J. B. (2009).** Emission profile of 18 carbonyl compounds, CO, CO₂, and NO_x emitted by a diesel engine fuelled with diesel and ternary blends containing diesel, ethanol and biodiesel or vegetable oils. *Atmospheric Environment*, 43 - Elsevier Ltd. , 2754–2761.
- Gumus, M., & Kasifoglu, S. (2010).** Performance and emission evaluation of a compression ignition engine using a biodiesel (apricot seed kernel oilmethyl ester) and its blends with diesel fuel. *Biomass and Bioenergy*, 34 - Elsevier Ltd. , 134-139.
- Hamdan, M., & Khalil, R. H. (2010).** Simulation of compression engine powered by Biofuels. *Energy Conversion and Management* 51 , 1714–1718.
- Hansen, A. C., Zhang, Q., & Lyne, P. W. (2005).** Ethanol–diesel fuel blends—a review. *Bioresource Technology*, 96 - Elsevier Ltd. , 277–285.
- Haseeb, A., Fazal, M., Jahirul, M., & Masjuki, H. (2011).** Compatibility os automotive materials in biodiesel: A review. *Fuel*, 90 , 922-931.
- He, C., Ge, Y., Tan, J., & Han, X. (2008).** Spray properties of alternative fuels: A comparative analysis of biodiesel and diesel. *International Journal of Energy Research*, 32 - John Wiley & Sons, Ltd. , 1329-1338.
- He, C., Ge, Y., Tan, J., You, K., Han, X., Wang, J., You, Q., Shah, A.N. (2009).** Comparison of carbonyl compounds emissions from diesel engine fueled with biodiesel and diesel. *Atmospheric Environment*, 43 - Elsevier Ltd. , 3657–3661.
- Hess, M. A., Haas, M. J., & Foglia, T. A. (2007).** Attempts to reduce NO_x exhaust emissions by using reformulated biodiesel. *Fuel Processing Technology*, 88 -Elsevier Ltd. , 693 – 699.
- Heywood, J. B. (1988).** *Internal Combustion Engine Fundamentals*. Singapore: McGraw-Hill.
- Hirkude, J. B., & Padalkar, A. S. (2012).** Performance and emission analysis of a compression ignition engine operated on waste fried oil methyl esters. *Applied Energy* 90 () , 68–72.
- Hoekman, S. K., Broch, A., Robbins, C., Cenicerros, E., & Natarajan, M. (2012).** Review of biodiesel composition, properties, and specifications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16 - Elsevier Ltd. , 143–169.
- Holmén, B. A., & Niemeier, D. A. (1998).** Characteizing the effects of driving variability on real-world vehicle emissions. *Transport Research D*, 3 , 117-128.
- Hribernik, A., & Kegl, B. (2007).** Influence of Biodiesel Fuel on the Combustion and Emission Formation in a Direct Injection (DI) Diesel Engine. *Energy & Fuels*, 21 - American Chemichal Society , 1760 - 1767.
- Hung, W., Tong, H., Lee, C., Ha, K., & Pao, L. (2007).** Development of a practical driving cycle construction methodology: A case study in Hong Kong. *Transportation Research Part D*, 12 - Elsevier Ltd. , 115–128.
- Hyun, G., & Oguma, M. (2002).** Spray and exhaust emission characteristics of a biodiesel engine operating with the blend of plant oil and DME. *SAE technical paper 2002-01-0864* .
- IEA. (2004).** *Biofuels for transport - An international perspective*. International Energy Agency.
- IEA. (2007).** *International Energy Agency*. Obtido em 25 de Setembro de 2010, de www.iea.org/stats

- IEA, Eisentraut, A., Brown, A., Fulton, L., Hanova, J., Saddler, J., Frankl, P., Houssin, D., Diczfalusy, B. (2011).** *Technology Roadmap - Biofuels to Transport*. Paris, France: International Energy Agency - OECD/IEA2011.
- Ilkiliç, C., & Behçet, R. (2010).** The Reduction of Exhaust Emissions from a Diesel Engine by Using Biodiesel Blend. *Energy Sources, Part A, 32 - Taylor & Francis* , 839–850.
- Jeong, G.-T., Oh, Y.-T., & Park, D.-H. (2006).** Emission Profile of Rapeseed Methyl Ester and Its Blend in a Diesel Engine. *Applied Biochemistry and Biotechnology, 129-132 - Humana Press Inc.* , 165–178.
- Jha, S. K., Fernando, S., & To, S. F. (2008).** Flame temperature analysis of biodiesel blends and components. *Fuel 87 - Elsevier Ltd.* , 1982-1988.
- Jie Zhang, K. H., Shi, X., & Zhao, Y. (2009).** Effect of SME biodiesel blends on PM_{2.5} emission from a heavy-duty engine. *Atmospheric Environment, 43 - Elsevier Ltd.* , 2442–2448.
- Joumard, R., André, M., Vidon, R., Tassel, P., & Pruvost, C. (2000).** Influence of driving cycles on unit emissions from passenger cars. *Atmospheric Environment, 34 - Elsevier Science Ltd.* , 4621-4628.
- Julião, J. (2005).** *Conceptual Design of a Support Documentation System to Assist Troubleshooting in Manufacturing - PhD thesis*. England: Cranfield University.
- Karabektas, M. (2009).** The effects of turbocharger on the performance and exhaust emissions of a diesel engine fuelled with biodiesel. *Renewable Energy, 34 - Elsevier Ltd.* , 989–993.
- Karavalakis, G., Alvanou, F., Stournas, S., & Bakeas, E. (2009).** Regulated and unregulated emissions of a light duty vehicle operated on diesel/palm-based methyl ester blends over NEDC and a non-legislated driving cycle. *Fuel 88* , 1078–1085.
- Karavalakis, G., Stournas, S., & Bakeas, E. (2009).** Effects of diesel/biodiesel blends on regulated and unregulated pollutants from a passenger vehicle operated over the European and the Athens driving cycles. *Atmospheric Environment 43* , 1745-1752.
- Karonis, D., Lois, E., Stournas, S., & Zannikos, F. (1998).** Correlations of Exhaust Emissions from a Diesel Engine with Diesel Fuel Properties. *Energy and Fuels, 12 - American Chemical Society* , 230-238.
- Karra, P. K., Veltman, M. K., & Kong, S.-C. (2008).** Characteristics of Engine Emissions Using Biodiesel Blends in Low-Temperature Combustion Regimes. *Energy & Fuels, 22 - American Chemical Society* , 3763–3770.
- Kegl, B. (2008 a).** Biodiesel usage at low temperature. *Fuel, 87 - Elsevier Ltd.* , 1306-1317.
- Kegl, B. (2008 b).** Effects of biodiesel on emissions of a bus diesel engine. *Bioresource Technology, 99 - Elsevier Ltd.* , 863–873.
- Kegl, B. (2006 b).** Experimental Investigation of Optimal Timing of the Diesel Engine Injection Pump Using Biodiesel Fuel. *Energy & Fuels 20 - American Chemical Society* , 1460-1470.
- Kegl, B. (2011).** Influence of biodiesel on engine combustion and emission characteristics. *Applied Energy, 88 - Elsevier Ltd.* , 1803–1812.
- Kegl, B. (2007).** NO_x and Particulate Matter (PM) Emissions Reduction Potential by Biodiesel Usage. *Energy & Fuels, 21 - American Chemical Society* , 3310–3316.
- Kegl, B. (2006 a).** Numerical analysis of injection characteristics using biodiesel fuel. *Fuel 85 - Elsevier Ltd.* , 2377–2387.
- Kegl, B., & Hribernik, A. (2006).** Experimental analysis of injection characteristics using biodiesel fuel. *Energy and Fuels 20 - ACS Publications* , 2239-2248.
- Kegl, B., & Pehan, S. (2008).** Influence of biodiesel on injection fuel spray, and engine characteristics. *Thermal Science 12, No. 2* , 171-182.

- Kegl, B., Kegl, M., & Pehan, S. (2008).** Optimization of a fuel injection system for diesel and biodiesel usage. *Energy and Fuels* 22 - ACS Publications , 1046-1054.
- Kinast, J. A. (2003).** *Production of biodiesels from multiple feedstocks and properties of biodiesels and biodiesel/diesel blends.* Golden, Colorado 80401-3393 - United States America: National Renewable Energy Laboratory - NREL/SR-510-31460 .
- Knothe, G. (Novembro de 2001).** Historical perspectives on vegetable oil-based diesel fuels. *Industrial Oils*, 12 , pp. 1103-1107.
- Knothe, G., & Steidley, K. R. (2005).** Lubricity of Components of Biodiesel and Petrodiesel. The Origin of Biodiesel Lubricity. *Energy & Fuels* 2005, 19 - ACS Publications. , 1192-1200.
- Knothe, G., Gerpen, J. V., & Krahl, J. (2004).** *The biodiesel Handbook.* Champaign, Illinois - USA: AOCS Press.
- Knothe, G., Sharp, C. A., & Ryan, T. W. (2006).** Exhaust Emissions of Biodiesel, Petrodiesel, Neat Methyl Esters, and Alkanes in a New Technology Engine. *Energy & Fuels*, 20 American Chemical Society. , 403-408.
- Kong, S.-C., & Kimber, A. (2008).** Effects of biodiesel blends on the performance of large diesel engines. *SAE Technical paper 2008-01-1389* .
- Kouroussis, D., & Karimi, S. (2006).** Alternative Fuels in Transportation. *Bulletin of Science, Technology & Society*, 26, No. 4, SAGE publications , 346-355.
- Kousoulidou, M., Fontaras, G., Mellios, G., & Ntziachristos, L. (2008).** Effects of biodiesel and bioethanol on exhaust emissions. *ETC/ACC Technical paper* .
- Kousoulidou, M., Fontaras, G., Ntziachristos, L., & Samaras, Z. (2010).** Biodiesel blend effects on common-rail diesel combustion and emissions. *Fuel*, 89 - Elsevier Ltd. , 3442–3449.
- Krahl, J., Munack, A., Ruschel, Y., Schroder, O., & Bunger, J. (2008).** Exhaust gas emissions and mutagenic effects of diesel fuel, biodiesel and biodiesel blends. *SAE Technical paper 2008-01-2508* .
- Kralova, I., & Sjoblom, J. (2010).** Biofuels—Renewable Energy Sources: A Review. *Journal of Dispersion Science and Technology*, 31 - Taylor & Francis Group, LLC , 409–425.
- Krishnamurthy, M., & Gautam, M. (2006).** Development of heavy-duty engine test cycle representative of on-highway not-to-exceed operation. *Institution of Mechanical Engineers - Part D - Journal of Automobile Engineering* (pp. 837-848). Professional Engineering Publishing.
- Labeckas, G., & Slavinskas, S. (2006).** The effect of rapeseed oil methyl ester on direct injection diesel engine performance and exhaust emissions. *Energy Conversion and Management*, 47 , 1954-1967.
- Lapuerta, M., Armas, O., & Ballesteros, R. (2002).** Diesel particulate emissions from biofuels derived from spanish vegetable oils. *SAE Technical paper 2002-01-1657* .
- Lapuerta, M., Armas, O., & Bermúdez, V. (2000).** Sensitivity of diesel engine thermodynamic cycle calculation to measurement errors and estimated parameters. *Applied Thermal Engineering* 20 - Elsevier Science Ltd. , 843±861.
- Lapuerta, M., Armas, O., & Hernández, J. (1999).** Diagnosis of DI Diesel combustion from in-cylinder pressure signal by estimation of mean thermodynamic properties of the gas. *Applied Thermal Engineering*, 19 - Elsevier Science Ltd. , 513-529.
- Lapuerta, M., Armas, O., & Rodríguez-Fernández, J. (2008 a).** Effect of biodiesel fuels on diesel engine emissions. *Progress in Energy and Combustion Science*, 34 - Elsevier Ltd. , 198-223.
- Lapuerta, M., Armas, O., & Rodríguez-Fernández, J. (2008 b).** Effect of the degree of unsaturation of biodiesel fuels on Nox and particulate emissions. *SAE International Journal of Fuels and Lubrication*, vol1 issue 1; 2008-01-1676 , 1150-1158.
- Lapuerta, M., Armas, O., Ballesteros, R., & Fernández, J. (2005).** Diesel emissions from biofuels derived from Spanish potential vegetable oils. *Fuel*, 84 - Elsevier Ltd. , 773–780.

- Leahey, D., Jones, B., Gilligan, J., Brown, L., Hamilton, L., Gutteridge, C., Cowart, J., Caton, P. (2007).** Combustion of biodiesel- and ethanol-diesel mixtures with intake injection. *SAE Technical paper 2007-01-4011* .
- Lebedevas, S., Vaicekauskas, A., Lebedeva, G., Makareviciene, V., & Janulis, P. (2007).** Change in Operational Characteristics of Diesel Engines Running on RME Biodiesel Fuel. *Energy & Fuels, 21 - American Chemical Society* , 3010 - 3016.
- Li, H., -Langton, A. L., Andrews, G. E., Thompson, M., & Musungu, C. (2008).** Comparison of exhaust emissions and particulate size distribution for diesel, biodiesel and cooking oil from a heavy duty DI diesel engine. *SAE Technical paper 2008-01-0076* .
- Li, L., Zhang, X., Wu, Z., Deng, J., & Huang, C. (2006).** Experimental study of biodiesel spray and combustion characteristics. *2006-01-3250 SAE Technical paper* .
- Lin, C.-Y., & Lin, H.-A. (2006).** Diesel engine performance and emission characteristics of biodiesel produced by the peroxidation process. *Fuel 85* , 298–305.
- Lin, Y.-C., Lee, W.-J., Chao, H.-R., Wang, S.-L., Tsou, T.-C., Chang-Chien, G.-P., Tsai, P.-J. (2008).** Approach for Energy Saving and Pollution Reducing by Fueling Diesel Engines with Emulsified Biosolution/Biodiesel/Diesel Blends. *Environmental Science & Technology, 42 - American Chemical Society* , 3849–3855.
- Litman, T. (2005).** Efficient vehicles versus efficient transportation. Comparing transportation energy conservation strategies. *Transport Policy, 12 - Elsevier Ltd.* , 121–129.
- Luján, J., Tormos, B., Salvador, F., & Gargar, K. (2009).** Comparative analysis of a DI diesel engine fuelled with biodiesel blends during the European MVEG-A cycle: Preliminary study (I). *biomass and bioenergy, 33 - Elsevier Ltd.* , 941-947.
- Ma, F., & Hanna, M. A. (1999).** Biodiesel production: a review. *Bioresource Technology 70 - Elsevier Science Ltd.* , 1-15.
- Malça, J., & Freire, F. (2011).** Life-cycle studies of biodiesel in Europe: A review addressing the variability of results and modelling issues. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 15* , 338-351.
- Malça, J., & Freire, F. (2010).** Uncertainty Analysis in Biofuel Systems. An Application to the Life Cycle of Rapeseed Oil. *Journal of Industrial Ecology, 14 - 2* , 322-334.
- Malhotra, R. K., Jain, P., Chopra, A., & Maheshwari, M. (2005).** Effect of bio-diesel blends on performance and and exhaust emissions in passenger car. *SAE Technical Paper 2005-26-032* .
- Martins, J. (2006).** *Motores de Combustão Interna*. Porto - Portugal: Publíndustria - Edições Técnicas.
- Martins, L., Brito, J., Rocha, A., & Martins, J. (2009).** Regenerative Braking potential and energy simulations for a plug-in hybrid electric vehicle under real driving conditions. *IMECE 2009* (pp. 1-8). Lake Buena Vista, Florida, USA : ASME.
- Mazumdar, B., & Agarwal, A. K. (2008).** Performance, emission and combustion characteristics of biodiesel (waste cooking oil methyl ester) fueled IDI diesel engine. *SAE Technicla paper 2008-01-1384* .
- Mazzoleni, C., Kuhns, H., Moosmüller, H., Witt, J., Nussbaum, N., Chang, M., Parthasarathy, G., Nathagoundenpalayam, S., Nikolich, G., Watson, J. (2007).** A case study of real-world tailpipe emissions for school buses using a 20% biodiesel blend. *Science of the Total Environment 385 - Elsevier Ltd.* , 146 – 159.
- McCormick, R. L., & Westbrook, S. R. (2010).** Storage Stability of Biodiesel and Biodiesel Blends. *Energy Fuels 2010, 24 - ACS Publications* , 690–698.
- McCormick, R. L., Alvarez, J. R., Graboski, M. S., Tyson, K. S., & Vertin, K. (2002).** Fuel additive and blending approaches to reducing NOx emissions from biodiesel. *SAE Technical paper 2002-01-1658* .
- McCormick, R. L., Graboski, M. S., Alleman, T. L., & Herring, A. M. (2001).** Impact of Biodiesel Source Material and Chemical Structure on Emissions of Criteria Pollutants from a Heavy-Duty Engine. *Environmental Science Technology, 35 - American Chemical Society* , 1742-1747.

- McCormick, R. L., Ross, J. D., & Graboski, M. S. (1997).** Effect of Several Oxygenates on Regulated Emissions from Heavy-Duty Diesel Engines. *Environmental Science and Technology*, 31 - American Chemical Society , 1144 - 1150.
- McCormick, R. L., Tennant, C. J., R. Robert Hayes, S. B., Ireland, J., McDaniel, T., Williams, A., Frailey, M., Sharp, C. (2005).** Regulated emissions from biodiesel tested in heavy-duty engines meeting 2004 emissions standards. *SAE technical paper 2005-01-2200* .
- McCormick, R., Williams, A., Ireland, J., Brimhall, M., & Hayes, R. (2006).** *Effects of biodiesel blends on vehicle emissions.* NRLE/MP - 540-4055 - National Renewable Energy Laboratory.
- Meher, L., Sagar, D. V., & Naik, S. (2006).** Technical aspects of biodiesel production by transesterification - a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 10 - Elsevier Ltd. , 248-268.
- Ministério da Economia, d. I. (25 de Outubro de 2010). Decreto-Lei 117/2010.**
- Mitteelbach, M. (1996).** Diesel fuel derived from vegetable oils, VI: specifications and quality control of biodiesel. *Bioresource Technology* 56 - Elsevier Science Limited , 7-11.
- Monyem, A., & Gerpen, J. H. (2001).** The effect of biodiesel oxidation on engine performance and emissions. *Biomass and Bioenergy* 20; Elsevier Ltd. , 317–325.
- Monyem, A., Canakci, M., & Gerpen, J. H. (1999).** Investigation of biodiesel thermal stability under simulated in-use conditions. *SAE technical paper 996112* , 1--14.
- Moon, G., Lee, Y., Choi, K., & Jeong, D. (2010).** Emission characteristics of diesel, gas to liquid, and biodiesel-blended fuels in a diesel engine for passenger cars. *Fuel*, 89 - Elsevier Ltd. , 3840–3846.
- Moraes, M. S., Krause, L. C., Cunha, M. E., Faccini, C. S., Menezes, E. W., Veses, R. C., Rodrigues, M., Caramão, E. (2008).** Tallow Biodiesel: Properties Evaluation and Consumption Tests in a Diesel Engine. *Energy & Fuels*, 22 - Elsevier Ltd. , 1949–1954.
- Moriarty, P., & Honnery, D. (2008).** The prospects for global green car mobility. *Journal of Cleaner Production*, 16 - Elsevier Ltd. , 1717-1726.
- Muncrief, R. L., Rooks, C. W., Cruz, M., & Harold, M. P. (2008).** Combining Biodiesel and Exhaust Gas Recirculation for Reduction in NO x and Particulate Emissions. *Energy & Fuels*, 22 - Elsevier Ltd. , 1285–1296.
- Muniyappa, P. R., Brammer, S. C., & Noureddini, H. (1996).** Improved conversion of plant oils and animal fats into biodiesel and co-product. *Bioresource Technology*, 56 Elsevier Science Ltd. , 19-24.
- Nabi, M. N., Akter, M. S., & Shahadat, M. M. (2006).** Improvement of engine emissions with conventional diesel fuel and diesel-biodiesel blends. *Bioresource Technology*, 97 - Elsevier Ltd. , 372-378.
- Nabi, M. N., Schmid, R., & Hustad, J. E. (2010).** Comparative Study on Engine Performance and Diesel Emissions with European Diesel Fuel (DF) - Diethylene Glycol Dimethyl Ether (DGM) and Fischer - Tropsch (FT) - DGM Blends. *Energy Fuels*, 24 - American Chemical Society , 2455 – 2464.
- Ng, J.-H., Ng, H. K., & Gan, S. (2010).** Advances in biodiesel fuel for application in compression ignition engines. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 12 - Springer-Verlag , 459-493.
- Nuszowski, J., Thompson, G. J., Tincher, R., & Clark, N. N. (2008).** Heat release and emission characteristics of B20 biodiesel fuels during steady state and transient operation. *SAE Technical paper 2008-01-1377* .
- Nwafor, O. (2004).** Emission characteristics of diesel engine operating on rapeseed methyl ester. *Renewable Energy*, 29 - Elsevier Ltd. , 119–129.
- Özkan, M. (2007).** Comparative Study of the Effect of Biodiesel and Diesel Fuel on a Compression Ignition Engine's Performance, Emissions, and Its Cycle by Cycle Variations. *Energy & Fuels*, 21 - American Chemical Society , 3627–3636.

- Ozsezen, A. N., & Canakci, M. (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 - Elsevier Ltd , 108–116.
- Ozsezen, A. N., Canakci, M., & Sayin, C. (2008).** Effects of Biodiesel from Used Frying Palm Oil on the Performance, Injection, and Combustion Characteristics of an Indirect Injection Diesel Engine. *Energy & Fuels*, 22 - American Chemical Society , 1297–1305.
- Panwar, N., Shrirame, H. Y., Rathore, N., Jindal, S., & Kurchania, A. (2010).** Performance evaluation of a diesel engine fueled with methyl ester of castor seed oil. *Applied Thermal Engineering*, 30 - Elsevier Ltd. , 245–249.
- Park, S. H., Yoon, S. H., & Lee, C. S. (2011).** Effects of multiple-injection strategies on overall spray behavior, combustion, and emissions reduction characteristics of biodiesel fuel. *Applied Energy* 88 - Elsevier Ltd. , 88–98.
- Pehan, S., Jerman, M. S., Kegl, M., & Kegl, B. (2009).** Biodiesel influence on tribology characteristics of a diesel engine. *Fuel* 88 (2009) , 970–979.
- Pelkmans, L., & Debal, P. (2006).** Comparison of on-road emissions with emissions measured on chassis dynamometer test cycles. *Transportation Research Part D*, 11 - Elsevier Ltd. , 233–241.
- Pelkmans, L., Lenaers, G., Bruyninx, J., Scheepers, K., & Vlieger, I. d. (2011).** Impact of biodiesel blends on the emissions of modern vehicles. *Journal Automotive Engineering: part D*, 225 - Proc. IMechE , 1204-1220.
- Pinto, A.C., Guarieiro, L.L., Rezende, M.J., Ribeiro, N.M., Torres, E.A., Lopes, W.A., Pereira, P.A., Andrade, J.B. (2005).** Biodiesel: an overview. *J. Braz. Chem. Soc.*, 16, No. 6B. , 1313-1330.
- Plint, M., & Martyr, A. (1999).** *Engine testing: theory and practice*. Great Britain: Butterworth-Heinemann.
- Proc, K., Barnitt, R., Hayes, R. R., Ratcliff, M., McCormick, R. L., Ha, L., Fang, H. (2006).** 100,000-Mile Evaluation of Transit Buses Operated on Biodiesel Blends (B20). *SAE Technical paper 2006-01-3253* .
- Puhan, S., & Nagarajan, G. (2008).** Effect of biodiesel unsaturated fatty acid on combustion characteristics of a DI compression ignition engine. *SAE Technical paper 2008-28-0041* , 274-289.
- Puhan, S., Vedaraman, N., Sankaranarayanan, G., & Ram, B. V. (2005).** Performance and emission study of Mahua oil (madhuca indica oil) ethyl ester in a 4-stroke natural aspirated direct injection diesel engine. *Renewable Energy*, 30 - Elsevier Ltd. , 1269–1278.
- Qi, D., Chen, H., Geng, L., & Bian, Y. Z. (2010).** Experimental studies on the combustion characteristics and performance of a direct injection engine fueled with biodiesel/diesel blends. *Energy Conversion and Management*, 51 - Elsevier Ltd. , 2985–2992.
- Qi, D., Geng, L., Chen, H., Bian, Y., Liu, J., & Ren, X. (2009).** Combustion and performance evaluation of a diesel engine fueled with biodiesel produced from soybean crude oil. *Renewable Energy*, 34 - Elsevier Ltd. , 2706–2713.
- Ra, Y., Reitz, R. D., McFarlane, J., & Daw, S. (2008).** Effects of fuel physical properties on diesel engine combustion using diesel and bio-diesel fuels. *SAE International Journal Fuels and Lubrication*, vol1, issue 1 - paper 2008-01-1379 , 703-718.
- Raheman, H., & Ghadge, S. (2007).** Performance of compression ignition engine with mahua (Madhuca indica) biodiesel. *Fuel*, 86 - Elsevier Ltd. , 2568–2573.
- Raheman, H., & Phadatar, A. (2004).** Diesel engine emissions and performance from blends of karanja methyl ester and diesel. *Biomass and Bioenergy*, 27 - Elsevier Ltd. , 393-397.
- Rakopoulos, C. D., Dimaratos, A. M., Giakoumis, E. G., & Rakopoulos, D. C. (2010).** Investigating the emissions during acceleration of a turbocharged diesel engine operating with bio-diesel or n-butanol diesel fuel blends. *Energy*, 35 - Elsevier Ltd. , 5173 - 5184.
- Rakopoulos, C. D., Hountalas, D. T., Taklis, G. N., & Tzanos, E. I. (1995).** Analysis of combustion and pollutants formation in a direct injection diesel engine using a multi-zone model. *International Journal of Energy Research*, 19 , 63-88.

- Rakopoulos, C., Antonopoulos, K., & Rakopoulos, D. (2006 b).** Multi-zone modeling of Diesel engine fuel spray development with vegetable oil, bio-diesel or Diesel fuels. *Energy Conversion and Management* 47 - Elsevier Ltd. , 1550–1573.
- Rakopoulos, C., Antonopoulos, K., Rakopoulos, D., Hountalas, D., & Giakoumis, E. (2006 a).** Comparative performance and emissions study of a direct injection Diesel engine using blends of Diesel fuel with vegetable oils or bio-diesels of various origins. *Energy Conversion and Management*, 47 - Elsevier Ltd. , 3272–3287.
- Rakopoulos, C., Rakopoulos, D., Giakoumis, E., & Dimaratos, A. (2010).** Investigation of the combustion of neat cottonseed oil or its neat bio-diesel in a HSDI diesel engine by experimental heat release and statistical analyses. *Fuel* 89 , 3814–3826.
- Rakopoulos, D., Rakopoulos, C., Hountalas, D., Kakaras, E., Giakoumis, E., & Papagiannakis, R. (2010).** Investigation of the performance and emissions of a bus engine operating on butanol/diesel fuel blends. *Fuel*, 89 - Elsevier Ltd. , 2781-2790.
- Rakopoulos, D., Rakopoulos, C., Kakaras, E., & Giakoumis, E. (2008).** Effects of ethanol-diesel fuel blends on the performance and exhaust emissions of heavy duty DI diesel engine. *Energy Conversion and Management* 49, Elsevier Ltd , 3155-3162.
- Ramadhas, A. S., Jayaraj, S., & Muraleedharan, C. (2010).** Performance and emission studies on biodiesel-liquefied petroleum gas dual fuel engine with exhaust gas recirculation. *Journal of Renewable and Sustainable Energy, 2 - American Institute of Physics* .
- Ramadhas, A., Jayaraj, S., & Muraleedharan, C. (2006).** Theoretical modeling and experimental studies on biodiesel-fueled engine. *Renewable Energy*, 31 - Elsevier Ltd. , 1813–1826.
- Ramadhas, A., Muraleedharan, C., & Jayaraj, S. (2005).** Performance and emission evaluation of a diesel engine fueled with methyl esters of rubber seed oil. *Renewable Energy*, 30 - Elsevier Ltd. , 1789–1800.
- Randazzo, M. L., & Sodr , J. R. (2011).** Cold start and fuel consumption of a vehicle fuelled with blends of diesel oil–soybean biodiesel–ethanol. *Fuel*, 90 - Elsevier Ltd. , 3291–3294.
- Rao, P. (2011).** Experimental Investigations on the influence of properties of jatropha biodiesel on performance, combustion, and emission characteristics of a DI-CI engine. *World Academy of Science, Engineering and Technology* 75 , 855-868.
- Reijnders, L. (2011).** The life cycle emission of greenhouse gases associated with plant oils used as biofuel. *Renewable Energy*, 36 - Elsevier Ltd. , 879-880.
- Rodrigue, J., Comtois, C., & Slack, B. (2006).** Transport and Geography. In *The geography of transport systems* (pp. 1-35). Taylor & Francis.
- Romm, J. (2006).** The car and fuel of the future. *Energy Policy*, 34 - Elsevier Ltd. , 2609–2614.
- Ropkins, K., Quinn, R., Beebe, J., Li, H., Daham, B., Tate, J., Bell, M., Andrews, G. (2007).** Real-world comparison of probe vehicle emissions and fuel consumption using diesel and 5% biodiesel (B5) blend. *Science of the Total Environment*, 376 - Elsevier Ltd. , 267–284.
- Ryan, L., Convery, F., & Ferreira, S. (2006).** Stimulating the use of biofuels in the European Union: Implications for climate change policy. *Energy Policy*, 34 - Elsevier Ltd. , 3184–3194.
- Ryu, K. (2009).** Effect of antioxidants on the oxidative stability and combustion characteristics of biodiesel fuels in an indirect-injection (IDI) diesel engine. *Journal of Mechanical Science and Technology* 23, Elsevier Ltd. , 3105-3113 .
- Sahoo, P., & Das, L. (2009).** Combustion analysis of Jatropha, Karanja and Polanga based biodiesel as fuel in a diesel engine. *Fuel*, 88 - Elsevier Ltd. , 994-999.
- Sahoo, P., Das, L., Babu, M., Arora, P., Singh, V., Kumar, N., Varyani, T. (2009).** Comparative evaluation of performance and emission characteristics of jatropha, karanja and polanga based biodiesel as fuel in a tractor engine. *Fuel*, 88 - Elsevier Ltd. , 1698–1707.

- Savvidis, D., Triandafyllis, J., Grammatikis, V., Gkatzianis, G., & Katopodis, S. (2007).** Influence of various blends cottonseed methylester biodiesel on steady state emissions using an old technology ford escort on a chassis dynamometer. *SAE Technical paper 2007_01_4062* .
- Sayin, C., M. Ilhan, Canakci, M., & Gumus, M. (2009).** Effect of injection timing on the exhaust emissions of a diesel engine using diesel–methanol blends. *Renewable Energy 34, Elsevier Ltd.* , 1261-1269.
- Schafer, A., & Victor, D. G. (2000).** The future mobility of the world population. *Transportation Research Part A 34 - Elsevier Science Ltd.* , 171-205.
- Schmidt, K., & Gerpen, J. V. (1996).** The Effect of Biodiesel Fuel Composition on Diesel Combustion and Emissions. *SAE Technical Paper 961086* .
- Sem, T. R. (2004).** Effect of Various Lubricating Oils on Piston Deposits in Biodiesel Fueled Engines. *2004-01-0098 SAE Technical paper* .
- Senatore, A., Cardone, M., Buono, D., & Rocco, V. (2008).** Combustion Study of a Common Rail Diesel Engine Optimized to be Fueled with Biodiesel. *Energy & Fuels, 22 - American Chemical Society* , 1405-1410.
- Senda, J., Okui, N., Tsukamoto, T., & Fujimoto, H. (2004).** On-Board Measurement of Engine Performance and Emissions in Diesel Vehicle Operated with Bio-diesel Fuel. *SAE Technical paper 2004-01-0083* .
- Serrano, L. (1999).** *Desenvolvimento de um sistema para a aquisição de dados e o controlo de um banco de ensaios de motores - Tese de mestrado.* Coimbra: Universidade de Coimbra.
- Serrano, L., Câmara, R., Carreira, V., & Silva, M. (2009).** Avaliação em banco de ensaio de motores do desempenho de várias misturas de biodiesel. . *Encontro Nacional do Colégio de Eng^o Mecânica.* Guimarães.
- Serrano, L., Costa, J., & Silva, M. (2010).** Impact of advances on computing and communication systems in automotive testing. In M. M. Cruz-Cunha, & F. Moreira, *Handbook of Reserach on Mobility and Computing: Evolving Technologies and Ubiquous Impacts* (pp. 703 - 718). Hershey - New York: IGI Gloabl.
- Sharp, C. A., Howel, S. A., & Jobe, J. (2000).** The effect of biodiesel fuels on transient emissions from modern diesel engines, part I regulated emissions and performance. *SAE Technical paper 2000-01-1967* .
- Sharp, C. A., Howel, S. A., & Jobe, J. (2000).** The effect of biodiesel fuels on transient emissions from modern diesel engines, part II regulated emissions and performance. *SAE Technical paper 2000-01-1968.*
- Sheehan, J., Camobreco, V., Duffield, J., Graboski, M., & Shapouri, H. (1998).** *An Overview of Biodiesel and Petroleum Diesel Life Cycles"* , report NREL/TP-580-24772. Golden, Colorado - USA: National Renewable Energy Laboratory.
- Shu, Q., Gao, J., Liao, Y., Wang, D., & Wang, J. (2011).** Estimation of the sauter mean diameter for biodiesels by the mixture topological index. *Renewable Energy 36 - Elsevier Ltd.* , 482-487.
- Shumacher, L., Peterson, C. L., & Gerpen, J. V. (2001).** Engine oil analysis of diesel engines fueled with biodiesel blends. *Annual International Meeting ASAE.* Sacramento, California - USA: ASAE.
- Silva, C., Ross, M., & Farias, T. (2009).** Evaluation of energy consumption, emissions and cost of plug-in hybrid vehicles. *Energy Conservation and Management, 50* , 1635-1643.
- Silva, F. N., Prata, A. S., & Teixeira, J. R. (2003).** Technical feasibility assesment of oleic sunflower methyl ester utilisation in Diesel bus engines. *Energy Conversion and Management, 44* , 2857-2878.
- Sinha, S., & Agarwal, A. K. (2008 b).** Ricebran oil biodiesel's performance, emission and endurance test on a CIDI transport engine. *SAE Technical paper 2008-28-0066* , 450-461.
- Soltic, P., Edenhauer, D., Thurnheer, T., Schreiber, D., & Sankowski, A. (2009).** Experimental investigation of mineral diesel fuel, GTL fuel, RME and neat soybean and rapeseed oil combustion in a heavy-duty on road engine with exhaust gas aftertreatment. *Fuel, 88 - Elsevier Ltd.* , 1-8.

- Som, S., Longman, D., Ramírez, A., & Aggarwal, S. (2010).** A comparison of injector flow and spray characteristics of biodiesel with petrodiesel. *Fuel* 89 - Elsevier Ltd. , 4014–4024.
- Sorda, G., Banse, M., & Kemfert, C. (2010).** An overview of biofuel policies across the world. *Energy policy*, 38 , 6977-6988.
- Standardization, C. -E. (November de 2008).** EN 14214. *Automotive fuels - Fatty acid methyl esters (FAME) for diesel engines - Requirements and test methods* . Brussels: CEN.
- Stone, R. (1992).** *Introduction to Internal Combustion Engines*. London- UK: MacMillan Press Ltd.
- Strong, C., Erickson, C., & Shukla, D. (2004).** *Evaluation of Biodiesel Fuel: Literature Review*. 2701 Prospect Avenue, Helena, MT 59620-10010: Montana Department of Transportation - Western Transportation Institute - Montana State University.
- Sukkasi, S., Chollacoop, N., Ellis, W., Grimley, S., & Jai-In, S. (2010).** Challenges and considerations for planning toward sustainable biodiesel development in developing countries: Lessons from the Greater Mekong Subregion. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14 - Elsevier Ltd. , 3100–3107.
- Sun, J., Caton, J. A., & Jacobs, T. J. (2010).** Oxides of nitrogen emissions from biodiesel-fuelled diesel engines. *Progress in Energy and Combustion Science*, 36 - Elsevier Ltd. , 677-695.
- Suryanarayanan, S., Janakiraman, V. M., Sekar, J., Rao, G. L., & Sampath, S. (2006).** Determination of the proportion of blend of biodiesel with diesel for optimal engine performance and emission characteristics. *SAE Technical paper 2006-01-3534* .
- Sze, C., Whinihan, J. K., Olson, B. A., Schenk, C. R., & Sobotowski, R. A. (2007).** Impact of test cycle and biodiesel concentration on emissions. *SAE Technical paper 2007_01_4040* .
- Szybist, J. P., & Boehman, A. L. (2003).** Behavior of a diesel injection system with biodiesel fuel. *2003-01-1039 SAE Technical paper* .
- Szybist, J. P., Boehman, A. L., Haworth, D. C., & Koga, H. (2007).** Premixed ignition behavior of alternative diesel fuel-relevant compounds in a motored engine experiment. *Combustion and Flame*, 149 - Elsevier Ltd. , 112–128.
- Szybist, J. P., Boehman, A. L., Taylor, J. D., & McCormick, R. L. (2005).** Evaluation of formulation strategies to eliminate the biodiesel NOx effect. *Fuel Processing Technology*, 86 - Elsevier Ltd. , 1109– 1126.
- Szybist, J. P., Song, J., Alam, M., & Boehman, A. L. (2007).** Biodiesel combustion, emissions and emission control. *Fuel Processing Technology*, 88 , 679-691.
- Tat, M. (2003).** *Investigation of oxides of nitrogen emissions from biodiesel-fueled engines - phd thesis*. Iowa USA: Iowa State University.
- Terry, B., McCormick, R. L., & Natarajan, M. (2006).** Impact of biodiesel blends on fuel system component durability. *2006-01-3279 SAE Technical paper* .
- Tesfa, B., Mishra, R., F.Gu, & Powles., N. (2010).** Prediction models for density and viscosity of biodiesel and their effects on fuel supply system in CI engines. *Renewable Energy* 35 - Elsevier Ltd. , 2752-2760.
- Tsolakis, A., Megaritis, A., Wyszynski, M., & Theinnoi, K. (2007).** Engine performance and emissions of a diesel engine operating on diesel-RME (rapeseed methyl ester) blends with EGR (exhaust gas recirculation). *Energy*, 32 - Elsevier Ltd. , 2072–2080.
- Turns, S. R. (1996).** *An introduction to combustion - Concepts and applications*. Singapore: McGraw-Hill International Editions.
- Turrio-Baldassarri, L., Battistelli, C. L., Conti, L., Crebelli, R., Berardis, B. D., Iamiceli, A. L., Gambino, M., Iannaccone, S. (2004).** Emission comparison of urban bus engine fueled with diesel oil and 'biodiesel' blend. *Science of the Total Environment*, 327 - Elsevier Ltd. , 147-162.

- Turton, H. (2006).** Sustainable global automobile transport in the 21st century: An integrated scenario analysis. *Technological Forecasting & Social Change*, 73 - Elsevier Ltd. , 607–629.
- Tyson, K., & McCormick, R. (2006).** *Biodiesel handling and use guide - report NREL/TP-540-40555*. USA: NREL.
- Tzirakis, E., Karavalakis, G., Zannikos, F., & Stournas, S. (2007).** Impact of diesel/biodiesel blends on emissions from a diesel vehicle operated in real driving conditions. *SAE Technical paper 2007-01-0076* .
- Uherek, E., Halenka, T., Borken-Kleefeld, J., Balkanski, Y., Berntsen, T., Borrego, C., Gauss, M., Hoor, P., Juda-Rezler, K., Lelieveld, J., Melas, D., Rypdal, K., Schmid, S., (2010).** Transport impacts on atmosphere and climate: Land transport. *Atmospheric Environment*, 44 - Elsevier Ltd. , 4772-4816.
- Um, S., & Park, S. W. (2010).** Numerical Study on Combustion and Emission Characteristics of Homogeneous Charge Compression Ignition Engines Fueled with Biodiesel. *Energy Fuels*, 24 - American Chemical Society , 916 – 927.
- United Nations. (24 de April de 2002).** **Reglamento 49 - ECE.** *iform Provisions Concerning The Approval of Compression Ignition (CI) and Natural Gas (NG) engines and vehicles equiped with C.I.and NG Engines to the emissions of pollutants* .
- Usta, N. (2005).** An experimental study on performance and exhaust emissions of a diesel engine fuelled with tobacco seed oil methyl ester. *Energy Conversion and Management*, 46 - Elsevier Ltd. , 2373–2386.
- Vijayaraghavan, K., & Hemanathan, K. (2009).** Biodiesel Production from Freshwater Algae. *Energy Fuels*, 23 - ACS Publications , 5448-5453.
- Villatico, F., & Zuccari, F. (2008).** Efficiency comparison between FC and ice in real urban driving cycles. *International Journal of Hydrogen Energy*, 33 , 3235–3242.
- Wagner, L. E., Clark, S. J., & Schrock, M. D. (1984).** Effects of soybean oil esters on performance, lubricating oil and water of diesel engines. *SAE Technical paper 841385* , 1-16.
- Wang, Q., Huo, H., He, K., Yao, Z., & Zhang, Q. (2008).** Characterization of vehicle driving patterns and development of driving cycles in Chinese cities. *Transportation Research Part D*, 13 - Elsevier Ltd. , 289–297.
- Wang, W. G., Lyons, D. W., Clark, M. N., & Gautam, M. (2000).** Emissions from Nine Heavy Trucks Fueled by Diesel and Biodiesel Blend without Engine Modification. *Environmental Science and Technology*, 34 - American Chemical Society , 933-939.
- Wang, X.-G., Zheng, B., Huang, Z.-H., Zhang, N., Zhang, Y.-J., & Hu, E.-J. (2011).** Performance and Emissions of a Turbocharged, High-Pressure Common Rail Diesel Engine Operating on Biodiesel/Diesel Blends. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering 225* - SAGE Publications , 127 - 139.
- Wibulswas, P. (1999).** Combustion of blends between plant oils and diesel oil. *Renewable Energy*, 16 - Elsevier Science Ltd. , 1098-1101.
- Williams, A., McCormick, R. L., Hayes, R. R., Ireland, J., & Fang, H. L. (2006).** Effect of Biodiesel Blends on Diesel Particulate Filter Performance. *SAE Technical paper 2006-01-3280* .
- Wu, F., Wang, J., Chen, W., & Shuai, S. (2008).** Effects of different biodiesels and their blends with oxygenated additives on emissions from a diesel engine. *SAE Technical paper 2008-01-1812* .
- Xue, J., Grift, T. E., & Hansen, A. C. (2011).** Effect of biodiesel on engine performances and emissions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15 - Elsevier Ltd. , 1098-1116.
- Yamane, K., Kawasaki, K., Sone, K., Hara, T., & Prakoso, T. (2007).** Oxidation stability of biodiesel and its effects on diesel combustion and emission characteristics. *International Journal of Engine Research*, 8 - Professional Engineering Publishing , 307-319.

- Yamane, K., Ueta, A., & Shimamoto, Y. (2001).** Biodiesel fuel on injection, combustion and exhaust emission characteristics in a direct injection compression ignition engine. *International Journal of Engine Research 2, n4 - SAGE Publications* , 249-261.
- Yang, H.-H., Chien, S.-M., Lo, M.-Y., Lan, J. C.-W., Lu, W.-C., & Ku, Y.-Y. (2007).** Effects of biodiesel on emissions of regulated air pollutants and polycyclic aromatic hydrocarbons under engine durability testing. *Atmospheric Environment 41 - Elsevier Ltd.* , 7232–7240.
- Yanowitz, J., & McCormick, R. L. (2009).** Effect of biodiesel blends on North American heavy-duty diesel engine emissions. *Eur. J. Lipid Sci. Technol. 111* , 763–772.
- Yehliu, K., Boehman, A. L., & Armas, O. (2010).** Emissions from different alternative diesel fuels operating with single and split fuel injection. *Fuel, 89 - Elsevier Ltd.* , 423–437.
- Yuan, W., Hansen, A., & Zhang, Q. (2009).** Predicting the temperature dependent viscosity of biodiesel fuels. *Fuel 88 - Elsevier Ltd.* , 1120-1126.
- Zannis, T. C., Hountalas, D. T., & Papagiannakis, R. G. (2007).** Experimental study of diesel fuel effects on direct injection (DI) diesel engine performance and pollutant emissions. *Energy and Fuels - ACS publications* , 2642-2654.
- Zannis, T., Hountalas, D., & Kouremenos, D. (2004).** Experimental investigation to specify the effect of oxygenated additive content and type on diesel engine performance and emissions. *2004-01-0097 SAE Technical paper* .
- Zhang, X., Gao, G., Li, L., Wu, Z., Hu, Z., & Deng, J. (2008).** Characteristics of combustion and emission in a DI engine fuelled with biodiesel blends from soybean oil. *SAE Technical paper 2008-01-1832* .
- Zhang, Y., & Boehman, A. L. (2007).** Impact of Biodiesel on NO_x Emissions in a Common Rail Direct Injection Diesel Engine. *Energy & Fuels, 21 - American Chemical Society* , 2003 - 2012.
- Zhu, L., Cheung, C., Zhang, W., & Huang, Z. (2010).** Emissions characteristics of a diesel engine operating on biodiesel and biodiesel blended with ethanol and methanol. *Science of the Total Environment, 408 - Elsevier Ltd.* , 914–921.

Esta página foi intencionalmente deixada em branco.

ANEXO I

Revisão bibliográfica sobre emissões, consumo e desempenho

Esta página foi intencionalmente deixada em branco.

Referência	Motor, Combustível e Especificações de ensaios	Resumo
(Ali, Hanna e Leviticus 1995)	Motor Cummins DI, Turbo, 6 cilindros e Motor Detroit DI, Turbo, 6 cilindros, ambos 2 tempos BD soja – B0,B10, B20, B30, B50, B75 e B100.	Aumento da potência com B20 sem aumento do consumo de combustível. Nas situações em que se verifica redução da potência, esta é inferior ao menor conteúdo energético do combustível, manifestando um aumento da eficiência de combustão. As emissões de NOx aumentam com o aumento de BD no combustível para os regimes a rotações elevadas. Quando o motor opera a rotações baixas, as emissões de NOx apresentam uma tendência de aumento parabólico em função do teor de BD na mistura de combustível utilizada.
(Ali, Eskridge e Hanna 1995)	Motor Cummins DI, Turbo, 6 cilindros, 4 tempos. 100%, 75%, 50%, 10% e sem carga; rotações: 1100, 1200, 1400, 1600,1800, 1900. BD de soja, sebo e ainda com etanol, 12 misturas.	O melhor desempenho do motor verifica-se para misturas B20 com sebo. As emissões de CO, CO ₂ O ₂ e NOx não apresentam variações significativas. Verificando-se apenas uma diminuição nas emissões de HC. O valor mínimo de HC é observado para 80% gasóleo e 20% de bd de sebo ou bd de sebo e soja, ou ainda com a incorporação de etanol. O consumo específico (bsfc) aumenta com a introdução de BD. O aumento é da ordem de 2-2,5% por cada 10% de incorporação de BD.
(Schmidt e Gerpen 1996)	Motor John Deere TD, DI 4 cilindros. B50 (BD de soja). 1400rpm,100% carga.	A existência de Oxigénio no combustível permite diminuir a parte sólida na emissão de partículas, aumentando a emissão de NOx, diminuindo as emissões de CO, não sendo visíveis efeitos sobre o rendimento térmico e consumo específico (bsfc). Com a utilização de B50, verifica-se a diminuição da temperatura dos gases de escape em 5,5% e o aumento da presença de oxigénio nestes gases em 4%.
	Motor John Deere TD, DI 4 cilindros. Utilização de B20 e B50 com várias origens de BD (Soja, palma, cartamo e linhaça). 305N.m; 57,1kW	O aumento do grau de saturação dos esteres traduz-se na diminuição da parte solúvel das emissões de partículas. Na utilização de B50, as emissões de NOx aumentam entre 0 e 5% para todos os esteres. Para 2 tipos de B50 as emissões de NOx diminuíram em 2-3% quando comparadas com a utilização de gasóleo. Para todas as situações verificou-se uma diminuição de emissões de HC, quando se utilizou Biodiesel. A eficiência térmica para todos os B50 não se alterou relativamente ao gasóleo, embora o consumo específico tenha aumentado.

Referência	Motor, Combustível e Especificações de ensaios	Resumo
(McCormick, Ross e Graboski 1997)	<p>2 motores 6 cilindros DI, TC e intercooler, de controlo eletrónico.</p> <p>Um mais utilizado em autocarros e outro em veículos pesados mercadorias.</p> <p>Combustível obtido com misturas com etanol, octanol, ácido decanoico e metil-esteres de soja.</p>	<p>A utilização de BD de soja promove o aumento das emissões de NOx para os regimes a elevada carga e baixa rotação. Para os regimes a rotações mais elevadas as emissões de NOx não apresentam alterações com a utilização de gasóleo ou BD.</p> <p>As emissões de NOx são afetadas pela densidade do combustível. Quanto maior a densidade do combustível maiores os teores de NOx nos gases de escape.</p> <p>O BD apresenta um ponto de evaporação mais elevado que o gasóleo, tendo ainda maior viscosidade e tensão superficial. Estes fatores promovem uma atomização do combustível de pior qualidade traduzindo-se ainda por uma maior dificuldade na vaporização do combustível. Deste modo, o período e a quantidade de combustível que intervém na combustão de pré-mistura, quando se utiliza BD, é menor que quando se utiliza gasóleo, implicando inversamente um aumento do período e da quantidade de combustível na combustão difusiva.</p>
(Karonis, et al. 1998)	<p>Motor monocilíndrico.</p> <p>68 diferentes tipos de combustível obtidos de diversas misturas, apresentando nº cetano desde 42 a 58.</p>	<p>Nº de cetano do combustível é mais importante que a densidade</p> <p>O aumento do nº de cetano do combustível provoca diminuição das emissões de CO, NOx, HC e PM.</p> <p>O aumento da densidade do combustível provoca a diminuição das emissões de CO, NOx, HC e PM.</p> <p>Outros parâmetros relevantes são o de Temp.90% e Temp.100% na destilação.</p>
(Gomez, et al. 2000)	<p>Toyota Van, com motor 2,0 litros.</p> <p>BD de óleo vegetal usado. B0 e B100.</p> <p>Testes realizados em dinamómetro chassis.</p>	<p>A potência disponível diminui em 9% com a utilização de BD.</p> <p>As emissões de CO, CO₂ e de fumos diminuem 64%, 7,5% e 48% respetivamente.</p> <p>As emissões de NOx aumentam ligeiramente, apresentando um valor máximo de cerca de 20% de aumento face à utilização de gasóleo.</p>
(Wang, et al. 2000)	<p>9 Veículos pesados mercadorias.</p> <p>B35 de soja.</p> <p>Testes em estrada e em banco de chassis.</p>	<p>O consumo de combustível em volume por distância percorrida foi muito similar para os vários veículos quando abastecidos por B35 ou gasóleo, o mesmo acontecendo com o desempenho dos veículos.</p> <p>As emissões de NOx eram diferenciadas em função do ciclo imposto e do tipo de motor.</p> <p>A utilização de B35 permitiu diminuir as emissões de PM, CO e HC.</p>

Referência	Motor, Combustível e Especificações de ensaios	Resumo
(Sharp, Howel e Jobe 2000 a)	3 motores, Cummins N14, Cummins B5.9 e DDC séries 50. BD soja (B0, B20, B100) Ciclo FTP	<p>Uso de BD reduz emissões CO, HC, PM e aumenta emissões de NOx, o consumo e a eficácia dos catalisadores na redução de partículas.</p> <p>B100 promove a redução quase total de HC, redução em 40% de CO e o aumento em cerca de 12% nas emissões de NOx, sendo que com B20 este aumento é de 4%. A causa apresentada como mais provável para estas alterações prende-se com a existência de oxigénio no combustível.</p> <p>O consumo de B100 provoca a redução em cerca de 8% do binário disponível, com B20 esta redução passa a ser de 2%, estando associada à diminuição do conteúdo energético do biodiesel.</p> <p>Com B20 o consumo não se altera de forma significativa embora a utilização do motor Cummins B5.9 apresente um aumento do consumo de cerca de 6%.</p>
(Sharp, Howel e Jobe 2000 b)		A utilização de BD reduz as emissões de aldeídos e cetonas.
(Canakci e Gerpen 2001)	4 cylinder Turbo John Deere 4276T. BD de sebo, soja (B20 e B100). Ensaio banco motores	<p>A utilização de BD permite aumentar o consumo específico (bsfc) em 2,6% com B20 e em 37% com B100.</p> <p>Ao nível da eficiência térmica verifica-se que é muito similar para os vários combustíveis testados embora seja possível detetar um ligeiro aumento com BD.</p> <p>As emissões de CO, HC e partículas é reduzida com o consumo de BD, mas as emissões de NOx são aumentadas em 11% com a utilização de B100 de sebo e em 13% com a utilização de B100 de soja.</p>
(McCormick, Graboski, et al. 2001)	Motores veículos pesados. Bd de várias origens Ciclo FTP	<p>Não foram verificadas diferenças entre esteres metílicos e etílicos.</p> <p>Análise que correlaciona a densidade com o índice de cetano.</p> <p>A formação de NOx devida à utilização de BD não é controlada pelo fenómeno de Zeldovich (princípio de formação térmico), mas antes devido a fatores como a estrutura molecular.</p>

Referência	Motor, Combustível e Especificações de ensaios	Resumo
(Biluck Jr. e Bourbon 2002)	Frota de 44 autocarros. Ensaio em estrada. BD de várias origens (B20)	A análise do consumo e performance dos autocarros utilizando B20 e gasóleo não foi afetada pela utilização de diferentes tipos de combustível. Verificou-se uma diminuição significativa ao nível das emissões de fumo, embora a utilização de diferentes fontes de matéria-prima para produção de BD possa ter alguma influência. A diversidade na idade dos autocarros, com um valor médio de 12 anos, não aparentou afetar os resultados.
(Chen e Wu 2002)	Motor Yanmar monocilíndrico DI. Testes em banco de motores. BD de soja com metanol. (B100)	A emissão de partículas sub-micro (<0,1µm) reduz em 24 a 40% com a utilização de B100 a cargas baixas. Estas partículas sub-micro (<0,1µm) são emitidas em maior quantidade (1.7 a 2.3%) quando o motor opera a rotação elevada sem carga e abastecido com B100. Em termos gerais, a utilização de B100 permite reduzir a emissão do número de partículas sub-micro (<0,1µm) em 24 a 42%, a que corresponde uma redução em massa destas partículas de 40 a 49%.
(Durbin e Norbeck 2002)	7 Veículos tipo pick-up, com motores atmosféricos IDI. BD de soja e de sebo. (B20). Ciclo FTP.	Verifica-se que a utilização de B20 de soja permite uma diminuição nas emissões de HC em alguns dos veículos de teste, registando-se também aumentos de emissões de HC para outros veículos. As emissões de NOx são similares para os vários veículos testados com os diferentes combustíveis. A haver uma tendência ela é de algum modo de aumento com a utilização de B20, contudo as variações são muito ligeiras. O índice de cetano do combustível não pode ser avaliado aritmeticamente a partir da mistura de combustíveis.
(Lapuerta, Armas e Ballesteros 2002)	Motor Renault F8Q, Turbo Intercooler, IDI. 5 modos de operação em banco de motores de 2000 a 3200rpm e 11,2 a 105 Nm. BD de girassol e alcachofra (B25 e B100).	O aumento da percentagem de BD utilizado permite a diminuição de emissões de partículas. Sugere-se que este efeito será devido ao aumento do teor de Oxigénio no combustível que permite uma melhor oxidação dos HC nas zonas de queima ricas e à menor temperatura de evaporação final do combustível que garante a volatilização total do combustível. Verifica-se ainda que a utilização de BD não provoca um aumento das emissões de NOx, sendo inclusivamente verificada uma ligeira diminuição das emissões de NOx com a utilização de BD para regimes de operação a cargas elevadas. A utilização de esteres de origem vegetal no combustível conduz a dramáticas reduções no nº de partículas emitidas e da correspondente massa, com ligeiro aumento do seu diâmetro médio.

Referência	Motor, Combustível e Especificações de ensaios	Resumo
(McCormick, Alvarez, et al. 2002)	Motor 6 cilindros, Turbo DI intercooler. DDC series 60. Vários tipos de combustíveis (B20).	A estrutura molecular do combustível terá um efeito substancial nas emissões de NOx. Diminuindo o teor de aromáticos no combustível revela-se um êxito na diminuição das emissões de NOx. Para combustíveis com mesmo índice de cetano, mas com cerca uma diminuição de 31.9 para 25.8% de conteúdo em aromáticos permite atingir uma neutralidade ao nível das emissões de NOx. A evolução na tecnologia dos motores faz com que estes sejam cada vez menos sensíveis a diferentes índices de cetano.
(Szybist e Boehman 2003)	Motor YanmarL40 DI. Testes a 25% e 75% do binário máximo a 3600rpm. BD de soja (B0, B20, B40, B60, B80, B100).	O aumento do conteúdo em BD no combustível aumenta o avanço à injeção diminuindo ainda a duração da injeção. O avanço à injeção provoca um avanço na combustão de pré-mistura, aumentando a temperatura máxima na câmara de combustão, possibilitando que este efeito seja potenciador do aumento das emissões de NOx.
(Dorado, et al. 2003)	Motor Perkins DI. BD de azeite usado (B0 e B100). Testes em banco de motores com 8 passos com, 10, 50, 75 e 100% carga e ao <i>ralenti</i> , a 1330rpm e a 2390 rpm.	A eficiência de combustão é similar para os dois tipos de combustível. O consumo de combustível (bsfc) é variável em função do regime de operação do motor. Ao nível das emissões, verifica-se uma diminuição das emissões de CO (58,9%), de NO (37,5%) e de NO ₂ (81%, mas num dos casos verifica-se uma diminuição ligeira). As emissões de CO ₂ diminuem também em 8,6% embora numa das situações estudadas verifica-se um aumento de 7,4%.
(Alleman e McCormick 2003)	Artigo de revisão sobre a utilização de Fisher-Tropsch (F-T) em motores. Testes transientes utilizando um mapa de binário.	O combustível F-T apresenta um índice de cetano bastante elevado. A curva de destilação é muito similar à do gasóleo. Revela-se evidente a diminuição significativa das emissões de HC, CO, NOx e partículas, principalmente em motores de veículos pesados. Um dos fatores mais relevantes para a utilização deste combustível é a baixa viscosidade que impede uma boa lubricidade do sistema de injeção.

Referência	Motor, Combustível e Especificações de ensaios	Resumo
(Babu e Devaradjane 2003)	Artigo de revisão sobre a utilização de óleos vegetais.	<p>A utilização de óleos como combustível apresenta um grande inconveniente: a elevada viscosidade, 10 vezes superior à do gasóleo.</p> <p>A eficiência e desempenho dos motores quando abastecidos por óleos vegetais é aceitável, desde que em períodos curtos de utilização.</p> <p>Melhor mistura é constituída por 75% de gasóleo e 25% de óleo vegetal.</p> <p>A utilização de óleos vegetais permite aumentar a eficiência térmica, aumentando as emissões de NOx, diminuindo as emissões de CO, HC e partículas.</p>
(Nwafor 2004)	<p>Motor monocilíndrico IDI, atmosférico.</p> <p>BD de colza (B0, B25, B50, B75, B100).</p> <p>Teste com varias cargas a 3000rpm.</p>	<p>O consumo de combustível aumenta proporcionalmente com o aumento do conteúdo em BD no combustível, mas com B25 o consumo é muito similar.</p> <p>As emissões de CO quando o motor é abastecido com BD são semelhantes às obtidas quando o motor utiliza gasóleo. Para cargas elevadas as emissões de CO₂ são ligeiramente mais elevadas com BD.</p>
(Senda, et al. 2004)	<p>Veículo SUV, motor IDI 2,0 lts.</p> <p>Testes em estrada.</p> <p>BD de óleos veg. usados (B100).</p>	<p>A estrutura rodoviária, as condições de tráfego e as operações realizadas em diferentes modos de condução afetam o consumo de combustível, as emissões de NOx e de partículas.</p> <p>Em circuito urbano não se verificam diferenças ao nível do consumo de combustível, comparativamente entre utilizar gasóleo ou B100. Em autoestrada estas diferenças são significativas penalizando o consumo de B100.</p> <p>Nos processos de aceleração o consumo de combustível e as emissões de NOx são maiores quando o motor é abastecido com B100.</p>
(Frey e Kim 2004)	<p>Vários veículos tipo camião.</p> <p>Ensaio em dinamómetro de rolos.</p> <p>BD de soja (B100).</p>	<p>Verifica-se que os resultados obtidos necessitam de ser validados através do recurso a ensaios em estrada em condições reais. Neste trabalho realizou-se um estudo de uma frota de veículos, em que alguns desses veículos foram submetidos a ensaios em dinamómetro de rolos.</p> <p>Os resultados são muito influenciados pelo regime de operação do motor e pela atividade do veículo.</p> <p>Comparando os resultados em banco de rolos e os resultados em estrada, verifica-se que as emissões de NOx em estrada são mais reduzidas que as emitidas nos ensaios realizados no dinamómetro.</p>

Referência	Motor, Combustível e Especificações de ensaios	Resumo
(Raheman e Phadatare 2004)	<p>Motor monocilíndrico injeção direta com 7,5kW às 3000rpm.</p> <p>Ensaio em banco de motores a 10%, 25%, 50%, 75%, 85% e 100% de carga a 2525rpm.</p> <p>BD de <i>karanja</i> (B0, B20, B40, B60, B80 e B100).</p>	<p>Verificou-se uma redução de 94 a 73% relativamente à utilização de gasóleo, respetivamente com a utilização de B20 a B100.</p> <p>As emissões de fumos relativas à utilização de BD registam reduções de 20 a 80% respetivamente para B100 a B20.</p> <p>A quantidade de NOx emitido pelos combustíveis com biodiesel (B20 a B100) variam entre 4 e 12ppm, comparadas com emissões entre 12 e 13ppm para gasóleo. Em termos médios regista-se uma redução da ordem de 26% com a utilização de combustíveis com biodiesel.</p> <p>O consumo específico (bsfc) associado à utilização de B20 e B40 é 0,8 a 7,4% inferior ao registado pela utilização de B0, contudo considerando a utilização de B60 a B100, o consumo específico apresenta já um aumento de 11 a 48%.</p>
(Turrio-Baldassarri, et al. 2004)	<p>Motor com Turbo EuroII IVECO de veículo pesado.</p> <p>Ensaio em banco de motores – ciclo ECE 13.</p> <p>BD de colza (B20).</p>	<p>Análise da emissão de partículas, nomeadamente do tamanho e dos elementos constituintes.</p> <p>As partículas com diâmetro médio inferior a 2,5µm depositam-se no trato respiratório causando problemas de saúde a este nível. O diâmetro médio das partículas obtidas a partir de gasóleo ou B20 é entre 0.06 e 0.3 µm, representando uma abundância de 66 a 89% para gasóleo e 77 a 89% para B20.</p> <p>Não se verificam diferenças significativas ao nível das emissões de HC, CO, NOx, partículas e SOF entre os dois combustíveis. Foi observado um ligeiro aumento de consumo com B20 (3%).</p> <p>Ao nível das partículas, a sua constituição é semelhante independentemente da proveniência ser do gasóleo ou do B20. Os elementos mais significativos são em ordem decrescente, elementos carbonosos, fração de compostos voláteis (SOF), sulfatos e traços de elementos metálicos.</p>
(Carraretto, et al. 2004)	<p>Motores de 6 cilindros DI atmosféricos usados em autocarros.</p> <p>Testes em banco de motores e em estrada, utilizando os mesmos motores.</p> <p>BD sem id de origem (B0, B20, B30, B50, B70, B80, B100).</p>	<p>Verificou-se uma diminuição do desempenho do motor com a utilização de BD.</p> <p>O consumo de combustível (bsfc) e as emissões de NOx registaram um aumento devido ao consumo de BD.</p> <p>Otimizando o processo de injeção para o abastecimento e combustão de BD verificou-se que o desempenho do motor é incrementado e que os níveis de emissões diminuem.</p>

Referência	Motor, Combustível e Especificações de ensaios	Resumo
(Desantes, et al. 2004)	<p>Motor monocilíndrico 1,83dm³ <i>common rail</i>.</p> <p>Teste em cargas elevadas em banco motores.</p> <p>Utilização apenas de gasóleo.</p>	<p>Aumento da pressão de injeção diminui o fumo e o consumo mas aumenta as emissões de NOx.</p> <p>Aumento da pressão do turbo (admissão) diminui as emissões de NOx tendo efeitos pouco notórios nas emissões de fumo.</p> <p>O caudal de combustível (\dot{m}_f) é relacionado com a pressão de injeção (ip) do seguinte modo: ($\dot{m}_f \cong ip^{0,5}$).</p> <p>A relação A/F: ($\frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_f}$) é relacionada com a massa volúmica do combustível(ρ) e com a pressão de injeção (ip) do seguinte modo: $\frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_f} \propto \rho^{-0,25} ip^{0,25}$</p>
(Strong, Erickson e Shukla 2004)	<p>Relatório de revisão sobre a utilização de B20 em aplicações em estrada.</p>	<p>O consumo não apresenta diferenças relevantes quando os veículos são abastecidos com gasóleo ou com B20.</p> <p>As emissões em regra diminuem mas as de NOx aumentam ligeiramente.</p> <p>As emissões de NOx são constituídas essencialmente por NO, N₂O, NO₃⁻ e NO₂. Estes compostos são causadores de <i>smog</i>, chuvas ácidas, doenças respiratórias (enfizemas e bronquites), aquecimento global e redução da camada de ozono.</p> <p>As partículas emitidas provocam a formação de smog e doenças respiratórias.</p> <p>Os hidrocarbonetos (HC), que podem ser constituídos por moléculas com um átomo de carbono até moléculas com 22 átomos de carbonos ligadas a átomos de hidrogénio, têm a sua maior perigosidade nos compostos policíclicos aromáticos (PAH). Estes são responsáveis pela diminuição da camada de ozono, apresentado ainda potencial carcinogénico.</p> <p>As emissões de monóxido de carbono (CO) são bastante perigosas pelo facto deste gás ser mortal quando em concentrações entre 150 a 200ppm. Causam desorientação, inconsciência e a morte. Para níveis acima de 70ppm mas que não atinjam os 150ppm podem ser causadores de fadiga, náuseas e cefaleias.</p>
(Basavaraja, Reddy e Swamy 2005)	<p>Motor monocilíndrico atmosférico, DI.</p> <p>Testes em banco motores em carga máxima.</p> <p>BD de <i>pongamia</i> (B10, B20, B30, B40)</p>	<p>Avaliado o efeito da variação da pressão de injeção de 140bar a 240bar.</p> <p>Em termos comparativos, a utilização de B20 permite diminuir o consumo específico de combustível (bsfc).</p> <p>Também com B20 atinge-se o valor máximo da eficiência térmica (bte).</p>

Referência	Motor, Combustível e Especificações de ensaios	Resumo
(Malhotra, et al. 2005)	<p>Veículo testado em dinamómetro de rolos.</p> <p>Utilização de ciclo de ensaios indiano.</p> <p>BD de <i>pongamia</i> e jatrofa obtido com metanol e etanol (B20).</p>	<p>A utilização de B20 permite diminuir as emissões de CO e as emissões de partículas.</p> <p>A utilização de B20 permite ainda diminuir a concentração de hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (PAH) nos compostos orgânicos voláteis (SOF) que também diminuem com a utilização deste combustível.</p> <p>Verificam-se diferenças nas propriedades do BD quando obtido a partir de metanol ou a partir de etanol.</p>
(McCormick, Tennant, et al. 2005)	<p>2 Motores veículos pesados com EGR, Cummins ISB e DDC series 60.</p> <p>Ciclo de ensaios transiente US para motores de veículos pesados.</p> <p>BD de soja, canola e de resíduos de gordura. (B0, B10, B20, B50 e aditivos melhoradores do índice de cetano)</p>	<p>Análise dos efeitos do controlo eletrónico quando se utiliza BD. O controlo eletrónico permite diminuir as emissões de partículas para ambos os motores devido às diferenças do sistema de injeção.</p> <p>O efeito do BD nas emissões é muito sensível às propriedades do gasóleo base.</p> <p>Existe uma quase independência das emissões de partículas e NOx relativamente os tipo de óleo base do BD, sendo apenas notória uma ligeira variação nas emissões de NOx quando se utiliza B100.</p> <p>A emissão de NOx depende do nº de cetano, embora esta dependência não seja notada para motores mais recentes. Para motores com injetor bomba as diferenças entre o uso de BD e gasóleo ao nível das emissões de NOx são mais notórias do que para motores <i>common-rail</i>. Este efeito deve-se ao facto de o módulo de elasticidade ser mais relevante nos sistemas de injeção mais antigos.</p> <p>Em média, a utilização de B20 provoca um aumento de NOx em 3% e uma diminuição de partículas em 25%.</p> <p>O tipo de matéria-prima do BD e a humidade do ar afetam os resultados obtidos. Em misturas de combustível B20 não se verifica um efeito significativo sobre as emissões de NOx devido ao grau de saturação do BD.</p>
(Çetinkaya, et al. 2005)	<p>Renault Megane 1900 <i>common-rail</i>, 75kW.</p> <p>Testes em banco de rolos e em Estrada, 7500km em circuito urbano e extra-urbano.</p> <p>BD de óleos vegetais usados (B20)</p>	<p>Observa-se que nos testes em banco a utilização de B20 traduz-se pela diminuição de 3-5% do binário e potência do motor.</p> <p>Em estrada o desempenho do motor com gasóleo e com B20 é muito similar.</p> <p>Os consumos obtidos com os dois tipos de combustível são também muito semelhantes.</p> <p>A razão apontada para o facto de o consumo ser semelhante prende-se com a compensação do menor conteúdo energético do B20 através do fornecimento de oxigénio no combustível.</p>

Referência	Motor, Combustível e Especificações de ensaios	Resumo
(M. Lapuerta, O. Armas, et al. 2005)	<p>Motor Renault F8Q IDI.</p> <p>Testes em banco de motores, com 5 modos distintos de operação.</p> <p>BD de alcachofra e girassol (B0, B25 e B100).</p>	<p>Energia do BD expressa em litro é similar à energia existente no gasóleo, devido ao fator da maior densidade do BD.</p> <p>A utilização de BD implica um aumento da pressão de injeção e conseqüentemente um aumento da temperatura de combustão.</p> <p>Devido ao aumento da disponibilidade de Oxigénio a emissão de partículas diminui com BD.</p> <p>A emissão de HC e fumo diminui com BD devido à menor temperatura final de ebulição do BD.</p> <p>As emissões de NOx com BD não aumentam, apresentando ainda um ligeiro decréscimo para cargas mais elevadas.</p>
(Puhan, et al. 2005)	<p>Motor monocilíndrico, atmosférico 553cm³ DI.</p> <p>Testes em banco de motores a 1500rpm com diversas cargas.</p> <p>BD de "mahua oil" (B100).</p>	<p>Eficiência térmica (bte) é similar para os dois combustíveis (26.42% para BD e 26.36% para gasóleo).</p> <p>A temperatura dos gases de escape é superior para o BD, comparativamente ao gasóleo.</p> <p>As emissões de NOx com BD diminuem em 12%, enquanto as emissões de CO, HC e fumo diminuem 58%, 63% e 70% respetivamente.</p> <p>O consumo de combustível (bsfc) com BD é maior do que com gasóleo, embora seja possível observar que o consumo energético é igual, o que concorda com a semelhança nos valores da eficiência térmica.</p>
(Ramadhas, Muraleedharan e Jayaraj 2005)	<p>Motor monocilíndrico atmosférico.</p> <p>Testes em banco motores com várias cargas a 1500rpm.</p> <p>BD de óleo da semente da árvore-da-borracha (B0, B10, B20, B50, B75, B100).</p>	<p>Para misturas com menores conteúdos em BD, a eficiência térmica aumenta ligeiramente comparativamente ao uso de gasóleo. O consumo de combustível e o nível de emissões são reduzidos.</p> <p>A utilização de B10 permite a obtenção de um valor máximo de eficiência térmica de 28%, 3% acima do valor obtido com gasóleo.</p> <p>O aumento da incorporação de BD no gasóleo provoca um aumento da temperatura de exaustão dos gases de escape.</p> <p>Este BD apresenta um índice de cetano relativamente baixo (43) comparativamente a BD com outras origens, sendo também ligeiramente mais viscoso.</p>

Referência	Motor, Combustível e Especificações de ensaios	Resumo
(Szybist, Boehman e Taylor, et al. 2005)	<p>Motor monocilíndrico DI injeção mecânica.</p> <p>Testes em banco motores com 75% carga e 3600rpm.</p> <p>BD de soja e oleato de metilo (B20 s, B10s+10om, B20 om)</p>	<p>A utilização do B20 de soja (B20s) traduz-se pelo aumento em cerca de 3% das emissões de NOx.</p> <p>É possível obter emissões de NOx em níveis similares aos do gasóleo diminuindo o número de injeção do BD.</p> <p>As emissões de NOx serão insensíveis aos valores máximos de temperatura e pressão no cilindro, não estando associadas à taxa de libertação de calor (<i>heat release rate</i>). Contudo, este tipo de emissões é sensível ao instante em que estes pontos máximos ocorrem.</p>
(Usta 2005)	<p>Motor 4 cilindros turbo IDI.</p> <p>Testes em banco motores a cargas parciais entre as 1500 e as 3000rpm.</p> <p>BD de sementes de tabaco (B0, B10, B17,5 e B25).</p>	<p>A utilização de BD permite diminuir as emissões de CO e SO₂, aumentando as emissões de NOx. À carga máxima foi detetado um aumento das emissões de NOx de cerca de 5% devidos à maior temperatura na câmara de combustão e à existência de Oxigénio no combustível.</p> <p>É possível verificar que para cargas máxima, a utilização de BD permite melhorar a potência e o binário disponível no motor, devido à maior densidade e viscosidade do BD.</p> <p>Para todos os regimes de operação do motor, observa-se que a temperatura dos gases de escape diminui com a utilização de BD.</p> <p>Com B17,5 a eficiência térmica é melhor do que com gasóleo para carga máxima, mas menor para situações de cargas menores.</p> <p>A carga parcial verifica-se uma diminuição da potência, binário e eficiência térmica, sendo possível responsabilizar o efeito dominante da combustão de pré-mistura pobre quando se utiliza BD nestas circunstâncias.</p>
(Labeckas e Slavinskas 2006)	<p>Motor 4 cilindros atmosférico, DI.</p> <p>Testes em banco motores com carga crescente para as rotações de 1400 a 2200rpm.</p> <p>BD de colza (B0, B5, B10, B20, B35)</p>	<p>O aumento da percentagem de oxigénio presente com combustível provocado pelo aumento do conteúdo em BD implica um aumento nas emissões de NOx. Também o aumento da rotação provoca um aumento nestas emissões.</p> <p>As misturas B5 e B35 apresentam o mesmo consumo (bsfc) que B0. Com B10 e B20 verifica-se uma diminuição do consumo (bsfc) em 3.2 e 1.7% respetivamente. Neste caso a justificação prende-se com a existência do oxigénio que permite uma melhor combustão principalmente a baixa rotação.</p> <p>Com o aumento da rotação a importância do teor em oxigénio no combustível vai perdendo influência.</p> <p>A eficiência térmica aumenta até B10 e depois vai diminuindo com o aumento do teor de BD no combustível.</p>

Referência	Motor, Combustível e Especificações de ensaios	Resumo
(Lin e Lin 2006)	<p>Motor 4 cilindros atmosférico DI 3856cm³.</p> <p>Ensaio em banco motores com binário de 10kgf e rotação a variar entre 850 e 2000rpm.</p> <p>BD de várias fontes (B100).</p>	<p>O consumo específico (bsfc) aumenta quando se utiliza B100.</p> <p>O aumento de oxigénio disponível no combustível implica um aumento das emissões de NOx.</p> <p>O aumento do tamanho (peso) molecular e do grau de saturação do BD traduz-se por uma diminuição das emissões de NOx.</p> <p>A utilização de um processo de peroxidação do BD após a transesterificação permite a melhoria dos níveis das emissões embora implique um aumento do consumo.</p>
(Li, et al. 2006)	<p>Análise das diferenças do spray, da combustão e da injeção para pressão atmosférica</p>	<p>O <i>spray</i> de BD apresenta metade do ângulo do apresentado com gasóleo.</p> <p>A penetração do jacto de BD é maior do que com gasóleo.</p> <p>Atraso na ignição é menor com BD do que com gasóleo.</p> <p>As emissões de NOx e HC são menores quando se utiliza BD do que com gasóleo devido à menor temperatura atingida na combustão com BD.</p>
(Nabi, Akter e Shahadat 2006)	<p>Motor 4 cilindros atmosférico, DI.</p> <p>Testes em banco de motores, com e sem EGR.</p> <p>BD de nim (B0, B5, B10, B15 e B100)</p>	<p>Com EGR não se verificam diferenças ao nível das emissões de NOx para os diferentes tipos de combustível.</p> <p>A eficiência térmica de B15 é maior que a eficiência térmica do gasóleo.</p> <p>Com o aumento do teor em BD, sem EGR, aumentam as emissões de NOx, diminuindo as emissões de CO, HC e fumo. Este efeito nas emissões é apresentado como originado na existência de oxigénio no combustível.</p>
(Armas, Hernández e Cárdenas 2006)	<p>Motor 4 cilindros, turbo DI.</p> <p>Testes em regime transiente realizados em banco de motores.</p> <p>BD de óleos vegetais novos e usados (B0, B30, B70, B100).</p>	<p>A utilização de BD como combustível permite diminuir as emissões de fumo. De facto, a existência de oxigénio no combustível com BD e a ausência de compostos aromáticos e de enxofre, quando comparado com o gasóleo, permite uma melhor relação ar/combustível local, durante o processo de combustão, reduzindo os níveis de emissões de fumo.</p> <p>Nos motores com turbo, a forma como se estabelece a mistura ar/combustível em função da resposta do turbo e do processo de injeção provoca alterações na resposta transiente do motor.</p> <p>Estes efeitos estão associados fundamentalmente à viscosidade do combustível, à relação ar/combustível definida e à quantidade de Oxigénio do combustível.</p>

Referência	Motor, Combustível e Especificações de ensaios	Resumo
(Suryanarayanan, et al. 2006)	<p>Estudo numérico com <i>Neural Networks</i> para BD de girassol utilizando os valores obtidos a partir de testes num motor em regimes estacionários utilizando um banco de motores.</p> <p>BD de girassol (B0, B20, B40, B60, B80, B100).</p>	<p>Análise visando a variação do consumo específico (sfc).</p> <p>O melhor valor de consumo específico foi determinado para a mistura contendo 15% de biodiesel (B15).</p> <p>As emissões de NOx têm um mínimo para B5 e B65 e as emissões de HC têm um valor mínimo para a mistura B80.</p>
(Corrêa e Arbilla 2006)	<p>Motor 6 cilindros de veículo pesado DI, típico de autocarro.</p> <p>Testes em banco motores a 1500 rpm.</p> <p>BD de óleo de rícino (B2, B5 e B20).</p>	<p>As emissões de um motor de ignição por compressão contêm centenas de compostos orgânicos e inorgânicos sob a forma de partículas sólidas e sob a fase gasosa.</p> <p>Estes elementos são constituídos por moléculas carcinogénicas como os aldeídos, hidrocarbonetos mono-aromáticos (MAH) e hidrocarbonetos poli-aromáticos (PAH).</p> <p>A utilização de BD permite reduzir a emissão dos PAH e MAH em respetivamente 2,7% e 4.2% (B2), 6.3% e 8.3% (B5) e 17.2% e 21.1% (B20).</p>
(Dwivedi, Agarwal e Sharma 2006)	<p>Motor 4 cilindros DI.</p> <p>Testes em banco motores a 1800rpm a várias cargas.</p> <p>BD de farelo de arroz (B20 e B100).</p>	<p>Com a utilização de B20 em substituição do gasóleo é possível diminuir as emissões de partículas e o conteúdo em metais nos gases de escape. Este efeito sobre a emissão de elementos metálicos advém da melhor capacidade lubrificante do BD e do menor conteúdo em metais no combustível.</p> <p>A utilização de BD acarreta um aumento das emissões de compostos orgânicos (SOF), contudo, atendendo ao carácter biodegradável do BD a libertação destes compostos não é tão prejudicial.</p> <p>O consumo de BD permite reduzir a toxicidade dos gases de escape.</p>
(Fernando, Hall e Jha 2006)	<p>Análise sobre as causas de formação do NOx com BD.</p>	<p>A reatividade do N₂ é reduzida. Esta molécula apresenta uma ligação tripla entre os átomos de azoto que necessita de 941kJ/kmol de energia para ser quebrada. Os elementos mais comuns do NOx são o NO₂ e o NO. Existem 3 grandes modos de formação do NOx: a térmica (mecanismo de Zeldovich), a imediata (associada à elevada quantidade de radicais no combustível que podem reagir com o N₂ e potenciar a formação de NOx) e a de NOx do combustível (devida à existência de átomos de azoto no combustível). Os métodos mais utilizados para reduzir emissões provenientes da utilização de BD são a utilização de EGR, a emulsão de água que permite controlar a formação térmica e o retardar da injeção de modo a que a T_{máx} e a p_{máx} ocorram já após o ponto morto superior.</p>

Referência	Motor, Combustível e Especificações de ensaios	Resumo
(Jeong, Oh e Park 2006)	<p>Motor monocilíndrico DI.</p> <p>Testes em banco motores com várias cargas (0, 25, 50, 75, 90 e 100%), a 1000 e a 2000rpm.</p> <p>BD de colza (B20 e B100).</p>	<p>A utilização de BD traduz-se num aumento das emissões de CO, CO₂ e NOx.</p> <p>O consumo de combustível aumenta com o aumento da quantidade de BD incorporada no gasóleo.</p> <p>Ao nível da emissão de fumo, só é visível alguma mudança devida à utilização de BD para cargas superiores a 75%.</p>
(Knothe, Sharp e Ryan 2006)	<p>Motor 6 cilindros de veículo pesado DI com turbo, EGR e controlo eletrónico.</p> <p>Banco de ensaios com ciclo transiente para veículos pesados (HDDTC).</p> <p>BD comercial.</p>	<p>A emissão de partículas com consumo de BD é reduzida em 77% relativamente à situação em que o motor é abastecido com gasóleo.</p> <p>Verifica-se um aumento ligeiro de NOx com a utilização de BD. Constata-se que a emissão de NOx aumenta com o grau de insaturação das moléculas de combustível.</p>
(Proc, et al. 2006)	<p>9 autocarros em ensaios em estrada (5 com B20 e 4 com B0); circulação 2 anos na mesma rota.</p> <p>Ensaio em dinamómetro de rolos (CHSVC cycle).</p>	<p>O consumo dos veículos em dinamómetro aumenta 2% quando abastecidos com B20, contudo os resultados obtidos em estrada traduzem uma igualdade no consumo entre os dois tipos de combustível.</p> <p>A utilização de B20 permitiu uma redução nas emissões de HC, CO e NOx.</p> <p>Ao nível da manutenção, não ocorreram diferenças significativas. Verificou-se que o nº de paragens por avaria foi ligeiramente menor no grupo de veículos abastecidos com B20, embora estes tenham revelado problemas com a durabilidade dos filtros de combustível.</p>
(Williams, et al. 2006)	<p>Motor 6 cilindros turbo <i>common-rail</i> com EGR.</p> <p>Testes em banco motores para avaliar consumo, emissões e funcionamento filtro de partículas.</p> <p>BD de soja (B0, B20 e B100).</p>	<p>A utilização de BD permite diminuir a temperatura de regeneração (45°C com B20 e 112°C com B100).</p> <p>A taxa de regeneração é melhorada com a utilização de BD.</p> <p>O consumo de combustível é aumentado em 3% quando se utiliza B20.</p> <p>A utilização de filtro de partículas implica o aumento de cerca de 1% no consumo de combustível independentemente do combustível utilizado.</p>

Referência	Motor, Combustível e Especificações de ensaios	Resumo
(Rakopoulos, Antonopoulos, et al. 2006)	<p>Motor Ricardo Cussons DI atmosférico.</p> <p>Testes em banco motores a 2000rpm e às cargas 38% e 75%.</p> <p>BD de várias origens: algodão, soja e girassol (B10 e B20).</p>	<p>Para todas as misturas de combustível contendo BD verificou-se uma diminuição das emissões de NOx e CO, sendo maior para B20 do que para B10. Ao nível das emissões de HC não se registaram variações significativas.</p> <p>Para a situação de carga elevada (75%) verificou-se um aumento do consumo (sfc) com a utilização de B10 e B20. Para o regime de operação a carga média verificou-se uma diminuição do consumo quando o motor foi abastecido com B10.</p> <p>Ao nível do desempenho e da eficiência térmica os valores são semelhantes para os combustíveis avaliados.</p>
(Ramadhas, Jayaraj e Muraleedharan 2006)	<p>Motor monocilíndrico, atmosférico DI.</p> <p>Estudo numérico.</p> <p>BD de semente da árvore da borracha (B0, B20, B100).</p>	<p>A temperatura e pressão máxima na câmara de combustão aumentam com a utilização de BD. Tal é devido à existência de Oxigénio no combustível o que provoca uma combustão mais completa, aumentando a emissão de CO₂.</p> <p>O rendimento térmico diminui com aumento da relação ar/combustível, o que implica que as misturas mais pobres apresentem temperaturas menores. Associado ao menor conteúdo energético do BD faz com que a eficiência térmica quando se utiliza BD seja menor.</p>
(Hribernik e Kegl 2007)	<p>2 motores DI, sendo um deles atmosférico e o outro com turbo.</p> <p>Testes em carga máxima e 70% carga, a várias rotações.</p> <p>BD comercial (B0 e B100).</p>	<p>Influência do BD na combustão e emissões num motor não podem ser generalizadas. São parâmetros específicos de cada motor. No motor com turbo existe uma diferença repartida entre os aspetos físicos e químicos no processo de combustão com diferentes combustíveis, enquanto no motor atmosférico existe uma predominância dos aspetos físicos.</p> <p>Nos testes em carga máxima ocorre uma diminuição de 5% na potência e binário em ambos os motores, correspondendo um aumento de consumo de 8% sem alteração da eficiência térmica.</p> <p>A utilização de BD no motor turbo promove um atraso na inflamação, registando-se uma diminuição da intensidade de combustão de pré-mistura em 40, aumentando a intensidade de combustão de difusão e diminuindo deste modo a pressão máxima de combustão.</p> <p>Ao nível das emissões de NOx, verifica-se que estas aumentam nas várias condições ensaiadas com a utilização de BD no motor atmosférico, contudo no motor com turbo ocorre também um aumento das emissões de NOx nas condições de carga parcial, mas verifica-se uma diminuição quando o motor opera à carga máxima.</p> <p>Para ambos os motores quando abastecidos com BD, regista-se uma diminuição das emissões de CO, HC e fumo, independentemente das condições de operação.</p>

Referência	Motor, Combustível e Especificações de ensaios	Resumo
(Ban-Weiss, et al. 2007)	Estudo numérico considerando os mecanismos de formação de NOx quando se utiliza BD.	<p>A formação de NOx é predominantemente proveniente do mecanismo térmico (Zeldovich).</p> <p>A utilização de BD motiva um aumento da temperatura adiabática de chama. O aumento da formação de NOx deriva do nº de moléculas com ligações duplas. A existência de moléculas de combustível insaturadas normalmente promove aumento da temperatura adiabática de chama, provocando um aumento das emissões de NOx.</p> <p>Por outro lado, com a utilização de BD, ocorre uma diminuição da formação de fumo, o que atenua a capacidade de transferência de calor na combustão pela redução da capacidade radiativa desses fumos, traduzindo-se num aumento da temperatura da combustão e aumentando a formação de NOx.</p>
(Kegl 2007)	<p>Motor de autocarro, 6 cilindros em linha, DI, MAN D 2566 MUM.</p> <p>Testes em banco de motores modo ESC 13 etapas.</p> <p>BD comercial (B2, B25, B50, B75 e B100).</p>	<p>Estudo contempla ensaios com e sem ajustes do motor quando utiliza BD.</p> <p>Verifica-se uma diferença ao nível da densidade e da velocidade do som para cada uma das diferentes misturas de gasóleo com BD.</p> <p>Torna-se evidente que a influência do combustível sobre as características do motor depende significativamente da carga e da rotação deste.</p> <p>No motor sem modificações ocorre uma diminuição de fumo e de HC com a utilização de BD. Para cargas elevadas também se verifica uma redução da temperatura dos gases de escape e das emissões de CO. A eficiência térmica não é afetada provocando um aumento do consumo de combustível, havendo ainda um aumento da emissão de NOx.</p> <p>Os avanços à ignição ótimos para cada mistura são 19º; 20º; 21º;22º; e 23º para B100; B75; B50; B25; e B2 respetivamente.</p> <p>Otimizando o ponto de injeção o aumento do conteúdo de BD no combustível provoca uma diminuição das emissões de NOx, CO, HC e fumo, registando-se variações muito ligeiras no consumo (sfc) e no desempenho do motor.</p> <p>Em termos mais específicos, com a utilização de misturas de combustível com maiores teores em BD verifica-se que a emissão de CO diminui, embora aumente quando motor opera a 25% carga, diminuindo com o aumento da rotação. As emissões de HC diminuem para B50, mas aumentam ligeiramente para B75 e B100. As emissões de NOx diminuem para todas as misturas exceto para B25 que provoca um ligeiro aumento.</p>

Referência	Motor, Combustível e Especificações de ensaios	Resumo
(Tzirakis, et al. 2007)	<p>Veículo com motor <i>common-rail</i> TDI euroIV.</p> <p>Testes em estrada com 3km de percurso e velocidade sempre abaixo de 40km/h</p> <p>BD de óleos vegetais usado (B0, B5, B20, B50).</p>	<p>O consumo de combustível aumentou com a introdução de biodiesel.</p> <p>A utilização de EGR reduziu a temperatura de gases de escape.</p> <p>Ao nível das emissões, a utilização de biodiesel permitiu diminuir as emissões de NOx, CO e de fumo.</p>
(Leahey, et al. 2007)	<p>Motor monocilíndrico IDI</p> <p>Testes em banco de ensaios de motores a 900rpm.</p> <p>Biodiesel de óleo de canola (B20, B100) e outras misturas com etanol.</p>	<p>A utilização de BD permite aumentar a eficiência térmica em 3%, mas o consumo de combustível é também ligeiramente aumentado (5 a 20%), relativamente à utilização de gasóleo.</p> <p>As emissões de NOx não sofrem alterações e verificam-se ligeiras diminuições nas emissões de fumo.</p>
(Sze, et al. 2007)	<p>Motor Cummins ISB 2006 com EGR. 6 cilindros, 5,9 lts, <i>common-rail</i> Turbo</p> <p>Testes em banco motores com 7 ciclos transientes com várias cargas.</p> <p>BD de soja (B0, B5, B10, B20, B50).</p>	<p>Com o aumento do conteúdo de BD no combustível diminui a temperatura dos gases de escape.</p> <p>Existe uma boa correlação nas emissões de NOx com o aumento do consumo de combustível bem como com a potência média do ciclo imposto. Contudo, exceto para os ciclos com cargas mais ligeiras, as emissões de NOx apresentam variações estatisticamente significativas. As emissões de NOx em termos médios aumentam 0.9 a 6.6% com a utilização de B20, aumentando entre 2.2 e 17.2% utilizando B50.</p> <p>O aumento da carga do motor implica um aumento linear das emissões de NOx. As emissões de CO e partículas são reduzidas com a utilização de BD. A utilização de BD afeta a relação ar/combustível e a EGR.</p>
(Savvidis, et al. 2007)	<p>Ford Escort 4 cilindros 1600cm3 IDI.</p> <p>Testes em banco de rolos a carga máxima com 2ª, 3ª e 4ª velocidades em 5000km.</p> <p>BD de sementes de algodão (B0, B10, B20, B30, B40, B50 e B100).</p>	<p>A utilização de biodiesel permite a diminuição das emissões de fumo e de CO, promovendo o aumento das emissões de NOx e HC.</p> <p>Quando a rotação do motor e a carga são elevadas, as emissões de NOx atingem os valores mais elevados devido à existência de maiores temperaturas na câmara de combustão.</p>

Referência	Motor, Combustível e Especificações de ensaios	Resumo
(Mazzoleni, et al. 2007)	<p>200 autocarros de passageiros (escola).</p> <p>Testes com circulação real e testes em banco de rolos.</p> <p>BD não cumpre especificações (B0 (jan04) e B20(Mar04)).</p>	<p>Estudos sobre utilização de BD em veículos com base em condições reais de circulação é praticamente inexistente e os que existem são muito limitados. Objetivo é avaliar as vantagens neste tipo de estudos.</p> <p>Os níveis de emissões de partículas são incrementados com a utilização de B20 face a B0.</p> <p>Nos testes a frio, ocorre um aumento das emissões de CO e HC quando se utiliza B20.</p>
(Hess, Haas e Foglia 2007)	<p>Motor monocilíndrico atmosférico DI com 418cm³.</p> <p>Testes em banco motores a 5kW e 3200rpm.</p> <p>BD de soja (B0 e B20).</p>	<p>A forma como o BD é produzido tem implicações nos níveis de emissão de NOx.</p> <p>Através do processo de produção do biodiesel pretende-se diminuir o nº de moléculas com ligações duplas. Com este processo pretende-se que as emissões de NOx sejam reduzidas, contudo a redução destas emissões foi superior ao esperado, permitindo concluir que este fator é determinante para a emissão de NOx, acentuando a importância sobre o conhecimento do índice de iodo do BD.</p>
(Özkan 2007)	<p>Motor 4 cilindros IDI atmosférico.</p> <p>Testes em banco de motores à carga máxima entre 1000 e 3000rpm inc. 500rpm.</p> <p>BD comercial (B100).</p>	<p>Nas condições de potência máxima verifica-se uma perda de 9,6% de potência quando se utiliza BD relativamente à utilização de gasóleo. Em geral, o desempenho do motor quando opera a BD é similar ao obtido quando abastecido por gasóleo. A eficiência térmica observada para ambos os combustíveis é semelhante.</p> <p>Para todas as condições de funcionamento testadas verifica-se um excesso de ar maior para o BD do que para o gasóleo. Este facto é apresentado como justificativo para uma menor emissão de monóxido de carbono observada em todos os regimes de operação do motor quando consome BD. A existência de oxigénio no combustível fundamenta também as maiores emissões de NOx (entre mais 4 a 50%) com BD, sendo mais penalizadora a baixas rotações do motor.</p>
(Raheman e Ghadge 2007)	<p>Motor Ricardo E6 de 9kW às 1500rpm.</p> <p>Testes em banco de motores a 25%, 50% 75% e 100% carga a 1500rpm.</p> <p>BD de "mahua" (B0, B20, B40, B60, B80 e B100).</p>	<p>A utilização de BD promove um aumento de consumo específico (bsfc) de 4.3, 18.6, 19.6, 31.7 e 41% respetivamente para as misturas B20, B40, B60, B80 e B100, relativamente à utilização de gasóleo (B0). A eficiência térmica máxima é obtida com a mistura B20 (25%) e de B40 (24%) devido à melhoria do processo de combustão devido à existência de oxigénio no combustível.</p> <p>Também as emissões de NOx são acentuadas com o aumento da percentagem de BD no combustível atingindo um valor máximo de aumento de 6% relativamente ao gasóleo. Este incremento nas emissões de NOx é fundamentado pelo aumento da carga e pelo aumento da temperatura dos gases de escape que talvez justifique os valores mais elevados com BD uma vez que a temperatura dos gases de escape é aumentada com o aumento da proporção de BD no combustível.</p>

Referência	Motor, Combustível e Especificações de ensaios	Resumo
(Lebedevas, et al. 2007)	<p>2 Motores monocilíndricos atmosféricos.</p> <p>Testes em banco de motores.</p> <p>BD de colza (B0, B10, B15, B30, B100).</p>	<p>Não são visíveis efeitos significativos no consumo quando se utilizam as misturas B10 e B15. Verifica-se um aumento de 2 a 2.5% no consumo de combustível quando se abastecem os motores com B30 e de cerca de 8 a 12% com B100 para vários regimes de funcionamento dos motores.</p> <p>As emissões de NOx aumentam de 10 a 12% quando se usa B30 e 17% quando se usa B100, relativamente à utilização de gasóleo. As emissões de CO, HC e fumo são reduzidas em 30-37%, 20-50% e 50-55% respetivamente quando se substitui gasóleo por B30.</p>
(Szybist, Boehman e Haworth, et al. 2007)	<p>Motor CFR monocilíndrico a carburador.</p> <p>Estudo do mecanismo de autoignição de vários combustíveis.</p>	<p>Análise da influência da libertação energética a baixa temperatura (LTHR) no processo de ignição.</p> <p>A LTHR do BD é diferente da do gasóleo, apresentando quantidades significativas de emissões de CO₂ durante esta fase devido à descarbonização e não devido à oxidação do combustível.</p>
(Tsolakis, et al. 2007)	<p>Motor monocilíndrico DI, atmosférico sistema injeção bomba em linha.</p> <p>Testes em banco motores com 10% e 20% EGR.</p> <p>Biodiesel de colza (B0, B20, B50, B100).</p>	<p>A utilização de BD promove o aumento da pressão e temperatura no cilindro. Este efeito acontece devido à diminuição do atraso à inflamação e pelo aumento da fase de queima de pré-mistura, libertando energia de forma mais descontrolada.</p> <p>Ocorre uma redução nas emissões de fumo, HC e CO pelo consumo de BD, promovendo ainda o aumento das emissões de NOx e do consumo. Este aumento de consumo é justificado pelo menor conteúdo energético do BD, dado que a eficiência térmica não é significativamente alterada.</p> <p>O efeito do EGR é potenciado pela utilização de BD o que elimina o incremento das emissões de NOx promovidas pela utilização deste combustível. Com B50 e B100 verifica-se uma clara redução nas emissões de NOx e aumento ligeiro de consumo e fumo. A existência de Oxigénio no combustível permite diminuir as emissões de fumo fundamentalmente nas zonas de combustão rica.</p>
(Yamane, Kawasaki, et al. 2007)	<p>Motor monocilíndrico DI.</p> <p>Testes em banco motores.</p> <p>BD de soja, colza e linho. Também analisado BD soja sujeito a oxidação.</p>	<p>No processo de oxidação de um lípido o primeiro composto a ser formado é um hidroperóxido. O conteúdo deste elemento é normalmente apresentado como POV. O aumento do POV traduz-se pela diminuição do atraso à ignição.</p> <p>A utilização de BD diminui o atraso na ignição devido ao facto deste combustível apresentar normalmente valores de índice de cetano superiores ao gasóleo e pela maior viscosidade.</p> <p>A utilização de BD oxidado aumenta a temperatura e pressão de na câmara de combustão, aumentando as emissões de NOx e diminuindo as emissões de fumo e CO, sem implicações ao nível do consumo.</p>

Referência	Motor, Combustível e Especificações de ensaios	Resumo
(Yang, et al. 2007)	<p>2 motores Mitsubishi novos Turbo IDI 4 cilindros, 2835cm³.</p> <p>Testes em banco de rolos equivalentes a 80000km, ciclo FTP.</p> <p>BD de óleos vegetais usados (B0 e B20).</p>	<p>Com a utilização de B20 há menores emissões de HC, CO e partículas do que com gasóleo contudo, com a continuidade da utilização de BD este efeito inverte-se. Verifica-se um agravamento dos níveis de emissões com o acumular dos quilómetros.</p> <p>A média de emissões de partículas de hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (PAH) é menor com B20 do que com gasóleo, no entanto também a emissão destas partículas é aumentado com o acumular de quilómetros, efeito mais notório quando o motor consome B20.</p>
(Zhang e Boehman 2007)	<p>Motor 2.5lts DI, <i>common-rail</i>.</p> <p>Testes em banco motores a cargas baixas e altas com ajustes no ponto de injeção para que o tempo de ignição seja similar para os 3 combustíveis.</p> <p>BD comercial (B0, B20 e B40).</p>	<p>As condições normais de circulação correspondem a regimes de operação do motor de baixa rotação e baixa carga. São testadas as situações correspondentes a 1600rpm a 25% e 75% carga. A taxa de libertação de calor é similar para todos os combustíveis testados.</p> <p>A situação de avanço na injeção verificada nos sistemas de injeção tradicionais deixa de ser visível nos sistemas de <i>common-rail</i>. A utilização de BD implica injeções mais longas e pressões de injeção mais elevada.</p> <p>A formação de NOx é apresentada como tendo origem no fenómeno térmico (mecanismo Zeldovich) associado à saturação dos hidrocarbonetos, na alteração da capacidade radiativa de calor das partículas e no avanço à injeção. As emissões de NOx aumentam com a utilização de BD para cargas altas, mas diminuem a cargas baixas. É possível obter menor consumo e menores emissões de NOx desativando a injeção piloto e avançando a injeção principal aumentando a taxa de EGR.</p>
(Senatore, et al. 2008)	<p>Motor 1900cm³ <i>common-rail</i> EuroIV.</p> <p>Ensaio em banco de motores a 1500, 2000 e 3000 rpm com 4 cargas.</p> <p>BD de origem desconhecida (B100)</p>	<p>Ajuste dos parâmetros do motor de modo a melhorar o desempenho e reduzir emissões NOx quando se utiliza BD. Não efetuando qualquer ajuste na ECU, com a utilização de BD verifica-se a ocorrência de um maior pico de pressão e um aumento das emissões do NOx.</p> <p>Ajustando o funcionamento da EGR e do avanço à ignição melhora o desempenho do motor e diminui os níveis de emissões de NOx libertados pelos gases de escape.</p>
(Lin, et al. 2008)	<p>Motor 4 cilindros DI, 40kW às 2600rpm.</p> <p>Testes em banco de motores a 75% carga (125N.m) a várias rotações.</p> <p>BD de soja com aditivos (B0, B10, B20, B30).</p>	<p>O consumo de combustível aumenta com a utilização de BD, correspondendo a incrementos de 0.16% com B10, 0.71% com B20 e 0.99% com B30, relativamente ao gasóleo.</p> <p>As emissões de NOx não foram avaliadas neste estudo, mas as emissões de partículas aumentam com a utilização de BD.</p>

Referência	Motor, Combustível e Especificações de ensaios	Resumo
(Graham, et al. 2008)	<p>Motor veículo pesado, autocarros e camiões.</p> <p>Testes em banco de motores (Ciclo FTP), banco de rolos e em estrada.</p> <p>Vários combustíveis entre os quais BD de canola.</p>	<p>O consumo de combustível foi determinado através do balanço de carbono.</p> <p>Com uma quantidade de BD até 20% não se verificaram efeitos ao nível das emissões com efeito de estufa (GHG) utilizando catalisador de oxidação.</p> <p>Sem sistema de tratamento de gases a utilização de B20 permite apresentar reduções nas emissões de GHG relativamente à utilização de gasóleo (CO₂ <1%; CH₄ em 18% e N₂O em 10%).</p>
(Kegl 2008 b)	<p>Motor de autocarro com injeção M DI, 11413cm³.</p> <p>Teste em banco de motores tipo ESC de 13 modos.</p> <p>BD colza</p>	<p>Com ajuste do ponto de injeção é possível reduzir todas as emissões quando se abastece o motor com BD. Sem alterações no ponto de injeção quando o motor utiliza BD, ocorre avanço à injeção o que se traduz num aumento da pressão na combustão induzindo a formação de NOx. Os sistemas <i>common-rail</i> são menos sensíveis às propriedades dos combustíveis que os outros sistemas de injeção.</p> <p>Num estudo numérico a utilização de B100 aumenta o consumo, podendo este aumento atingir 25% a cargas baixas.</p> <p>O <i>spray</i> de BD é mais estreito e mais longo que o <i>spray</i> de gasóleo. A cargas baixas e rotações elevadas a penetração do <i>spray</i> é elevada relativamente ao gasóleo em 15%.</p> <p>Em carga máxima com B100 o binário e a potência diminuem 5% relativamente ao gasóleo, a temperatura de escape diminui em 30°C e aumenta o consumo específico em 10%, pelo que a eficiência térmica é similar.</p> <p>As emissões de NOx aumentam com a utilização de B100 em quase todos os regimes de funcionamento do motor exceto ao <i>ralenti</i>. Pelo contrário em todos os regimes de funcionamento as emissões de CO, HC e fumo diminuem com a utilização de B100.</p>
(Moraes, et al. 2008)	<p>Motor estacionário para produção de eletricidade.</p> <p>BD de gordura animal (B0, B2, B5, B10, B20, B30, B40, B50 e B100).</p>	<p>Conteúdo do BD é constituído em cerca de 10% por oxigénio.</p> <p>Nos combustíveis verifica-se uma diferença significativa na temperatura final de destilação, sendo a amplitude de temperaturas de destilação do BD bastante mais pequena do que no caso do gasóleo.</p> <p>A utilização de BD aumenta o consumo específico (<i>sfc</i>) em 14% o que é comparável à diminuição de poder calorífico deste combustível quando comparado com o gasóleo, verificando-se uma evolução crescente proporcional à quantidade de BD incorporado.</p>

Referência	Motor, Combustível e Especificações de ensaios	Resumo
(Muncrief, et al. 2008)	<p>Motor Volvo de veículo pesado 275cv de 1999.</p> <p>Testes em banco de rolos.</p> <p>BD de algodão (B0, B20, B50 e B100) e de soja (B0 e B100).</p>	<p>No veículo foi montada uma válvula EGR e um filtro de partículas com catalisador de oxidação.</p> <p>A utilização de B100 implica uma temperatura de gases de escape 10°C mais baixa que a obtida com gasóleo.</p> <p>Em termos médios a carga do motor com BD é apenas 2% inferior à obtida com gasóleo, embora ocorram picos em que a diferença é mais notória.</p> <p>As emissões de partículas são reduzidas em 65% utilizando B100 e em 25% utilizando B20. Ao nível das emissões de NOx não se verificam alterações significativas quando se utiliza BD de soja, mas ocorre uma redução de 13% com BD de algodão.</p> <p>A utilização combinada de EGR e B100 resulta numa significativa redução de partículas e de emissões de NOx, potencialmente motivada pela existência de oxigénio no combustível. A utilização de BD permite aumentar a eficiência do conjunto EGR e filtro de partículas especialmente a baixas temperaturas.</p>
(Ozsezen, Canakci e Sayin 2008)	<p>Motor IDI atmosférico 1800cm³.</p> <p>Ensaio estacionários em banco de motores a várias rotações.</p> <p>BD de óleos vegetais usados (B0, B5, B50 e B100).</p>	<p>Identificados problemas na utilização de óleos vegetais.</p> <p>Com BD relativamente ao gasóleo verifica-se uma diminuição do binário em 2.00, 4.28, 5.16 e 7.16% quando se utiliza B5, B20 B50 e B100 respetivamente. A estes combustíveis corresponde um aumento do consumo específico (sfc) respetivamente de 2.17, 5.78, 9.42 e 16.76%</p> <p>A existência de oxigénio no combustível permite uma melhoria no processo de combustão o que se traduz numa diminuição de temperatura menos significativa do que seria esperado, atendendo ao menor poder calorífico do combustível. A quantidade máxima de energia libertada aumenta com a utilização de BD sendo associada à fase de pré-mistura. Esta situação é mais notória a elevada temperaturas.</p> <p>A fase de combustão de pré-mistura termina mais cedo para o BD que inicia a combustão mais rapidamente encurtando o tempo de duração desta fase. A existência de Oxigénio na composição do BD implica um aumento da taxa de libertação de calor na combustão e uma maior fração de queima de combustível na fase de pré-mistura, apesar do menor tempo de duração.</p> <p>Quando se utiliza BD a agulha do injetor move-se mais do que com gasóleo, havendo ainda uma diminuição do ruído do motor.</p>

Referência	Motor, Combustível e Especificações de ensaios	Resumo
(Karra, Veltman e Kong 2008)	<p>Motor John Deere DI <i>common-rail</i> c\ turbo.</p> <p>Testes em banco motores 50% carga, e com e sem EGR.</p> <p>BD sem identificação da fonte (B0, B20 e B100)</p>	<p>A utilização de EGR e injeções múltiplas permitem baixar a temperatura da combustão e baixar as emissões de NOx.</p> <p>O aumento da pressão de injeção melhora a atomização e a pulverização promovendo a libertação de energia na fase de pré-mistura aumentando a temperatura da combustão o que se traduz na maior emissão de NOx e na diminuição da formação de fumo.</p> <p>A utilização de B100 aumenta a emissão de NOx e a diminuição de fumo aumentando também o consumo de combustível (bsfc) relativamente a B20.</p> <p>Para uma pressão de injeção de 180MPa e com 30% de EGR o nível de emissões de NOx com B0 e com B20 é semelhante, embora com B100 esse valor aumente.</p> <p>Nos sistemas <i>common-rail</i> a duração da injeção não parece afetada pela utilização de BD.</p>
(Puhan e Nagarajan 2008)	<p>Motor monocilíndrico com 4,4kW de potência.</p> <p>Testes em banco de motores a 1500rpm e várias cargas.</p> <p>3 diferentes tipos de BD com diversos graus de saturação.</p>	<p>Estudo avalia o efeito que o grau de saturação dos ácidos gordos que estão na origem do BD sobre as propriedades de BD e sua utilização em motores.</p> <p>O aumento do grau de saturação do BD implica que o índice de cetano desse BD aumente e que a densidade diminua.</p> <p>A utilização de BD mais insaturados provoca um impacto que tendencialmente aumenta as emissões de HC, CO, fumo, NO, diminuindo ainda a pressão de combustão e a temperatura dos gases de escape, quando comparado com BD altamente saturado.</p>
(Sinha e Agarwal 2008)	<p>Motor DI, atmosférico, de 2520 cm³.</p> <p>Testes em banco motores – vários ciclos.</p> <p>BD de Óleo de casca de arroz (B0, B5, 10, B20, B30, B50, B100).</p>	<p>O consumo (bsfc) menor é obtido com as misturas B5, B10 e B20. O rendimento térmico é similar para todos os combustíveis analisados, exceto para B100 onde se verifica um ligeiro aumento de 0.3 a 2%.</p> <p>Em termos gerais a utilização de BD tem como consequência um aumento das emissões de NOx e uma diminuição das emissões de CO e HC.</p> <p>Quando se utiliza B20 verifica-se que é com esta mistura que se obtém o máximo ao nível do desempenho do motor.</p> <p>A utilização de BD propicia uma menor quantidade de partículas no óleo lubrificante do motor.</p> <p>A pressão máxima de combustão é atingida quando se utiliza BD a cargas baixas, enquanto em situações de carga elevada a pressão máxima de combustão é obtida com gasóleo.</p>

Referência	Motor, Combustível e Especificações de ensaios	Resumo
(Li, et al. 2008)	<p>Motor de Perkins DI, 6 cilindros turbo com intercooler e catalisador tipo Euro 2.</p> <p>Testes em banco motores estacionários a 23kW e 47kW.</p> <p>BD de óleo usado (B100)</p>	<p>Análise do rendimento do catalisador com BD e gasóleo.</p> <p>O rendimento térmico do motor é muito semelhante quando se utiliza BD ou gasóleo.</p> <p>Quando se abastece o motor com BD verifica-se uma larga diminuição nas emissões de HC e CO, e um pequeno aumento das emissões de NOx.</p> <p>Quando se exige que o motor produza 23kW de potência a emissão de partículas é similar para o BD e para gasóleo, contudo ao elevar a potência exigida ao motor verifica-se que a emissão de partículas proveniente do consumo de BD é inferior à proveniente da utilização de gasóleo.</p> <p>Em termos comparativos entre os dois combustíveis, quando se utiliza BD a mistura é mais rica o que provoca um aumento da temperatura dos gases de escape e um aumento das emissões de NOx.</p>
(Nuszowski, et al. 2008)	<p>2 motores ISM, um de 1999 e outro de 2004.</p> <p>Testes em banco de motores ciclo FTP.</p> <p>BD de soja, gordura animal e algodão (B20).</p>	<p>A utilização de B20 implica um aumento de consumo (bsfc) de 2,5% apenas no motor de 1999.</p> <p>O abastecimento do motor com B20 implica uma redução na emissão de partículas de 20 a 35%, um aumento de 0 a 4.3% nas emissões de NOx e uma diminuição de 0 a 22.4% nas emissões de CO.</p> <p>As emissões de NOx aumentam com o aumento da carga imposta ao motor, mas este efeito é mais visível quando o motor é abastecido com gasóleo.</p> <p>É apontado como plausível que as variações nas emissões de NOx são provocadas por um processo de combustão localizado, como a redução da capacidade radiante das partículas ou química de combustão local, uma vez que a curva de geração de calor revela poucas ou nenhuma alterações entre os dois combustíveis (B20 e gasóleo).</p>
(Ra, et al. 2008)	<p>Modelação computacional</p>	<p>Devido às diferentes propriedades do BD face ao gasóleo verifica-se que no processo de injeção ocorre um abrandamento da vaporização e o aumento da quantidade de combustível nas paredes do cilindro.</p> <p>A densidade líquida e a pressão de vapor são as propriedades que se revelam como mais influentes no comportamento do BD durante o processo de combustão.</p> <p>Não é possível definir a dominância de uma única propriedade para as diferenças no processo de injeção, resultando sim da contribuição conjunta de várias propriedades.</p>

Referência	Motor, Combustível e Especificações de ensaios	Resumo
(Mazumdar e Agarwal 2008)	<p>Motor 4 cilindros IDI de 2498cm³.</p> <p>Testes em banco motores a 2000rpm e várias cargas.</p> <p>BD de óleos vegetais usados (B0, B5, B10, B20, B50 e B100).</p>	<p>A utilização de B5, B10 e B20 permite uma redução de consumo (bsfc) comparativamente ao uso de gasóleo, onde o valor mínimo corresponde a B20. Com B50 e B100 o consumo (bsfc) é similar ao obtido com gasóleo.</p> <p>O rendimento térmico é maior com a utilização de BD do que com gasóleo.</p> <p>O aumento da utilização de BD conduz a um aumento da emissão de NOx e uma diminuição das emissões de CO e HC.</p>
(Kong e Kimber 2008)	<p>4 Motores para geradores elétricos.</p> <p>Testes em condições reais de funcionamento.</p> <p>BD sem identificação de origem (B0, B10, B20 e B30).</p>	<p>A utilização de BD permite indiciar o aumento de emissões de NOx e a diminuição de emissões de partículas e de CO face ao consumo de gasóleo.</p>
(Lapuerta, Armas e Rodríguez-Fernández 2008 b)	<p>Motor 4 cilindros DI turbo intercooler.</p> <p>Testes em banco motores com 5 modos de operação baseados no ciclo NEDC.</p> <p>4 tipos de BD com nº iodo de 90 a 125 (B0, B30 e B70).</p>	<p>Aumento da insaturação do BD retarda a ignição o que provoca um aumento nas emissões de NOx, aumenta a velocidade de combustão e diminui a emissão de partículas, de fumo e o diâmetro médio das partículas emitidas.</p> <p>O número de iodo não afeta o desempenho do motor nem o consumo. O aumento unitário do número de iodo do BD utilizado traduz-se um aumento das emissões de NOx em 0.63% e na diminuição de partículas e fumo em 0.8% e 0,89% respetivamente.</p> <p>A utilização de BD conduz a um aumento ligeiro das emissões de NOx, especialmente nos casos em que o BD é mais insaturado, como consequência do baixo número de cetano associado.</p>
(Zhang, et al. 2008)	<p>Motor monocilíndrico atmosférico com EGR.</p> <p>Testes em banco de motores a rotação constante de 1200rpm e várias cargas, com 10, 20 e 30% de EGR.</p> <p>BD de soja (B0, B20, B50 e B100).</p>	<p>Com a utilização de BD verifica-se um aumento no consumo de combustível e uma diminuição na energia libertada. Com o aumento da carga do motor as variações na libertação de energia tornam-se mais significativas.</p> <p>As emissões de NOx sofrem variações com a utilização de BD de -0.2 a 4.1% com B20, 0.5 a 8.2% com B50 e 5.0 a 8.1% com B100. Utilizando 10% de EGR as emissões de NOx são inferiores às obtidas com gasóleo.</p> <p>A menor capacidade de atomização do BD com avanço da injeção implica uma menor qualidade da mistura ar/combustível e por consequência uma menor quantidade de energia libertada.</p>

Referência	Motor, Combustível e Especificações de ensaios	Resumo
(Wu, et al. 2008)	<p>Motor Cummins 6 cilindros turbo com <i>intercooler common-rail</i>, tipo Euro III, sem EGR.</p> <p>Testes em banco motores às 1500rpm e carga parcial.</p> <p>BD de 5 diferentes origens (algodão, soja, palma, colza e óleos usados) (B100).</p>	<p>A existência de oxigénio no combustível permite aumentar a eficácia térmica nas zonas de combustão rica.</p> <p>A utilização de BD conduz a um aumento de 13 a 15% do combustível associado a uma diminuição na potência produzida pelo motor em 9-12%.</p> <p>Revela-se que o motor abastecido por BD apresenta uma eficiência térmica ligeiramente menor, de -1.6 a -2%, do que quando utiliza gasóleo.</p> <p>Com BD reduzem-se as emissões de partículas em 53 a 69% e a fuligem seca em 79 a 83%.</p> <p>As diferenças entre os vários BD verificam-se principalmente ao nível do índice de cetano, do conteúdo em oxigénio e da viscosidade com efeitos visíveis sobre as emissões de fuligem.</p> <p>O aumento do conteúdo em oxigénio diminui a emissão de fuligem a cargas elevadas e a diminuição da viscosidade diminui a emissão de fuligem a cargas baixas.</p>
(Krahl, et al. 2008)	Vários motores testados em vários ciclos com BD de colza (B20) com GPL (20%).	A utilização de BD no motor MAN Euro IV turbo com intercooler, EGR e filtro de partículas permitiu diminuir as emissões de NOx, de partículas, de CO e HC, embora o consumo tenha aumentado ligeiramente.
(Fontaras, Karavalakis, et al. 2009)	<p>Veículo VW Golf 1.9 TDI.</p> <p>Testes em banco de rolos e de estrada.</p> <p>BD de soja (B0, B50 e B100).</p>	<p>O consumo é avaliado pelo balanço de carbono.</p> <p>Utilizando BD diminui a eficiência do motor a baixas rotações e a baixa carga.</p> <p>Em condições de circulação reais em percurso urbano a utilização de BD provoca variações mínimas nas emissões de CO₂ contrariamente ao sugerido na realização de ensaios em banco de rolos.</p> <p>As oscilações detetadas ao nível do consumo entre os diferentes combustíveis são da ordem de variação do seu conteúdo energético.</p> <p>A utilização de BD num veículo projetado para operar com gasóleo tem um impacto que depende fortemente das condições de circulação.</p>
(Golovitchev e Yang 2009)	Utilização de modelo de cálculo com BD de colza (C19H36O2) testado com dados de motor Volvo D12C.	Simulação permite teoricamente caracterizar a utilização de BD como tendo baixas emissões de fuligem e de NOx com cargas moderadas de EGR.

Referência	Motor, Combustível e Especificações de ensaios	Resumo
(Luján, et al. 2009)	Motor <i>common-rail</i> . Testes NEDC em banco de rolos. BD de óleos vegetais usados (B0, B30, B50, B100).	Não se verificam diferenças significativas na pressão na rampa e no caudal de injeção entre os diferentes combustíveis devido provavelmente ao efeito balanceado da maior viscosidade do BD e na maior densidade que implica maior massa de combustível injetada para um mesmo volume.
(Guarheiro, et al. 2009)	Motor 2 cilindros 1272cm ³ , DI. BD de várias fontes – soja castor, resíduos, com etanol. Testes em banco motores a 1800rpm e 2000rpm a várias cargas.	A utilização de BD e etanol permite diminuir as emissões de NOx, sendo este efeito mais notório com BD de soja do que com BD de óleo de castor e de resíduos. Para cargas mais elevadas, o consumo específico diminui quando se utiliza BD. A utilização de etanol aumenta o consumo específico de combustível, não existindo diferenças significativas entre os tipos de BD utilizados ao nível do consumo.
(He, Ge, et al. 2009)	Motor DI, turbo, sist. injeção mecânico sem EGR. Testes em banco de motores a várias cargas e várias rotações. BD de soja (B0 e B100)	BD aumenta a emissão de compostos carbonados em 3x face ao gasóleo. Com aumento da carga do motor as emissões destes compostos diminui ligeiramente. Com o aumento da rotação estas emissões sofrem um aumento significativo. Os compostos carbonados mais relevantes são formaldeído, acetaldeído, acetona e acroleína. Com a utilização de BD os compostos carbonados contribuem de forma mais evidente para a totalidade dos HC.
(Karabektas 2009)	Motor DI atmosférico mas onde foi instalado turbo. Testes em banco motores a 1200rpm e 2400rpm. BD de colza (B0 e B100).	O consumo de combustível (bsfc) é maior com BD do que com gasóleo, embora a utilização do turbo minimize essa diferença (11.5% motor atmosférico e 8,9% com turbo). O binário e a potência com BD é menor do que com gasóleo. A eficiência térmica com BD é em média 2.6% superior à obtida com gasóleo no motor atmosférico aumentando esta superioridade para 5% com a utilização de sobrealimentação. A utilização do turbo favorece as condições de utilização de BD. A utilização de BD aumenta os níveis de emissão de NOx mas provoca uma diminuição nas emissões de CO.

Referência	Motor, Combustível e Especificações de ensaios	Resumo
(Yanowitz e McCormick 2009)	Trabalho envolvendo 49 casos de estudo com motores de veículos pesados (heavy-duty), através de ensaios em banco de motores e de circulação em estrada, com ciclos estacionários e transientes, utilizando B20 de várias origens.	<p>Os fatores que estão na origem do incremento nas emissões de NOx quando se utiliza B20 são a maior temperatura no interior do cilindro promovida pelo avanço à ignição e a existência de zonas com maior temperatura de chama motivada pelos fenómenos termodinâmicos da combustão do BD diferentes dos que ocorrem com gasóleo.</p> <p>Nos vários estudos, ocorrem diferenças nos resultados devido essencialmente aos diferentes tipos de matéria prima do BD, aos ciclos impostos, à carga média imposta, ao motor e ao combustível (% mistura e gasóleo), não sendo visíveis efeitos correlacionáveis com a idade dos veículos ou com o tipo do sistema de injeção.</p> <p>Na verdade, com a utilização de BD ocorre a diminuição de emissões de partículas, de HC e CO em 10 a 20%, verificando-se efeitos diversos nas emissões de NOx. Quando se faz a média nas emissões de NOx mascara-se a complexa variabilidade que ocorre relativamente às emissões destes compostos quando se abastece o motor com BD.</p> <p>A existência de oxigénio no combustível pode explicar a menor emissão de fuligem e talvez seja o fundamento para o aumento das emissões de NOx, quando se utiliza BD. É revelada a importância de estudar o modo como variam as emissões de NOx com o ciclo de condução e como os equipamentos de controlo das emissões lidam com a utilização de BD.</p>
(Qi, et al. 2009)	<p>Motor monocilíndrico, DI, atmosférico.</p> <p>Testes em banco de motores à carga máxima para várias rotações.</p> <p>BD soja (B0 e B100).</p>	<p>Existe uma grande diferença na curva de destilação do BD e do gasóleo. O BD tem um ponto inicial de destilação bastante mais elevado que o gasóleo, embora o ponto final seja muito semelhante para os dois combustíveis. Deste modo a variação de temperatura do BD é muito pequena, à volta de 40°C. Isto implica que o gasóleo inicia a vaporização mais facilmente o que se traduz numa mistura mais homogénea com o ar na fase de combustão de pré-mistura.</p> <p>A pressão máxima no cilindro é maior com BD a cargas baixas, contudo a cargas mais altas a pressão máxima é equivalente para os dois combustíveis. Em todos os regimes verifica-se que a combustão se inicia mais cedo quando se utiliza BD do que com gasóleo.</p> <p>A potência gerada com BD e gasóleo é similar, mas devido à maior densidade do BD o consumo específico (bsfc) é superior quando se abastece o motor com este combustível. O consumo específico de energia (bsec), que associa o consumo específico ao poder calorífico de cada combustível, é similar com BD e gasóleo, apenas para situações de rotação elevada se verifica uma ligeira diminuição com BD.</p> <p>Quando se utiliza BD regista-se uma diminuição das emissões de HC, CO, NOx e fuligem de 27, 27, 5 e 52% respetivamente face à utilização de gasóleo.</p>

Referência	Motor, Combustível e Especificações de ensaios	Resumo
(Sahoo, Das e Babu, et al. 2009)	<p>Motor 3 cilindros 3440cm³ da AVL.</p> <p>Testes em banco de motores a várias cargas e várias rotações.</p> <p>BD de jatropa, <i>polanga</i> e <i>karanja</i> (B0, B20, B50 e B100).</p>	<p>A carga máxima é possível detetar aumento, diminuição e mesmo inexistência de alteração da potência para os vários combustíveis para carga máxima. Com BD de jatropa (B20 e B50), acima das 1200rpm, verifica-se um aumento da potência disponibilizada pelo motor face à obtida com gasóleo.</p> <p>O consumo de energia (bsec) aumenta para todos os combustíveis com BD, diminuindo com o aumento da velocidade de rotação. BD de jatropa (B20) e de <i>polanga</i> (B20 e B50) a carga parcial e 1800rpm apresentam um consumo específico (bsfc) ligeiramente inferior ao obtido com gasóleo.</p> <p>A emissão de fumo diminui para todos os combustíveis com BD, diminuindo com o aumento da velocidade de rotação do motor. Para todos os B100 verifica-se uma diminuição nas emissões de fumo. Em termos gerais, observa-se uma redução nas emissões de partículas e HC e um aumento ligeiro das emissões de CO e NOx com a utilização de BD.</p>
(Jie Zhang, Shi e Zhao 2009)	<p>Motor DI com turbo tipo euro II, Pot Max 117kN a 2300rpm.</p> <p>Testes banco de motores 1400rpm com 50% e 100% de carga e 2300rpm com 25% e 75% de carga.</p> <p>BD soja (B0 e B20) com 2 tipos de gasóleo com teores em enxofre distintos.</p>	<p>95% dos constituintes das partículas emitidas pelos motores são carbono elementar ou orgânico (EC ou OC).</p> <p>Para as condições de operação do motor consideradas não se verificaram alterações no consumo ou potência para os diferentes tipos de combustíveis. Também ao nível das emissões de NOx não foram visíveis quaisquer variações significativas.</p> <p>A utilização de B20 permite diminuir as emissões de CO, HC e de partículas com diâmetro até 2.5µm.</p>
(Soltic, et al. 2009)	<p>Motor 6 cilindros com 335kW às 1900rpm.</p> <p>Testes em banco de motores às 1300rpm e 2100Nm. 3 Situações: normal; ajuste avanço em função da temperatura e ajuste avanço em função NOx.</p> <p>BD de colza e a utilização de GPL.</p>	<p>A utilização de óleos vegetais implica um aumento da pressão no sistema de injeção que acaba por causar problemas neste sistema.</p> <p>O ajuste do avanço de modo a obter o mesmo binário com BD e gasóleo. Neste modo verifica-se uma diferença de 3 bar na pressão dentro do cilindro quando se utiliza BD comparativamente à pressão obtida com gasóleo.</p> <p>A utilização de BD permite um aumento da eficiência em 5%, contudo esta é acompanhada por um aumento considerável das emissões de NOx.</p> <p>A utilização de BD produz um maior nº de condensados orgânicos e partículas voláteis do que as produzidas com gasóleo, contudo as emissões de partículas são inferiores.</p>

Referência	Motor, Combustível e Especificações de ensaios	Resumo
(Agudelo, Benjumea e Villegas 2010)	<p>Motor DI com turbo com 58kW às 1400rpm.</p> <p>Testes em banco de motores a várias rotações e 25, 50, 75 e 100% de carga.</p> <p>BD de palma (B0 e B100).</p>	<p>Verifica-se uma diminuição da potência de 5 a 10% quando se utiliza BD face ao consumo de gasóleo, sendo contudo inferior à diminuição de energia disponível no combustível (11%) indicando uma ligeira melhoria da eficiência térmica.</p> <p>Quando se utiliza BD nos ensaios à carga máxima verifica-se uma diminuição de binário de 10 a 17% e um aumento de consumo de combustível de 14 a 22% em função da rotação do motor.</p> <p>A cargas parciais o consumo aumenta entre 5 a 22% quando se utiliza BD comparativamente à utilização de gasóleo.</p> <p>As emissões de NOx aumentam com a carga devido ao aumento de temperatura. A relação das emissões de NOx com a rotação do motor é influenciada pelo tempo de permanência dos gases no interior do cilindro. No presente caso o valor máximo é obtido a um valor intermédio de rotação, diminuindo para rotações mais elevadas.</p> <p>Para baixas rotações as emissões de NOx com B100 são cerca de 30% superiores às obtidas com gasóleo, para rotações mais elevadas estas emissões apresentam valores ligeiramente inferiores com B100.</p> <p>Para cargas baixas não se verificam diferenças significativas nas emissões de NOx com os diferentes combustíveis. Para as condições de operação mais comuns dos motores na circulação de veículos não se registam variações significativas ao nível das emissões específicas de NOx mas as emissões específicas de fumo são expressivamente mais baixas quando se utiliza B100.</p> <p>A redução das emissões de fuligem com BD é atribuível à promoção da oxidação dessa fuligem pela utilização de BD, bem como o menor conteúdo em enxofre e hidrocarbonetos aromáticos neste combustível e ainda pelo facto de o BD apresentar uma temperatura máxima de destilação inferior à do gasóleo.</p>
(Armas, Yehliu e Boehman 2010)	<p>Motor <i>common-rail</i> com turbo, sem EGR.</p> <p>Testes em banco de ensaios de motores a 19% de carga (64N.m às 2400rpm).</p> <p>BD de soja e <i>fisher-tropsch</i> (B100).</p>	<p>O consumo de combustível (bsfc) aumenta 12% com a utilização de B100, valor comparável ao menor conteúdo energético do BD face ao gasóleo. A eficiência energética diminui em 6% com B100. Com a utilização de B100 verifica-se um aumento da duração da injeção, provocando um aumento do consumo de combustível.</p> <p>É notório um aumento da emissão de partículas com a utilização de B100, sendo todavia o diâmetro médio destas menor do que as obtidas pela combustão de gasóleo.</p> <p>A utilização de B100 é responsável por um ligeiro decaimento nas emissões de NOx, comparativamente à utilização de gasóleo.</p>

Referência	Motor, Combustível e Especificações de ensaios	Resumo
(Fontaras, Kousoulidou, et al. 2010)	<p>Veículo Renault Laguna com motor 1.9 DCI tipo Euro III <i>common-rail</i>.</p> <p>Testes em banco de rolos com ciclo Artemis e NEDC.</p> <p>BD de colza, soja, girassol, palma e óleos vegetais usados (B0 e B10).</p>	<p>A variação nas emissões de CO₂ oscila entre -2% a 4% com a utilização de B10.</p> <p>As emissões de CO e HC apresentam um aumento de 10 a 25% quando o motor é abastecido com B10, exceto para regimes de funcionamento a altas rotações e binário elevado.</p> <p>As emissões de partículas são reduzidas até 25% pela utilização de B10 de todas as origens, sendo possível verificar que as emissões de partículas não voláteis são também reduzidas.</p> <p>As emissões de NOx aumentaram 11 e 8% quando se utilizaram B10 respetivamente de palma e girassol, reduziram 7% para B10 de soja e óleos vegetais usados e permaneceram inalteradas com B10 de colza. O nível de saturação do B10 poderá estar associado às diferenças registadas nas emissões de NOx e também às emissões de partículas. De fato quanto maior o grau de saturação do BD menores as emissões de NOx e de partículas. Também o conteúdo em glicerol (livre e ligado) poderá condicionar o comportamento das várias misturas, sendo os B10 de palma e girassol os que apresentam maiores teores neste composto, sendo também os que apresentam emissões de NOx mais penalizadoras.</p>
(Gogoi e Baruah 2010)	<p>Trabalho de simulação computacional.</p> <p>BD de <i>karanja</i> (B0, B20, B40, B60).</p>	<p>Análise da velocidade de rotação e relação de compressão. A pressão e temperatura de combustão são superiores com BD do que com gasóleo.</p> <p>Com B60 a potência máxima ocorre a rotação mais baixa (1400rpm) do que com as restantes misturas de combustível (1500rpm). A potência é ligeiramente mais baixa com B20 do que com gasóleo, mas mais alta com B40 e B60.</p> <p>Com todas as misturas contendo BD é possível observar um aumento da eficiência térmica.</p>
(Gumus e Kasifoglu 2010)	<p>Motor monocilíndrico DI Lombardini 6 LD 400 com 21N.m às 2200rpm.</p> <p>Testes em banco de motores a várias cargas e 2200rpm.</p> <p>BD de sementes de damasco (B0, B5, B20, B50 e B100).</p>	<p>Com B20 atinge-se o maior valor de potência devido à existência de oxigénio no combustível, à maior densidade do BD e a um processo de bombagem mais eficiente. Quando se aumenta o teor em BD para 50% e 100% a potência diminui.</p> <p>O consumo de energia (bsec) inicialmente diminui (0,48% com B5 e 4,7% com B20) aumentando para um valor semelhante ao do gasóleo (B0) com B50 e mais ainda para B100 (mais 4,8%).</p> <p>O valor de concentração de CO₂ nos gases de escape é máximo para B20, indiciando um grau de combustão mais completo com este combustível.</p> <p>Com a utilização de BD verifica-se uma diminuição das emissões de HC, CO e fumo com ligeiro aumento das emissões de NOx.</p>

Referência	Motor, Combustível e Especificações de ensaios	Resumo
(Ilkiliç e Behçet 2010)	<p>Motor monocilíndrico DI.</p> <p>Testes em banco de motores.</p> <p>BD de sementes de algodão (B20).</p>	<p>Verifica-se uma redução de 19% nas emissões de NOx, de 22% nas emissões de CO e de 13% nas emissões de CO₂ pela utilização de B20.</p>
(Kousoulidou, et al. 2010)	<p>Motor 2200cm³, DI turbo, <i>common-rail</i> com EGR e <i>intercooler</i>.</p> <p>Testes em banco de motores; ciclo FTP.</p> <p>Veículo Renault Laguna 1.9 DCI em banco de rolos e em percurso de 2000km em tráfego real.</p> <p>BD de palma e colza (B0 e B10).</p>	<p>Ocorrem diferenças de consumo na ordem dos 11% mas apenas a carga e rotação baixa (1500rpm e 30N.m). A cargas e rotações mais elevadas as diferenças de consumo variam entre uma redução de 3% e um acréscimo de 4%.</p> <p>Em termos gerais verifica-se uma média de consumo (bsfc) 1,3% mais alta com B10 do que com gasóleo. As razões sugeridas para esta variação são as diferenças entre os combustíveis no conteúdo de oxigénio e ao nível da viscosidade e tensão superficial que se traduzem em alterações na formação do spray de combustível fundamentando alterações no processo de combustão.</p> <p>As emissões de NOx variam entre uma diminuição de 6% e um aumento de 4% com a utilização de BD comparativamente ao uso de gasóleo. Para carga e rotação reduzidas a utilização de BD implica um aumento de 1% das emissões de NOx e uma redução de 13% nas emissões de fumo. Com carga elevada e baixas rotações baixas as emissões de NOx diminuem 1% mas verifica-se um aumento de 118% no fumo. Para rotação elevada e carga reduzida as emissões de NOx com B10 são reduzidas em 6% e as emissões de fumo aumentam 13%. Em condições de rotação e carga elevadas as emissões de NOx são incrementadas em 2% pela utilização de B10, enquanto as emissões de fumo aumentam 20%.</p> <p>Utilizando o veículo no banco de rolos verifica-se uma redução de 4% no consumo quando o veículo é abastecido com B10 de colza comparativamente com consumo de gasóleo.</p> <p>Neste caso as emissões de NOx aumentam quando se utiliza B10 nas condições de rotação superior a 2000rpm independentemente da carga, mas abaixo dessa rotação e com carga superior a 50% estas emissões diminuem. As emissões de fumo aumentam com rotação baixa e carga elevada e com rotação elevada e carga baixa, diminuindo quando a rotação está entre 2000 e 3000rpm com mais de 50% de carga,</p> <p>Para rotações baixas (1500rpm) e carga baixa (75N.m) o consumo aumentou em 5%, tendo reduzido 1% nas mesmas condições de rotação mas a carga alta (170N.m). A rotação e carga elevada (3000rpm e 170N.m) o consumo aumenta 4% com a utilização de B10. A análise dos resultados revela que a utilização de BD é bastante complexa, existindo diversos regimes de funcionamento do motor em que o consumo de combustível é reduzido pela substituição de uma parte de gasóleo por BD.</p>

Referência	Motor, Combustível e Especificações de ensaios	Resumo
(Moon, et al. 2010)	<p>Motor CDRi 4 cilindros turbo <i>intercooler</i>.</p> <p>Testes em banco de motores a várias rotações e cargas,</p> <p>BD sem identificação fonte (B0, B20 e combustível líquido obtido de gás natural).</p>	<p>Eficiência de conversão do B20 é superior à do gasóleo para os vários modos de operação do motor avaliado.</p> <p>O consumo de combustível (bsfc) é ligeiramente inferior para B20 a baixa rotação e carga, mas para os restantes regimes de funcionamento do motor o consumo (bsfc) aumenta com a utilização de BD.</p> <p>As emissões de NOx aumentam ligeiramente com B20 devido à existência de oxigénio no combustível.</p>
(Panwar, et al. 2010)	<p>Motor monocilíndrico.</p> <p>Testes em banco de motores a várias rotações e cargas.</p> <p>BD de óleo castor (B0, B5, B10 e B20).</p>	<p>À carga máxima, a utilização de B10 permite a obtenção de mais 1.5, 1.76 e 0.75% de potência do que quando utiliza B0, B5 e B20 respetivamente.</p> <p>Quando se utiliza B10 o consumo específico (bsfc) é menor que o observado com gasóleo para todos os regimes de operação do motor testado. Quando se considera o consumo de B20 relativamente a B0 acontece exatamente o oposto.</p> <p>O consumo específico de energia é muito similar para todos os combustíveis avaliados.</p> <p>A eficiência térmica de B10 é 14% superior à do B0, 9.5% superior à do B5 e 7.7% superior à do B20, na situação de carga máxima.</p> <p>A temperatura de escape sofre uma ligeira diminuição com B5, aumentando com B10 e B20.</p> <p>A cargas altas a emissão de NOx é mais baixa com B10 do que com B0, mas utilizando B5 e B20 a emissão de NOx é mais elevada do que quando se utiliza gasóleo. A cargas baixas não se observam variações significativas.</p>
(Rakopoulos, et al. 2010)	<p>Motor Mercedes DI turbo, <i>aftercooler</i> de 6000cm³.</p> <p>Testes em banco de motores em 3 modos de transição de regime.</p> <p>BD com metade de girassol e metade de sementes de algodão (B0 e B30).</p>	<p>Nos 3 casos analisados verifica-se que ocorre um aumento das emissões de NOx e diminuição das emissões de fumo, quando se utiliza B30.</p> <p>A riqueza da mistura e a temperatura da combustão são apontados como os fatores responsáveis pela maior emissão de NOx do B30, uma vez que quando se utiliza este combustível a mistura fica mais pobre e a combustão é mais quente do que quando se utiliza gasóleo. As emissões de NOx com B30 aumentam 31.7%, 44.4 e 51.5% nas 3 situações avaliadas.</p> <p>As emissões de fumo são reduzidas em 39.9%, 13.3% e 30.1% nas situações de transição analisadas quando se utiliza B30 comparativamente à utilização de gasóleo. Para este efeito a contribuição virá do nº de ligações duplas do átomo de oxigénio no BD.</p>

Referência	Motor, Combustível e Especificações de ensaios	Resumo
(Qi, Chen, et al. 2010)	<p>Motor monocilíndrico 1000cm³ DI atmosférico.</p> <p>Testes em banco de motores com várias cargas a 1500rpm.</p> <p>BD de soja (B0, B30, B50, B80 e B100).</p>	<p>A introdução de BD resulta em efeitos diferenciados no desempenho e emissões para diferentes regimes de funcionamento do motor. A utilização de B0 permite obter o menor valor de consumo específico, seguido de B30, B50, B80 e B100. A eficiência térmica com gasóleo é ligeiramente superior à dos restantes combustíveis, sendo deteriorada com maiores teores de BD no combustível.</p> <p>A carga média e baixa não se observam variações significativas nas emissões de CO, mas a carga elevada verifica-se que as emissões de CO são reduzidas pela utilização de BD. Relativamente às emissões de HC as diferenças observadas para os diferentes combustíveis são insignificantes. A opacidade do BD, com cargas baixas e médias, é superior à obtida com gasóleo, mas bastante inferior quando se exige ao motor que opera a cargas elevadas.</p> <p>Os fatores que afetam as emissões de NOx são a quantidade de biodiesel existente no combustível, a temperatura de combustão e o tempo. As emissões de NOx quando se utiliza BD são mais altas que as correspondentes à utilização de gasóleo, mas com uma diferença sempre abaixo de 100ppm. Esta tendência está associada à elevada temperatura de combustão atingida quando se utiliza BD, sendo mais evidente a carga mais elevada. Também a existência de oxigénio no combustível promove a formação de NOx. O número de cetano do BD é superior ao do gasóleo o que permite encurtar o período de ignição reduzindo deste modo o tempo de mistura do ar com o combustível antes da combustão de pré-mistura, daí resultando uma menor quantidade de energia libertada nesta fase, diminuindo as emissões de NOx, atenuando o efeito de aumento verificado pelo facto de a temperatura de combustão ser mais elevada com BD e deste combustível conter oxigénio.</p> <p>O teor de oxigénio do combustível desempenha um papel importantíssimo no desempenho do motor quando abastecido por BD.</p>
(Ramadhas, Jayaraj e Muraleedharan 2010)	<p>Motor monocilíndrico atmosférico, DI, gerador energia elétrica.</p> <p>Banco de testes</p> <p>BD de semente de árvore da borracha e gás de petróleo liquefeito (LPG).</p>	<p>A eficiência térmica é ligeiramente melhorada pela utilização de EGR com a utilização de BD+LPG, pelo que o consumo específico de energia diminui ligeiramente.</p>
(Um e Park 2010)	<p>Estudo de modelação com motores HCCL, considerando a utilização de BD (B0, B10, B20, B50 e B100).</p>	<p>A utilização de BD deteriora a pressão média efetiva essencialmente devido à menor quantidade de energia disponível. As variações ao nível das emissões de CO e NOx são muito ténues, contudo o ligeiro aumento de NOx verificado quando se considera a utilização de BD deve-se ao menor atraso na inflamação.</p>

Referência	Motor, Combustível e Especificações de ensaios	Resumo
(Zhu, et al. 2010)	<p>Motor 4 cilindros, DI atmosférico.</p> <p>Testes em banco de motores a várias cargas e 1800rpm.</p> <p>BD (B0 e B100) e misturado com metanol (BM5, BM10 e BM15) e com etanol (BE5, BE10 e BE15).</p>	<p>Com a utilização de BD aumenta o consumo de combustível (bsfc) acentuado pela utilização de etanol e metanol, fundamentalmente devido à diminuição da energia disponível no combustível.</p> <p>A eficiência térmica é melhor com BD do que com gasóleo devido ao facto de a mistura ser mais pobre. A eficiência térmica também é afetada pela menor quantidade de energia disponível no BD e pelo menor calor latente de vaporização deste combustível o que resulta numa atenuação do efeito da pobreza da mistura.</p> <p>A utilização de BD traduz-se por menores emissões de CO, mas com a utilização de qualquer um dos álcoois aumenta as emissões de CO.</p> <p>As emissões de NOx aumentam com a utilização de BD, mas são diminuídas pela utilização de metanol ou etanol. Este efeito é provocado pelo aumento da temperatura de combustão devida essencialmente ao avanço de injeção e pela disponibilidade de oxigénio.</p> <p>As emissões de partículas são reduzidas com a utilização de BD face ao consumo de gasóleo.</p>
(Yehliu, Boehman e Armas 2010)	<p>Motor common-rail turbo DI com 103kN às 4000rpm.</p> <p>Testes em banco de motores com 4 pontos distintos de funcionamento do motor, sem EGR e com injeção piloto e secundária e com injeção única.</p> <p>BD de soja (B100) e fisher-tropsch.</p>	<p>A pressão média efetiva é constante para todos os modos de operação e combustíveis.</p> <p>O consumo específico de combustível (bsfc) aumenta 10 a 17% quando se utiliza B100 em qualquer dos pontos de funcionamento do motor avaliados.</p> <p>A pré-injeção permite diminuir o ruído do motor as emissões de NOx mas aumenta o consumo de combustível.</p> <p>A eficiência térmica diminui 5-10% com B100, justificando-se este aumento pelo facto de o sistema de injeção não ter sido otimizado para utilizar BD. A utilização de BD promoveu um aumento de pressão e do tempo de injeção compensando o menor conteúdo energético.</p> <p>A diferença existente no nº de cetano entre o BD e o gasóleo afeta apenas a parte inicial da combustão (injeção piloto).</p> <p>Com B100 aumenta a concentração de partículas a carga baixa com injeção única. Com injeção múltipla a concentração de partículas diminui, reduzindo ainda o tamanho médio destas partículas.</p> <p>Com injeção única a utilização de B100 conduz a um aumento das emissões de NOx a cargas altas e aumento de partículas. Com a injeção múltipla as emissões de NOx diminuem, razão pela qual a otimização da injeção permitirá melhorar o rendimento e o impacto ambiental quando se utiliza BD nos motores.</p>

Referência	Motor, Combustível e Especificações de ensaios	Resumo
(Nabi, Schmid e Hustad 2010)	<p>Motor 6 cilindros DI, turbo.</p> <p>Testes em banco de motores a 1400rpm e várias cargas.</p> <p>Utilização de <i>fisher-tropsch</i> e gásóleo com vários aditivos oxigenados.</p>	<p>As variações de consumo de energia (bsec) não são muito significativas para os vários combustíveis avaliados, tal como no bsfc e na eficiência térmica.</p> <p>As emissões de CO, HC, fumo e ruído são mais reduzidas com <i>fisher-tropsch</i> do que com gásóleo.</p>
(Kegl 2011)	<p>Motor 6 cilindros, típico do autocarro, com sistema de injeção mecânico.</p> <p>Testes em banco de motor com vários pontos de funcionamento.</p> <p>BD de colza (B0 e B100).</p>	<p>A utilização de B100 provoca um avanço na injeção e maior pressão de injeção, devido à maior densidade, viscosidade, compressibilidade e menor conteúdo em vapor a pressões elevadas. O avanço na injeção traduz-se por aumento da pressão e temperatura do cilindro, devido a um aumento prematuro da taxa de libertação de calor da combustão. Este processo justifica que os valores máximos de pressão no cilindro e da taxa de libertação de energia sejam mais baixos que os obtidos com gásóleo devido à maior energia necessária para a vaporização do B100.</p> <p>Com B100 verifica-se uma diminuição das emissões de CO e fumo, e um aumento das emissões de HC. Ocorre o aumento de período favorável para a formação de NOx provocado pela antecipação dos valores máximos de temperatura no cilindro e da taxa de libertação de calor durante a combustão. Para a emissão de NOx, mais influente que a magnitude da temperatura máxima e da taxa de libertação de calor é o instante em que esses valores máximos ocorrem</p>
(Ozsezen e Canakci 2011)	<p>Motor 6 cilindros atmosférico, sistema injeção mecânica.</p> <p>Testes em banco de motores com carga máxima a várias rotações (1000 a 2000rpm).</p> <p>BD de óleos vegetais usados, palma e canola (B0 e B100).</p>	<p>10 a 12% da composição mássica do BD é oxigénio.</p> <p>A pressão no cilindro e a duração da combustão é maior com BD do que com gásóleo. Os fatores que contribuem para esta manifestação são o número de cetano, o ponto de ebulição, o conteúdo em oxigénio e o avanço à ignição). A fase de pré-mistura da combustão é maior com BD do que com gásóleo devido ao facto de a vaporização do BD ser mais lenta. Para todas as velocidades de rotação do motor avaliadas o atraso na ignição é mais curto com BD do que com gásóleo.</p> <p>A humidade apresenta um efeito significativo sobre as emissões de NOx. O avanço no início da ignição diminui a formação de fumo, HC e CO mas aumenta a emissão de NOx, sendo a este nível registada também a diferença em função do grau de saturação do BD. Os valores mais elevados de NOx correspondem a situações de atrasos na ignição mais curtos e injeções mais prematuras. Ao nível das emissões, com a utilização de BD consegue-se uma diminuição de 5.8% de CO₂, diminuição do fumo em 56-63%, redução de 59-67% de CO e 17-26% de HC. Em sentido contrário, com BD as emissões de NOx aumentam 11-22%.</p> <p>Com utilização de BD promove uma diminuição da potência desenvolvida pelo motor em 4-5% e um aumento do consumo (bsfc) de 9 a 10%.</p>

Referência	Motor, Combustível e Especificações de ensaios	Resumo
(Bakeas, et al. 2011)	<p>Veículo Mitsubishi L200 com motor 4D5C, DI, <i>common-rail</i>.</p> <p>Testes em banco de rolos ciclos Artemis e NEDC.</p> <p>Bd de soja, palma e óleos vegetais usados (B0, B30, B50 e B80).</p>	<p>Os resultados obtidos pela imposição dos ciclos NEDC e Artemis são diferentes, embora em ambos seja evidente a tendência de aumento de consumo com a utilização de BD.</p> <p>As emissões de CO₂ aumentam 1, 2.4 e 4.2% respetivamente com a utilização de B30, B50 e B80. Verifica-se uma redução das emissões de partículas de 8.7, 11.5 e 8%, respetivamente com B30, B50 e B80, devido ao conteúdo em oxigénio existente no BD. Manifesta-se a correlação entre o teor de insaturados no BD e as emissões de NOx. Quanto maior a % de insaturados no BD maiores as emissões de NOx.</p> <p>Não se regista uma evolução uniforme das emissões de NOx com o aumento do teor de BD no combustível, embora em média seja perceptível uma tendência de aumento todavia com situações de diminuições significativas. O número de iodo é a propriedade que aparenta estabelecer maior relação com as emissões de NOx, estando esta propriedade associada ao teor de ligações duplas e triplas do BD, ou seja do seu grau de saturação.</p> <p>O aumento do número de iodo é propício ao aumento das emissões de NOx. Em suma, a utilização de BD promove um efeito adverso relativamente às emissões de CO₂ e NOx, fomentando diminuições das emissões de partículas, CO e HC. Ainda se adianta que a emissão de compostos hidrocarbonetos aromáticos, a utilização de BD faculta o aumento dos compostos leves mas aumenta as emissões dos mais pesados e compostos com incidência cancerígena.</p>
(Randazzo e Sodr�e 2011)	<p>Veículo com motor turbo DI, EGR.</p> <p>Testes em banco de rolos, ciclo FTP-75 em condições de arranque a frio.</p> <p>BD de soja (B3, B5, B10 e B20).</p>	<p>A utilização de até 20% de BD no combustível (B20) não afeta significativamente o consumo de combustível (sfc).</p> <p>Em situações de arranque a frio, a utilização de B3, B5 e B10 não afeta o tempo de funcionamento a frio do motor, apenas com B20 se regista um ligeiro aumento desse tempo.</p> <p>Em nenhuma das situações testadas se registou qualquer problema no funcionamento do motor a frio.</p>
(Hirkude e Padalkar 2012)	<p>Motor monocilíndrico atmosférico, DI.</p> <p>Testes em banco de motores com rotação a 1500rpm e várias cargas.</p> <p>BD de óleos vegetais usados (B0, B50, B70, B90 e B100).</p>	<p>O consumo de combustível (bsfc) aumenta para todos os combustíveis com BD em 0.31, 0.335, 0.34 e 0.36 kg/kWh para respetivamente B50, B70, B90 e B100, enquanto para gasóleo o consumo específico era de 0.29 kg/kWh. A eficiência térmica diminui com a utilização de BD.</p> <p>A temperatura dos gases de escape aumenta devido à maior viscosidade e densidade do BD e à menor volatilidade sendo responsáveis pela ocorrência de uma combustão mais longa aumentando a temperatura dos gases de escape.</p> <p>As emissões de NOx são 4 a 10% mais altas com BD relativamente ao gasóleo, essencialmente devido ao avanço e à presença de oxigénio no combustível quando se incorpora BD. As emissões de partículas diminuem 23 a 47% quando o motor é abastecido com BD.</p>

Referência	Motor, Combustível e Especificações de ensaios	Resumo
(Wang, et al. 2011)	<p>Motor 4 cilindros turbo, <i>common-rail</i>.</p> <p>Testes estabilizados em banco de motores a várias rotações e cargas.</p> <p>BD de soja (B0, B10, B20, B40, B60, B80 e B100).</p>	<p>Para B20 e B40 ocorre uma melhoria do processo de combustão. Esta afirmação é suportada pela diminuição do consumo (bsfc) de 98.2% e 97.2% respetivamente para B20 e B40 em comparação com gasóleo (100%). A eficiência de combustão é melhorada incrementando a eficiência térmica.</p> <p>A relação ar/combustível diminui com a incorporação de BD, diminuindo com o aumento da carga.</p> <p>A temperatura adiabática de chama medida e calculada com BD é menor do que a obtida para gasóleo o que implica que a temperatura de escape diminui com a utilização de BD.</p> <p>As diferenças do atraso à ignição podem ser desprezadas quando o motor está equipado com sistema <i>common-rail</i>, registando-se uma evolução da taxa de libertação de calor similar.</p> <p>O número de cetano é similar para os combustíveis utilizados (BD e gasóleo).</p> <p>Relativamente à curva de libertação de calor da combustão, apresenta um 1º pico menor para BD devido às diferenças na atomização do <i>spray</i>, e um 2º pico maior com BD que compensa o nível mais baixo de energia libertada na 1ª injeção. O aumento da carga e da rotação acentua esta tendência.</p> <p>O 2º pico da curva de libertação de calor fica mais próximo do ponto morto superior, quando se utiliza BD. Isto é causado por uma combustão incompleta da pré-injeção que vai potenciar o avanço da ignição principal o que resulta no aumento da eficiência térmica, fundamentando uma diminuição da temperatura de escape e aumento da pressão no cilindro que justificando a maior emissão de NOx.</p> <p>A cargas baixas as emissões de NOx são ligeiramente mais baixas quando se utiliza BD devido ao menor poder calorífico deste combustível e ao facto deste conter oxigénio, o que diminui a temperatura de chama no <i>spray</i>. Para cargas elevadas as emissões de NOx são aumentadas com a utilização de BD, fundamentalmente devido a uma taxa de libertação de calor mais concentrada, que aumenta a temperatura e pressão no cilindro e pela existência de oxigénio no BD que neste regime aumenta a temperatura de chama do <i>spray</i> devido à alteração da relação ar/combustível com a carga.</p> <p>Com a utilização de BD reduzem-se as emissões de partículas e CO.</p>