

Biodiesel Obtido de Gordura Animal: Caracterização e Utilização como Combustível

Carla Sofia Santos Ventura

Dissertação do MIEM

Orientador: Prof. José Manuel Ferreira Duarte



**Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica**

Julho de 2010

© Carla Sofia Santos Ventura, 2010

Em memória do meu avô...

Resumo

O consumo excessivo de combustíveis fósseis tem vindo a diminuir consideravelmente as reservas de petróleo, o que levará mais cedo ou mais tarde ao esgotamento destes combustíveis. A necessidade crescente de garantir energias alternativas e os problemas ambientais fazem da produção de uma energia renovável uma solução inevitável para responder a estas preocupações.

A queima de derivados de petróleo contribui fortemente para o aquecimento do clima global devido ao aumento dos níveis de CO₂ na atmosfera, mas as suas reservas estão rapidamente a esgotar-se precisando de uma solução.

A produção de Biodiesel tem sido uma solução adoptada a nível mundial, visto ser uma alternativa promissora aos combustíveis fósseis derivados do petróleo. O seu carácter renovável torna-o uma fonte importante de energia a longo prazo.

O trabalho realizado incide sobre o estudo da gordura animal como matéria-prima de um Biocombustível e sobre a influência desse biocombustível no funcionamento de um motor Diesel.

Neste trabalho será também analisada a influência do biodiesel produzido de gordura animal nas emissões poluentes de um motor diesel.

Para a realização deste estudo, efectuaram-se vários ensaios em laboratório para a caracterização do biodiesel e das gorduras, sendo também realizados vários testes de potência e binário, num banco de rolos, para além da análise das emissões gasosas num automóvel sem qualquer tipo de alteração utilizando biocombustíveis puros e fracções de biodiesel diluídas em diesel fóssil.

Como conclusão pode-se referir que a utilização destes biocombustíveis são uma boa opção para a redução da poluição provocada pelos gases de escape sem que para isso se tenha uma perda de eficiência no motor.

Abstract

The excessive consumption of fossil fuels has been decreasing the oil reserves considerably, which will lead sooner or later to its depletion. The ever growing necessity of guaranteeing alternative energies and the emergence of environmental issues makes the production of rentable energy an inevitable solution to answer these concerns.

The burning of oil derivatives strongly contributes to global warming due to the increase of CO₂, its reserves are also quickly running out and a solution is needed. The production of Biodiesel has been the adopted measure so far worldwide, since it's regarded as a promising alternative to the fossil derived fuels. Its renewable features mean an essential part as an energy resource in the long term.

This essay focuses on the study of animal fat as raw material to the production of a Biofuel and its influence in the performance of a Diesel engine. The influence of the animal fat based Biodiesel in the pollutant emissions produced by the Diesel engine will also be analyzed.

To the achievement of this study several experiments were carried out in labs to characterize the biodiesel and the fat. Horsepower and binary studies were also carried through the use of a dynamometer, along with the analysis of gaseous emissions produced by an uncustomized vehicle using pure Biofuel and portions of Biofuel diluted in Fossil Diesel fuel.

As a conclusion, it can be stated that the use of these Biofuels are a good way to reduce the pollution caused by exhaust fumes without it meaning the loss of engine efficiency.

Agradecimentos

Em primeiro lugar gostaria de agradecer ao meu orientador, Professor José Ferreira Duarte, pela dedicação e atenção demonstrados ao longo de todas as fases do trabalho.

Um agradecimento muito sincero ao Professor Fonseca Almeida, pelo apoio e colaboração no presente projecto na produção dos biocombustíveis e partilha de conhecimentos essenciais para a conclusão do trabalho.

À Eng.^a Joana Dias e ao Eng.^o José Costa pela disponibilidade.

Ao Daniel Pimenta pela colaboração e disponibilidade que demonstrou.

À minha família, que me apoiou sempre ao longo de toda a minha vida e nos momentos mais difíceis.

Não podendo esquecer os amigos, nomeadamente à Engenheira Clara Gouveia pelo apoio e paciência, mas também a todos os outros que sempre me apoiaram.

Ao João Valente pela colaboração e disponibilidade que demonstrou na realização da página da Web.

Ao Vítor Meireles pela colaboração e disponibilidade na realização do Abstract.

Um especial agradecimento ao Rui Monteiro pelo carinho, paciência, pelo apoio nas horas difíceis e principalmente por estar sempre presente.

Índice

Resumo	v
Abstract.....	vii
Agradecimentos.....	ix
Índice	xi
Lista de figuras.....	xv
Lista de tabelas	xix
Glossário de Termos.....	xxi
Capítulo 1.....	1
Introdução.....	1
1.1. Objectivos da Dissertação.....	2
1.2. Estrutura da Dissertação	2
Capítulo 2.....	5
Revisão Bibliográfica	5
2.1. Motor Diesel	5
2.1.1. Introdução histórica.....	5
2.1.1.1. Motor Diesel	6
2.1.2. Princípio de funcionamento do motor	6
2.1.3. Parâmetros de funcionamento.....	10
2.1.3.1. Binário, potência, rendimento e Consumo específico	10
2.1.3.2. Curvas características	11
2.2. Combustíveis fósseis.....	12
2.2.1. Gasolina	12
2.2.2. Gasóleo (Diesel fóssil)	13
2.3. Biocombustíveis.....	14
2.3.1. Introdução histórica.....	16
2.3.2. Biodiesel.....	17
2.3.2.1. Processo de produção.....	18
2.3.2.2. Controlo de qualidade	21
2.3.2.3. Comparação de propriedades do Biodiesel e do Diesel fóssil	22
2.3.2.4. Regulamentação	24
2.3.2.5. Benefícios de utilização	24
2.3.2.6. Inconvenientes	26
2.4. Emissões gasosas.....	27
2.4.1. Dióxido de Carbono (CO ₂).....	30
2.4.2. Monóxido de Carbono (CO).....	31

2.4.3.	Óxidos de Azoto (NO _x).....	31
2.4.4.	Hidrocarbonetos não Queimados (HC)	32
2.5.	Revisão de trabalhos efectuados	32
2.5.1.	Influência do Biodiesel nas emissões poluentes de um motor turbo diesel. [10].....	33
2.5.2.	Estudo da influência do Biodiesel no Funcionamento de um Motor Diesel. [6].....	35
2.5.3.	Influência do Biodiesel na Injecção de um Motor Diesel. [7].....	39
Capítulo 3.....	43	
Metodologias aplicadas	43	
3.1. Objectivos.....	43	
3.2. Amostras	45	
3.3. Automóvel ensaiado.....	46	
3.4. Métodos utilizados.....	47	
Capítulo 4.....	49	
Resultados e Discussão	49	
4.1. Análise laboratorial das matérias-primas (banha e sebo).....	49	
4.1.1. <u>Massa volúmica em função da temperatura</u>	49	
4.1.2. <u>Viscosidade</u>	50	
4.1.2.1. <u>Viscosidade cinemática</u>	50	
4.1.2.2. <u>Viscosidade dinâmica</u>	51	
4.1.3. <u>Poder Calorífico Superior</u>	52	
4.1.4. <u>pH</u>	53	
4.1.5. <u>"Flash Point"</u>	53	
4.1.6. <u>Temperatura de fusão</u>	54	
4.2. Ensaaios no automóvel	54	
4.2.1. <u>Ensaio de Binário e Potência</u>	54	
4.2.1.1. <u>Curvas Potência e Binário</u>	54	
4.2.1.2. <u>Curvas de Binário e Potência normalizadas ao Diesel</u>	56	
4.2.2. <u>Emissões de gases de escape</u>	61	
4.2.2.1. Discussão dos resultados obtidos	61	
1. CO.....	61	
2. CO ₂	64	
3. HC.....	67	
4. O ₂	70	
5. NO _x	73	
Capítulo 5.....	77	
Conclusões e trabalhos futuros	77	
5.1. Conclusões	77	
5.2. Trabalhos futuros	78	
Referências	79	
Anexo A.....	81	
Protocolos experimentais.....	81	
1.1. Análise laboratorial das matérias-primas (banha e sebo).....	81	
1.1.1. <u>Massa volúmica em função da temperatura</u>	81	
1.1.1.1. Material utilizado.....	81	
1.1.1.2. Procedimento experimental.....	82	
1.1.1.3. Determinação	83	
1.1.2. <u>Densidade em função da temperatura</u>	83	
1.1.2.1. – Determinação.....	84	
1.1.3. <u>Viscosidade</u>	84	
1.1.3.1. Material utilizado.....	84	
1.1.3.2. Procedimento experimental.....	85	
1.1.3.3. Determinação	85	
1.1.4. <u>Poder calorífico superior</u>	86	
1.1.4.1. Material utilizado.....	86	

1.1.4.2.	Procedimento experimental.....	86
•	Preparação da pelete:	86
•	Preparação do sistema:	86
1.1.5.	<u>pH</u>	87
1.1.5.1.	Material utilizado.....	87
1.1.5.2.	Procedimento experimental.....	87
1.1.6.	<u>“Flash Point”</u>	88
1.1.6.1.	Material utilizado.....	88
1.1.6.2.	Procedimento experimental.....	88
1.1.7.	<u>Temperatura de fusão</u>	89
1.1.7.1.	Material utilizado.....	89
1.1.7.2.	Procedimento experimental.....	89
1.2.	Ensaio no automóvel.....	90
1.2.1.	<u>Ensaio de Binário e Potência</u>	90
1.2.1.1.	Material usado	90
1.2.1.2.	Equipamento	90
1.2.1.3.	Procedimento [6]	90
1.2.2.	<u>Emissões gasosas</u>	91
1.2.2.1.	Material utilizado.....	91
1.2.2.2.	Equipamento	91
1.2.2.3.	Procedimento	91
Anexo B		93
Propriedades dos biocombustíveis ensaiados:		93
Anexo C		95
Propriedades da água para uma gama de temperaturas de 0º-100º C		95
Anexo D		97
Resultados experimentais		97
Anexo E		99
Dados obtidos na análise dos gases de escape.....		99
1.	Diesel fóssil BP	99
2.	Biodiesel de banha - B100	100
3.	Biodiesel de banha – B75	100
4.	Biodiesel de banha – B50	101
5.	Biodiesel de banha – B25	101
6.	Biodiesel de sebo de bovino - B100	102
7.	Biodiesel de sebo – B75	102
8.	Biodiesel de sebo – B50	103
9.	Biodiesel de sebo – B25	103
Anexo F1		105
Ensaio de potência e binário - 100% Diesel.....		105
Anexo F2		107
Ensaio de potência e binário - 100% Biodiesel Banha de porco		107
Anexo F3		109
Ensaio de potência e binário - 75% Biodiesel Banha de porco		109
Anexo F4		111
Ensaio de potência e binário - 50% Biodiesel Banha de porco		111
Anexo F5		113

Ensaio de potência e binário - 25% Biodiesel Banha de porco	113
Anexo F6	115
Ensaio de potência e binário - 100% Biodiesel Sebo de bovino	115
Anexo F7	117
Ensaio de potência e binário - 75% Biodiesel Sebo de bovino.....	117
Anexo F8	119
Ensaio de potência e binário - 50% Biodiesel Sebo de bovino.....	119
Anexo F9	121
Ensaio de potência e binário - 25% Biodiesel Sebo de bovino.....	121

Lista de figuras

Figura 1.1 – Produção de Biodiesel. [21]	2
Figura 2.1 – Sistema biela-manivela. [3] Figura 2.2 – Pontos mortos do motor. [9]	7
Figura 2.3 – Os 4 tempos do motor de ignição por compressão (Diesel) [19]	9
Figura 2.4: a)- Curvas características do motor Diesel. b) – Variação do consumo específico e do binário com o coeficiente de excesso de ar [1]	11
Figura 2.5 – a) Potencial de produção de CO ₂ de alguns Combustíveis b) Produção de CO ₂ função da relação entre átomos de hidrogénio e carbono [1]	14
Figura 2.6 – Propriedades de alguns combustíveis. [1]	14
Figura 2.7 – Diagrama processual esquemático do processo de produção de biodiesel. [20]	19
Figura 2.8 – Reacção de transesterificação [7]	21
Figura 2.9 – Parâmetros e limites da Norma EN 14214:2003. [5]	22
Figura 2.10 – Comparação das emissões GEE emitidas aquando da queima do gasóleo ou biodiesel verifica-se que este não emite Dióxido de Enxofre (SO ₂) e emite em quantidades inferiores Monóxido de Carbono (CO), Dióxido de Carbono (CO ₂) e Partículas (PM) [12]	26
Figura 2.11 – Diagramas de processo de combustão num motor de combustão interna. No primeiro está representado o processo de uma combustão ideal, no segundo está representado o processo de combustão real. [10]	28
Figura 2.12 – Produção de poluentes em função da riqueza da mistura. [1]	30
Figura 2.13 – Emissão de NOx em função da rotação do motor para os combustíveis ensaiados. [10]	33
Figura 2.14 – Emissão de CO ₂ em função da rotação do motor para os combustíveis ensaiados. [10]	34
Figura 2.15 – Emissão de HC em função da rotação do motor para os combustíveis ensaiados. [10]	34
Figura 2.16 – Percentagem de O ₂ nos gases de escape em função da rotação do motor para os combustíveis ensaiados. [10]	34
Figura 2.17 – Massa Volúmica dos combustíveis ensaiados em função da temperatura. [6]	36
Figura 2.18 – Viscosidade Cinemática dos combustíveis ensaiados em função da temperatura. [6]	37

Figura 2.19 – Viscosidade Dinâmica dos combustíveis ensaiados em função da temperatura. [6]	37
Figura 2.20 – Curvas de Potência do Fiat Bravo normalizadas ao Diesel. [6]	38
Figura 2.21 – Curvas de Binário do Fiat Bravo normalizadas ao Diesel. [6]	38
Figura 2.22 – Viscosidade Cinemática dos combustíveis normalizada ao Diesel em função da temperatura. [7].....	40
Figura 2.23 – Viscosidade Cinemática do óleo vegetal normalizado ao Biodiesel em função da temperatura. [7].....	40
Figura 3.1 – Corpo da bomba da unidade injectora - Pressão mais alta na entrada do combustível quando a válvula solenóide se abre (O-Ring do corpo da bomba sofre carga mecânica maior); Maior movimento relativo da unidade injectora (desgaste elevado no corpo da bomba). [7]	44
Figura 3.2 – Picnômetros contendo as amostras: No primeiro picnômetro contando da esquerda para a direita temos a Banha de porco, seguido do Sebo de bovino, o terceiro picnômetro contém Biodiesel de Banha e por último o Biodiesel de Sebo.	46
Figura 3.3 – Veículo ensaiado.	47
Figura 4.1 – Massa volúmica das amostras ensaiadas em função da temperatura	50
Figura 4.2 – Viscosidade cinemática das matérias-primas em função da temperatura.	51
Figura 4.3 – Viscosidade dinâmica das matérias-primas em função da temperatura.	52
Figura 4.4 – Curvas de Potência e Binário dos diferentes Combustíveis	55
Figura 4.5 – Curvas de Potência e Binário relativas às misturas B25, B50, B75, B100 do Biodiesel de Banha de Porco.....	55
Figura 4.6 – Curvas de Potência e Binário relativas às misturas B25, B50, B75, B100 do Biodiesel de Sebo de Bovino.	56
Figura 4.7 – Curvas de Potência normalizadas relativas aos diferentes combustíveis.....	57
Figura 4.8 – Curvas de Binário normalizadas relativas aos diferentes combustíveis.....	57
Figura 4.9 – Curvas de potência normalizadas relativas às misturas B25, B50, B75, B100 do Biodiesel de Banha de Porco.....	58
Figura 4.10 – Curvas de Binário normalizadas relativas às misturas B25, B50, B75, B100 do Biodiesel de Banha de Porco.....	59
Figura 4.11 – Curvas de potência normalizadas relativas às misturas B25, B50, B75, B100 do Biodiesel de Sebo de Bovino.	60
Figura 4.12 – Curvas de Binário normalizadas relativas às misturas B25, B50, B75, B100 do Biodiesel de Sebo de Bovino.	60
Figura 4.13 – Emissão de CO em função da rotação para os diferentes combustíveis.	62
Figura 4.14 – Emissão de CO em função da rotação do motor para diferentes percentagens de biodiesel de banha.	63
Figura 4.15 – Emissão de CO em função da rotação do motor para diferentes percentagens de biodiesel de sebo de bovino.	64

Figura 4.16 – Emissão de CO ₂ em função da rotação do motor para os diferentes combustíveis.	65
Figura 4.17 – Emissão de CO ₂ em função da rotação do motor para diferentes percentagens de biodiesel de banha.	66
Figura 4.18 – Emissão de CO ₂ para os vários regimes para o biodiesel de sebo.....	67
Figura 4.19 – Emissão de HC em função da rotação do motor para diferentes combustíveis.	68
Figura 4.20 – Emissão de HC em função da rotação do motor para diferentes percentagens de biodiesel de banha.	69
Figura 4.21 – Emissão de HC em função da rotação do motor para diferentes percentagens de biodiesel de sebo.	70
Figura 4.22 – Emissão de O ₂ em função da rotação do motor para diferentes combustíveis.	71
Figura 4.23 – Emissão de O ₂ em função da rotação do motor para diferentes percentagens de biodiesel de banha.	72
Figura 4.24 – Emissão de O ₂ em função da rotação do motor para diferentes percentagens de biodiesel de sebo de bovino.	72
Figura 4.25 – Emissão de NO _x em função da rotação do motor para diferentes combustíveis.	74
Figura 4.26 – Emissão de NO _x em função da rotação do motor para diferentes percentagens de biodiesel de banha.	74
Figura 4.27 – Emissão de NO _x em função da rotação do motor para diferentes percentagens de biodiesel de sebo.	75
Figura A1 – Material utilizado	Figura A2 – Calibração dos picnómetros 82
Figura A3 – Banho de precisão para viscosímetros	Figura A4 – Viscosímetro [5] 85
Figura A5 – Flash Point testers.....	88
Figura A6 – Esquema das alterações introduzidas no sistema de alimentação e retorno de combustível do automóvel utilizado nos ensaios realizados. [10]	90
Figura A7 – Banco de Rolos.	91
Figura A8 – Equipamento de análise de gases Stargas 898. [10]	92

Lista de tabelas

Tabela 2.1 — Viscosidade cinemática da gasolina a diferentes temperaturas [7]	13
Tabela 2.2 — Comparação de algumas propriedades de Diesel e Biodiesel [10]	23
Tabela 2.3 — Limites de emissão de poluentes para automóveis na União Europeia. [1,7,10,24]	29
Tabela 2.4 — Resultados das determinações do PCS [7]	36
Tabela 2.5 — Resultados das determinações do PCS (cal/g) [7].....	39
Tabela 2.6 — Resultados das determinações das viscosidades a 40°C (mm ² /s). [7]	40
Tabela 3.1 — Análises e métodos utilizados na determinação das propriedades físico-químicas das amostras.	47
Tabela 3.2 — Ensaio efectuado no automóvel.....	48
Tabela 4.1 — Resultados da determinação da massa volúmica para diferentes temperaturas (kg/m ³)	49
Tabela 4.2 — Resultados da determinação da viscosidade cinemática para diferentes temperaturas (mm ² /s).....	50
Tabela 4.3 — Resultados da determinação da viscosidade dinâmica para diferentes temperaturas (Pa/s).....	52
Tabela 4.4 — Resultados das determinações do PCS (cal/g)	53
Tabela 4.5 — pH das matérias-primas	53
Tabela 4.6 — Resultados das determinações do “Flash Point”	53
Tabela 4.7 — Temperatura de fusão das matérias-primas	54
Tabela 4.8 — Dados recolhidos dos níveis de CO (%Vol.) para cada combustível	61
Tabela 4.9 — Dados recolhidos dos níveis de CO (%Vol.) para cada combustível	62
Tabela 4.10 — Dados recolhidos dos níveis de CO ₂ (% Vol.) para cada combustível.	64
Tabela 4.11 — Dados recolhidos dos níveis de CO ₂ (% Vol.) para cada combustível.	65
Tabela 4.12 — Dados recolhidos dos níveis de HC (ppm Vol.) para cada combustível.	68

Tabela 4.13 — Dados recolhidos dos níveis de HC (ppm Vol.) para cada combustível.	68
Tabela 4.14 — Dados recolhidos dos níveis de O ₂ (% Vol.) para cada combustível.	70
Tabela 4.15 — Dados recolhidos dos níveis de O ₂ (% Vol.) para cada combustível.	71
Tabela 4.16 — Dados recolhidos dos níveis de NO _x (ppm Vol.) para cada combustível.	73
Tabela 4.17 — Dados recolhidos dos níveis de NO _x (ppm Vol.) para cada combustível.	73
Tabela D1 - Resultados obtidos para o cálculo da massa volúmica, nesta tabela está representada a média, o desvio padrão e o coeficiente de variação das 3 medições efectuadas para cada picnómetro.	97
Tabela D2 — Resultados obtidos para o cálculo da massa volúmica para as gorduras.....	97
Tabela D3 — Resultados obtidos para o cálculo da massa volúmica.....	98
Tabela E4 — Dados recolhidos utilizando Diesel fóssil BP.....	99
Tabela E5 — Dados recolhidos utilizando 100% Biodiesel de banha de porco.....	100
Tabela E6 — Dados recolhidos utilizando 75% de Biodiesel de banha de porco.....	100
Tabela E7 — Dados recolhidos utilizando 50% de Biodiesel de banha de porco.....	101
Tabela E8 — Dados recolhidos utilizando 25% de Biodiesel de banha de porco.....	101
Tabela E9 — Dados recolhidos utilizando 100% de Biodiesel de sebo de bovino.....	102
Tabela E10 — Dados recolhidos utilizando 75% de Biodiesel de sebo de bovino.....	102
Tabela E11 — Dados recolhidos utilizando 50% de Biodiesel de sebo de bovino.....	103
Tabela E12 — Dados recolhidos utilizando 25% de Biodiesel de sebo de bovino.....	103

Glossário de Termos

A/F	relação ar-combustível(em massa)
biodiesel	éster metílico produzido a partir de óleos vegetais ou animais
common-rail	sistema de injeção(motores Diesel) no qual uma conduta fornece o combustível a pressão constante a varios injectores
CO	Monóxido de Carbono
CO ₂	Dióxido de Carbono
Euro II	limites europeus de emissões de poluentes
FAME	Fatty Acid Methyl Ester
FEUP	Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
Flash Point	temperatura para a qual se produz naturalmente uma mistura estequiométrica do seu vapor com o ar
HC	Hidrocarbonetos não Queimados
IC	índice de cetano
IO	índice de octano
NO _x	Óxidos de Azoto
O ₂	Oxigénio
PCI	poder calorífico inferior
PCS	poder calorífico superior
PMI	ponto morto inferior
PMS	ponto morto superior
ppm	partes por milhão
ralenti	motor funcionando sem carga resistente
rpm	rotações por minuto

Introdução

O consumo excessivo de combustíveis fósseis tem vindo a diminuir consideravelmente as reservas de petróleo, o que levará mais cedo ou mais tarde ao esgotamento destes combustíveis. A necessidade crescente de garantir energias alternativas e os problemas ambientais fazem da produção de uma energia renovável uma solução inevitável para responder a estas preocupações.

Os combustíveis fósseis apresentam constantes alterações no seu valor, assim como na sua importância no nosso mundo desenvolvido, devido à sua maior escassez e aos inconvenientes da sua utilização, para as quais o mundo actual está mais sensível. A economia mundial está tão dependente deles que o simples aumento do preço do barril de petróleo influencia fortemente as bolsas de valores e consequentemente a economia mundial.

Quanto ao problema ambiental, a queima de derivados de petróleo contribui fortemente para o aquecimento do clima global devido ao aumento dos níveis de CO₂ na atmosfera, mas as suas reservas estão rapidamente a esgotar-se precisando de uma solução.

A produção de Biodiesel tem sido uma solução adoptada a nível mundial, visto ser uma alternativa promissora aos combustíveis fósseis derivados do petróleo. O seu carácter renovável torna-o uma fonte importante de energia a longo prazo. [10]

A produção de biodiesel, ano após ano, tende a aumentar como se pode verificar na figura 1.1.

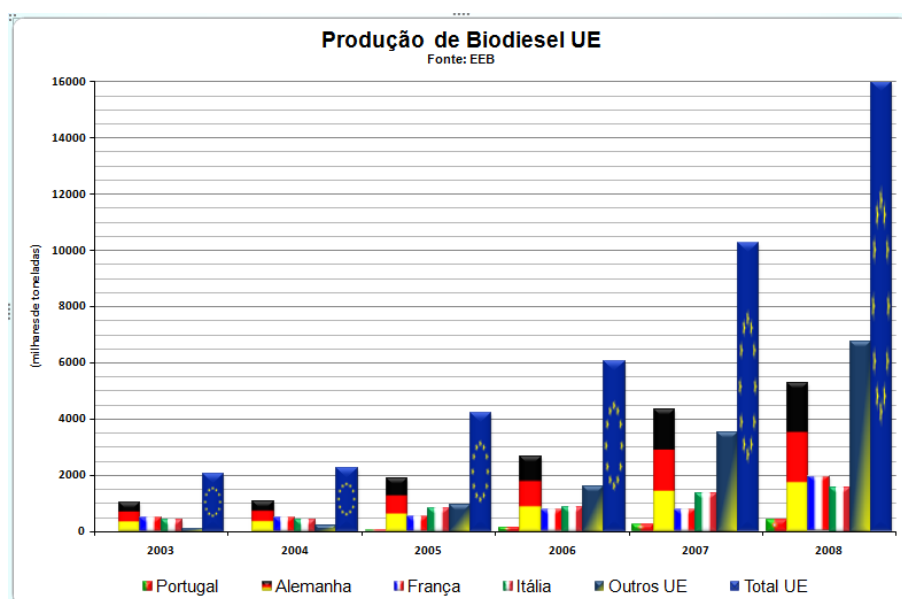


Figura 1.1 – Produção de Biodiesel. [21]

Muitos trabalhos têm sido realizados sobre a produção e utilização de biodiesel.

O trabalho realizado incide sobre o estudo da gordura animal como matéria-prima de um Biocombustível e sobre a influência desse biocombustível no funcionamento de um motor Diesel.

Neste trabalho será também analisada a influência do biodiesel produzido de gordura animal, nas emissões poluentes de um motor diesel.

1.1. Objectivos da Dissertação

Este trabalho tem dois objectivos principais:

- Análise das características da gordura animal, matéria-prima utilizada na produção de biodiesel e do biodiesel obtido.
- Análise da influência do biodiesel de gordura animal:
 - No funcionamento de um motor Diesel;
 - Nas emissões gasosas de um motor Diesel.

1.2. Estrutura da Dissertação

Esta dissertação é constituída por 5 capítulos.

No capítulo 1 apresenta-se uma breve introdução do assunto a ser estudado, os objectivos principais e a estrutura da dissertação.

O Capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica sobre os diversos assuntos relevantes para esta dissertação. Os temas abordados são os motores Diesel, os combustíveis, os

biocombustíveis e os gases de escape. Por último descrevem-se alguns estudos já efectuados sobre a utilização de biocombustíveis nesses motores.

O capítulo 3 apresenta as metodologias utilizadas para efectuar o presente trabalho, assim como, os objectivos apresentados no subcapítulo 3.1, a descrição das amostras e do automóvel utilizado nos ensaios (subcapítulo 3.2 e 3.3) e por fim, no subcapítulo 3.4 os métodos utilizados.

Os resultados obtidos serão apresentados e discutidos no capítulo 4.

O capítulo 5 apresenta as conclusões obtidas assim como, os algumas sugestões para estudos futuros.

Revisão Bibliográfica

O capítulo 2 apresenta uma síntese bibliográfica com informação necessária para se compreender os aspectos relevantes para o estudo da influência do Biodiesel de gordura animal no funcionamento de um motor diesel.

O ponto 2.1 pretende descrever, de uma forma simples, o motor Diesel. Neste subcapítulo encontra-se uma breve introdução histórica, os princípios de funcionamento do motor, alguns parâmetros importantes de funcionamento.

No ponto 2.2 pretende descrever, de uma forma simples, o que são os principais combustíveis fosseis utilizados (gasolina e gasóleo).

No ponto 2.3 apresenta-se os biocombustíveis, este subcapítulo dará maior destaque ao biodiesel.

O ponto 2.4 apresenta as principais emissões gasosas poluentes inerentes à utilização de motores operando sob o ciclo diesel.

Por último, no ponto 2.5 descreve alguns estudos efectuados sobre a utilização de biodiesel nesses motores.

2.1. Motor Diesel

2.1.1. Introdução histórica

Desenvolvido no final do século XIX, o motor de combustão interna é uma das invenções com maior impacto na sociedade e no nível de vida das populações.

Este tipo de motor, assim chamado, devido à sua combustão decorrer dentro de uma câmara que contém também um pistão responsável pela criação do movimento. Este apresenta elevadas potências e elevada eficiência para o seu tamanho.

Os dois tipos de motores de combustão interna mais importantes são o motor a gasolina e o motor a gasóleo ou motor Diesel (assim chamado por ter sido inventado pelo engenheiro alemão Christian Karl Diesel¹). [2]

¹ Christian Karl Diesel- Engenheiro mecânico alemão, nasceu em 1858, em Paris, e morreu em 1913, no mar do Canal da Mancha. Diesel inventou o motor de combustão interna baptizado com o seu nome.[2]

2.1.1.1. Motor Diesel

Os pioneiros dos motores que queimam óleo (Diesel) foram dois ingleses, William Priestman em 1885 e Herbert Stuart em 1890 e um alemão Emil Capitaine em 1885. Estes motores não eram de combustão a pressão constantes, denominados por semi Diesel. [1]

A criação do primeiro motor a combustão a pressão constante, data do dia 10 de Agosto de 1893.

Foi criado por Rudolf Christian Karl Diesel, em Augsburg, na Alemanha, e por isso baptizado com seu nome.

Em 1895, Diesel desenvolveu um protótipo que funcionou com uma eficiência de 16% e em 1897 chegou aos 26,2%, sendo denominado “motor térmico racional”. [1]

Alguns anos depois, o motor foi oficialmente apresentado na Feira Mundial de Paris, França, no ano de 1898. O combustível então utilizado era óleo de amendoim. Nesse mesmo ano foram vendidos os primeiros motores por M.A.N. e Krupp, estas companhias apoiaram o seu desenvolvimento, o único problema foi a manutenção destas máquinas. [1]

Apto para trabalhar com grande eficiência e economia, o motor diesel depressa conquistou os mercados.

As características principais destes motores, ainda hoje se mantêm, nomeadamente a admissão do ar sem mistura de combustível e a compressão deste ar a pressões elevadas, o que provoca temperaturas muito acima do ponto de inflamação do combustível e inflamação espontânea deste ao ser introduzido na câmara de combustão, pelo contacto com o ar assim aquecido. O objectivo era o aproveitamento máximo do poder calorífico do combustível. São considerados ainda hoje os motores mais económicos com aproveitamentos superiores a 40%. [2]

Assim sendo, cerca de 100 anos depois, este motor continua a ser o mais económico e eficiente. [1]

2.1.2.Princípio de funcionamento do motor

O motor de combustão interna aproveita o aumento de pressão resultante da combustão da mistura ar-combustível para imprimir um movimento de rotação ao veio motor. O motor é constituído por cilindros, dentro dos quais deslizam pistões ligados a uma manivela (veio motor, denominado cambota) pelas bielas (Figura2.1). Se fizermos rodar a cambota, os pistões sobem e descem nos diversos cilindros. Inversamente, o pistão submetido a elevadas pressões, faz rodar a cambota. Para que o motor não pare quando um pistão estiver a comprimir ar num cilindro, ou para que não tenha um andamento muito irregular, uma extremidade da cambota é munida de um volante de inércia, que acumula energia cinética.

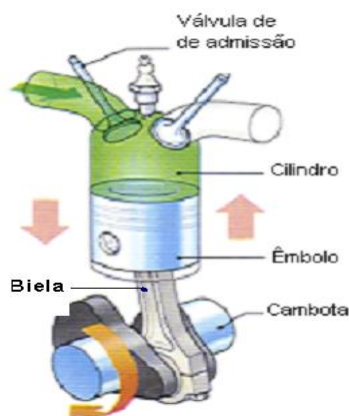


Figura 2.1 – Sistema biela-manivela. [3]

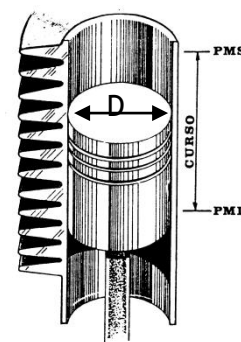


Figura 2.2 – Pontos mortos do motor. [9]

O ponto mais alto que o pistão pode atingir dentro do cilindro denomina-se ponto morto superior ou PMS (Figura 2.2). O ponto mais baixo denomina-se ponto morto inferior ou PMI. A distância percorrida pelo pistão entre esses dois pontos designa-se por curso e o raio da manivela é metade do curso.

Quando se fala das características de um motor cita-se o diâmetro interior de cada cilindro (D – Figura 2.2), seguido do curso (ex.: $D \times C = 80 \times 72$ mm), geralmente por esta ordem.

Num motor de explosão o curso pode ser maior ou menor que o diâmetro. Mantendo o volume do cilindro, pode-se aumentar ao diâmetro e diminuir ao curso, ou vice-versa. Ao diminuir o curso, reduz-se a velocidade linear do pistão, se o motor rodar à mesma velocidade de rotação, ou conseguem-se maiores velocidades de rotação para a mesma velocidade linear do pistão. Assim, a relação curso-diâmetro é muito importante para as características de um motor. Por exemplo, um motor com cilindros de grande diâmetro apresenta maior espaço para colocação das válvulas à cabeça, facilitando o enchimento e descarga dos gases.

Pelas razões acima apontadas, há bastante interesse em reduzir o curso aos motores, chegando a valores iguais ou mesmo inferiores ao diâmetro. Nestes casos os motores denominam-se quadrados (curso igual ao diâmetro) ou super-quadrados ($C < D$). O inconveniente dos motores excessivamente super-quadrados, é que as perdas de compressão são proporcionais ao perímetro dos pistões e as câmaras de combustão de elevado diâmetro não queimam bem e têm elevadas perdas térmicas.

A cilindrada ou volume varrido é o volume total deslocado pelo pistão entre o PMI e o PMS cuja base é a sua secção e a altura é o curso do pistão.

À soma dos volumes varridos de todos os cilindros dá-se o nome de cilindrada do motor. Se um motor tiver um número n de cilindros de diâmetro D e curso C a sua cilindrada será (em cm^3):

$$V = n \times C \times D^2 \times \frac{\pi}{4} \quad (1.1)$$

Quando o pistão se encontra no PMS, existe um espaço livre por cima da cabeça do pistão. É nesse volume que se inicia a combustão e por isso se denomina câmara de

combustão. Para se determinar o seu volume, basta enchê-la de óleo (ou de um outro líquido através do orifício da vela ou do injector), com a ajuda de uma proveta ou seringa graduada, quando o pistão se encontra no PMS.

Se dividirmos o volume total por cima da cabeça do pistão quando este está em PMI por o valor quando ele está em PMS, obtemos a taxa de compressão do motor. Sendo assim esta é dada por:

$$\mathcal{E} = \frac{V_{PMI}}{V_{PMS}} = \frac{V_{varrido} + V_{cc}}{V_{cc}} \quad (1.2)$$

no qual V_{cc} é o volume da câmara de combustão. [1]

Quanto menor for seu volume, maior será essa relação e, conseqüentemente, melhor o rendimento do motor.

Este tipo de motores necessita de elevadas temperaturas no final da compressão, pelo que apresenta elevados valores de taxa de compressão, entre 15 e 22, quase o dobro dos motores a gasolina. [7]

Durante a compressão produz-se no cilindro, não somente um aumento de pressão motivado pela diminuição de volume, mas também uma elevação de temperatura, que elevará ainda mais a pressão. Assim a pressão dos gases no final da compressão é superior à calculada pelo quociente geométrico dos volumes, dever-se-á considerar uma compressão politrópica de expoente próximo de 1.4.

A principal característica do motor a Diesel é o princípio de ignição por compressão que adopta um método especial de preparação do combustível e utiliza os mesmos componentes que o motor a gasolina, mas o seu funcionamento difere sensivelmente.

No motor a gasolina, motor de ignição comandada, o combustível é geralmente misturado com ar proveniente do exterior do cilindro e toda a massa se inflama na câmara de combustão, por meio da faísca proporcionada pelo sistema de ignição.

No motor a Diesel, motor de ignição por compressão, não existe sistema de preparação de mistura exterior nem sistema de ignição. Este aspira ar puro que, submetido à elevada pressão atingida no final da compressão, atinge a temperatura suficiente elevada para garantir a inflamação do combustível (gasóleo) à medida que é injectado no seio do ar.

Como o ar se encontra a elevada pressão, é necessário que o combustível seja introduzido a uma pressão ainda superior, para o qual é indispensável o uso de um sistema de injeção a alta pressão. Este sistema, comprime e fornece o gasóleo a cada cilindro na altura e com quantidade exacta a fim de permitir uma combustão suave. [1]

De seguida estão representadas as diferentes fases do ciclo (Figura 2.3). [1,7,9]

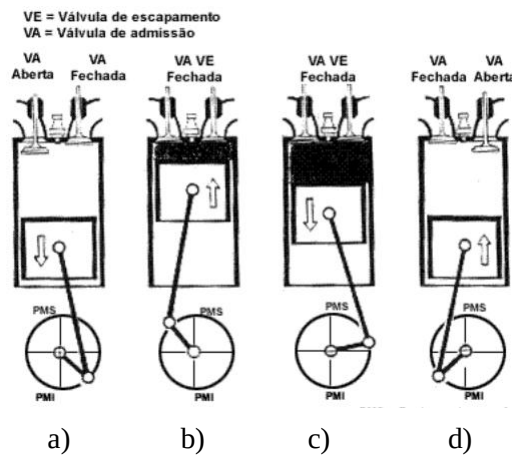


Figura 2.3 – Os 4 tempos do motor de ignição por compressão (Diesel) [19]

- Admissão – O pistão parte de PMS, descendo até ao PMI. A válvula de admissão encontra-se aberta e dá-se a admissão do ar puro dentro do cilindro, enchendo-o. A válvula de admissão abre antes da chegada do pistão ao PMS. Este avanço serve para que a inércia dos gases de escape ainda a sair a grande velocidade pela respectiva válvula, provoquem a aspiração do ar de admissão, lavando o cilindro dos gases de escape. Figura2.3 a)
- Compressão – Com as válvulas de admissão e escape fechadas, o pistão regressa ao PMS comprimindo o ar puro encerrado no cilindro, provocando o seu aquecimento. Figura2.3 b)
- Explosão-Expansão – Começando no PMS ou antes (avanço), o combustível é injectado no ar quente, inflamando-se em contacto com este, obrigando a descida do pistão até PMI. A injeção (e a combustão) continua durante parte da descida do pistão, sendo este o tempo motor. Na prática, a injeção é sempre feita com avanço (antes do PMS) para que a combustão inicie de modo a que a pressão máxima do ciclo ocorra depois do PMS, de maneira a aumentar a componente de pressão útil. Figura2.3 c)
- Escape – Quando o pistão chega ao PMI a válvula de escape abre-se permitindo que os gases queimados sejam descarregados para a atmosfera, através do sistema de escape, durante a subida do pistão.
- Na prática, a válvula de escape (VE) abre alguns graus antes (avanço) do ponto morto inferior PMI, com a função da extracção dos gases queimados do cilindro o mais cedo possível, fazendo com que o pistão não encontre muita resistência durante o curso ascendente de escape e assim não incorra em muitas perdas por bombagem. Figura2.3 d)

2.1.3. Parâmetros de funcionamento

2.1.3.1. Binário, potência, rendimento e Consumo específico

A especificação de um motor é geralmente dada pelos valores de potência e binário máximos. O binário (B , em N.m) é medido por um freio dinamométrico (ver capítulo 3) e o produto do binário com a velocidade de rotação (Ω , em rad/s, N em rot/s) dá-nos a potência útil ou efectiva (em J):

$$\dot{W}_e = B \times \Omega = 2\pi NB \quad (1.3)$$

Simplificadamente, o binário mostra o trabalho produzido enquanto a potência específica a taxa a que esse trabalho é produzido.

Outros parâmetros importantes que nos dão a maneira como o combustível é transformado em trabalho são o rendimento total (η_T) e o consumo específico (C_s), este é dado em massa de combustível por trabalho efectuado pelo motor (em g/J ou g/kW.h):

$$\eta_T = \frac{\dot{W}_e}{\dot{m}_f \times Q_{pi}} \quad (1.4)$$

e

$$C_s = \frac{\dot{m}_f}{\dot{W}_e} \quad (1.5)$$

nos quais

$\dot{m}_f$ – caudal de combustível [g/s]

Q_{pi} – Poder calorífico (inferior a pressão constante) do combustível [J/g]

Ambos os conceitos mostram a eficiência da conversão de energia num motor.

Só podemos comparar diferentes motores através dos rendimentos, devido a diferentes combustíveis terem diferentes poderes caloríficos.

O rendimento total também pode ser visto como um produto de vários rendimentos, que nos dá a relação entre o trabalho produzido pelo motor e a energia do combustível que nele é queimado.

Assim o rendimento total será:

$$\eta_T = \eta_c \times \eta_A \times \eta_t \times \eta_p \times \eta_l \times \eta_B \times \eta_M \quad (1.6)$$

como o rendimento indicado é:

$$\eta_i = \eta_c \times \eta_A \times \eta_p \times \eta_l \times \eta_B \quad (1.7)$$

temos :

$$\eta_T = \eta_t \times \eta_i \times \eta_M = \frac{W_t}{m_f Q_{pi}} \times \frac{W_i}{W_t} \times \frac{W_e}{W_i} \quad (1.8)$$

O rendimento teórico dá-nos a relação entre o calor que é aproveitado no fluido e o trabalho que teoricamente será possível produzir-se.

O rendimento mecânico relaciona o trabalho produzido no interior dos cilindros com o disponível no veio do motor. Os valores variam entre 75 % (velocidade máxima) e 90 % (cerca de 2000 RPM). Estes valores são correspondentes a carga total, diminuindo o rendimento mecânico com o abaixamento da carga. [1]

2.1.3.2. Curvas características

As curvas características de um motor definem o trabalho e a potência que o motor realiza. Estas curvas mostram a variação da potência, do binário e do consumo específico de combustível com a variação da velocidade do motor e estas são obtidas, por ensaio, a carga constante, num banco dinamómetro (ver capítulo 3).

Num motor Diesel lento (Figura 2.4 a)) as curvas são mais suaves, em virtude do binário ser praticamente constante a todas as rotações. Desta maneira a potência aumentaria até que o motor partisse, e para que tal não aconteça, é necessário haver um corte da injeção a uma determinada velocidade de rotação, para a qual se obtém, geralmente, a máxima potência.

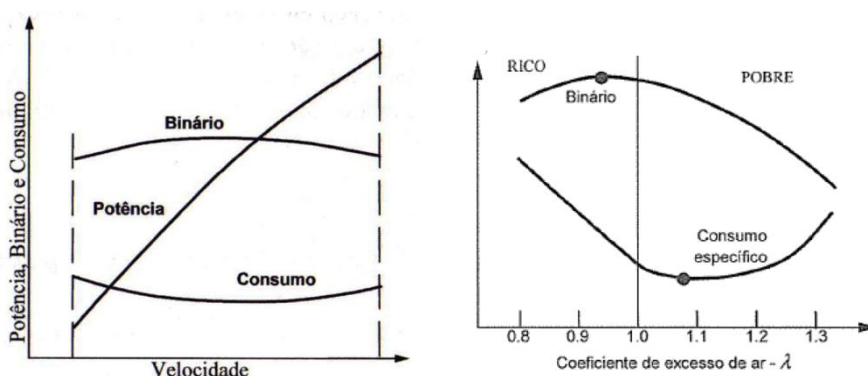


Figura 2.4: a)- Curvas características do motor Diesel. b) – Variação do consumo específico e do binário com o coeficiente de excesso de ar [1]

Se desenharmos as curvas de consumo específico (g/kWh) em função do excesso de ar λ (Figura 2.4 b)), podemos verificar que o mínimo aparece para misturas pobres, enquanto o valor máximo da pme (binário) aparece para misturas ricas. Para misturas pobres, todo o combustível é queimado melhorando o rendimento, enquanto para misturas ricas todo o ar é consumido, aumentando o binário. Ao observar a curva de consumo específico nota-se que a curva é bastante inclinada para misturas ricas, pois quanto mais rica for a mistura mais inqueimados aparecem no escape. Para misturas bastante pobres, a combustão começa a ser menos eficiente (lenta) e haverá problemas de extinção de chama e ciclos em que não haverá combustão, baixando drasticamente o rendimento (aumento do consumo). [1]

2.2. Combustíveis fósseis

“Combustíveis fósseis são substâncias formadas, em tempos geológicos recuados, por fossilização de matéria orgânica e que se podem combinar com o oxigénio, libertando energia com elevação da temperatura. Na sua formação intervêm factores como a pressão, o calor, o tempo e a acção de bactérias anaeróbicas. Os combustíveis fósseis ocorrem na crosta terrestre sob a forma sólida (carvões), líquida (petróleo bruto) e gasosa (gás natural).

Como recursos naturais não renováveis, os combustíveis fósseis encontram-se próximo do seu esgotamento. No entanto, constituem o recurso energético mais utilizado pelo Homem. Cerca de 75% da energia consumida a nível mundial provém dos combustíveis fósseis.

A utilização dos combustíveis fósseis apresenta, contudo, grandes desvantagens, não só para o meio ambiente como também para os seres vivos, de uma maneira geral, e para o ser humano, em particular. No caso do petróleo, cujas reservas poderão esgotar-se daqui por 100 anos, as desvantagens prendem-se com a emissão de grandes quantidades de dióxido de carbono, que é um dos principais poluentes da atmosfera e que contribui para o aumento do efeito de estufa, e da poluição e destruição de ecossistemas aquáticos, devido a acidentes no transporte deste combustível. A utilização do carvão como fonte energética provoca, por sua vez, alterações graves ao nível dos solos, da atmosfera e dos recursos hídricos, principalmente devidas a emissões de dióxido de enxofre que provocam chuvas ácidas e a acidificação dos solos. O uso deste recurso energético é responsável pela emissão de outros gases poluentes, como o dióxido de carbono, que aumentam o efeito de estufa e o consequente aquecimento global do planeta.” [2]

2.2.1. Gasolina

“A gasolina consiste numa mistura de hidrocarbonetos cuja composição varia segundo o método de obtenção. É constituída na sua maior parte por alcanos contendo 5 a 8 átomos de carbono, contendo também cicloalcanos, hidrocarbonetos aromáticos e, ocasionalmente, alcenos.” [2]

A gasolina é um produto da destilação fraccionada do petróleo bruto contendo inúmeros hidrocarbonetos com temperaturas de ebulição variando entre 25 °C e 250 °C e tem uma densidade entre 0,72 e 0,76.

Na combustão da gasolina obtém-se dióxido de carbono e água.

A qualidade das gasolinas para motores encontra-se directamente relacionada com o seu poder antidetonante. Este é medido pelo denominado índice de octano, característica mais importantes dos combustíveis utilizados em motores de ignição comandada, que varia entre 80 a 90 na gasolina normal e entre 90 a 100 em supercarburantes.

Esta propriedade vai determinar a taxa de compressão possível neste tipo de motores e também, indirectamente, a sua velocidade de combustão. Assim um combustível de elevado

índice de octano tem a possibilidade de queimar mais eficientemente, pois pode ser utilizado num motor com elevada taxa de compressão.

Mas se esse combustível for queimado num motor de taxa de compressão baixa, dele se obterá o mesmo rendimento que dum combustível de menor índice de octano (IO). A emissão de poluentes também será a mesma, com a exceção dos elementos adicionados ao combustível para aumentar o seu IO (antigamente os compostos de chumbo).

Adicionando-se tetraetilo de chumbo, este permite melhorar o índice de octano, mas a quantidade adicionada não deve exceder os 0,6%, para evitar a contaminação atmosférica produzida pelo chumbo contido nos gases de escape dos veículos.

O Poder Calorífico Superior (PCS) da gasolina é cerca de 10.600 KJ. O Poder Calorífico Inferior (PCI) é cerca de 10515 KJ. [1,2]

Na tabela 2.1 estão referidas as viscosidades cinemáticas da gasolina para várias gamas de temperatura:

Tabela 2.1 — Viscosidade cinemática da gasolina a diferentes temperaturas [7]

T(k)	v(cS)
273,15	0,550
283,15	0,480
293,15	0,430
303,15	0,390
313,15	0,360
323,15	0,320

2.2.2. Gasóleo (Diesel fóssil)

O gasóleo é um produto da destilação fraccionada do petróleo bruto contendo inúmeros hidrocarbonetos com temperaturas de ebulição variando entre 180°C e 360°C. Uma das características mais importantes do gasóleo é ser facilmente auto-inflamável, que se determina com o denominado índice de cetano (IC). Este índice mede o desempenho de um combustível relativamente à auto-inflamação. A lógica da sua medição é semelhante à do índice de octano, pela comparação com dois hidrocarbonetos de referência.

Para o gasóleo os valores correntes de índice de cetano situam-se por volta do valor 50 (54 para o gasóleo aditivado e 56-58 para Biodiesel), mas é preferível valores superiores, de modo a proporcionar funcionamento suave e baixas emissões de poluentes. Sabe-se que o aumento do índice de cetano implica uma diminuição do poder calorífico do combustível, pelo que não interessará aumentar o IC além de um certo valor, pois o consumo aumentaria. O PCS do gasóleo é cerca de 10.340 KJ e o PCI é cerca de 10.280 KJ. [2]

A Figura 2.5 mostra a relação da produção de CO_2 com os átomos de hidrogénio e carbono. Podemos observar que os valores do gasóleo e da gasolina são muito próximos assim como o poder calorífico de ambos (ver tabela da Figura 2.6). Pode-se afirmar assim que para dois automóveis (Diesel e a gasolina) com potência semelhante, o automóvel Diesel vai produzir menos CO_2 dado que também consome menos gasóleo (visto que o rendimento do motor Diesel é superior ao do motor a gasolina). [7]

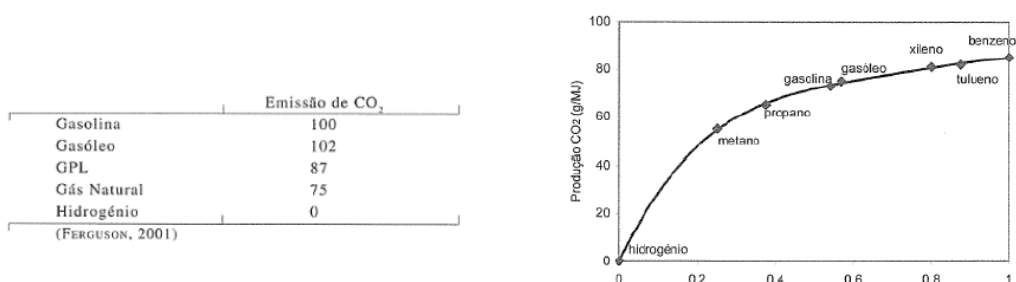


Figura 2.5 – a) Potencial de produção de CO_2 de alguns Combustíveis b) Produção de CO_2 função da relação entre átomos de hidrogénio e carbono [1]

combustível	fórmula	calor latente		calor específico		poder calorífico		poder calor. inf. da mistura esteq.	A/F
		vaporização (kJ/kg)	líquido (kJ/kg.K)	vapor (kJ/kg.K)	superior (MJ/kg)	inferior (MJ/kg)			
gasolina	$\text{C}_8\text{H}_{18.76}$	350	2.4	1.7	47.3	44.0	2.83	14.6	
gasóleo	$\text{C}_{10}\text{H}_{18.86}$	270	2.2	1.7	46.1	43.2	2.79	14.5	
fuel	$\text{C}_8\text{H}_{17.76}$	230	1.9	1.7	45.5	42.8	2.85	14.4	
metano	CH_4	509	0.63	2.2	55.5	50.0	2.72	17.2	
propano	C_3H_8	426	2.5	1.6	50.4	46.4	2.75	15.7	
metanol	CH_3O	1103	2.6	1.72	22.7	20.0	2.68	6.5	
etanol	$\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$	840	2.5	1.93	29.7	26.9	2.69	9.0	
carbono	C				33.8	33.8	2.70	11.5	
monóxido de carbono	CO			1.05	10.1	10.1	2.91	2.5	
hidrogénio	H_2			1.44	142	120	3.4	34.3	

Figura 2.6 – Propriedades de alguns combustíveis. [1]

2.3. Biocombustíveis

O aumento da preocupação ambiental e a necessidade de encontrar uma nova energia renovável estimulou o desenvolvimento de uma nova geração de combustíveis os biocombustíveis.

Biocombustível define-se como um combustível, líquido ou gasoso, para transportes, produzido a partir de biomassa, sendo esta fracção biodegradável de produtos e resíduos provenientes da agricultura (incluindo substâncias vegetais ou animais), da silvicultura e das indústrias conexas, bem como, a fracção biodegradável dos resíduos industriais e urbanos. [13]

São considerados biocombustíveis no mínimo os produtos a seguir indicados: [14]

- **“Bioetanol”**: etanol produzido a partir de biomassa e/ou da fracção biodegradável de resíduos, para utilização como Biocombustível;
- **“Biodiesel”**: éster metílico produzido a partir de óleos vegetais ou animais, com qualidade de combustível para motores diesel, para utilização como biocombustível;
- **“Biogás”**: gás combustível produzido a partir de biomassa e/ou da fracção biodegradável de resíduos, que pode ser purificado até à qualidade do gás natural, para utilização como biocombustível, ou gás de madeira;
- **“Biometanol”**: metanol produzido a partir de biomassa, para utilização como biocombustível;
- **“Bioéter dimetílico”**: éter dimetílico produzido a partir de biomassa, para utilização como biocombustível;
- **“Bio-ETBE (bioéter etil-ter-butílico)”**: ETBE produzido a partir do bioetanol; A percentagem volumétrica de bio-METBE calculada como biocombustível é de 47 %;
- **“Bio-MTBE (bioéter etil-ter-metílico)”**: combustível produzido com base no biometanol. A percentagem volumétrica de bio-MTBE calculada como biocombustível é de 36 %;
- **“Biocombustíveis sintéticos”**: hidrocarbonetos sintéticos ou misturas de hidrocarbonetos sintéticos produzidos a partir de biomassa;
- **“Biohidrogénio”**: hidrogénio produzido a partir de biomassa e/ou da fracção biodegradável de resíduos, para utilização como biocombustível;
- **“Óleo vegetal puro produzido a partir de plantas oleaginosas”**: óleo produzido por pressão, extracção ou métodos comparáveis, a partir de plantas oleaginosas, em bruto ou refinado, mas quimicamente inalterado, quando a sua utilização for compatível com o tipo de motores e os respectivos requisitos relativos a emissões.

2.3.1. Introdução histórica

A ideia de aproveitar os óleos vegetais como matéria-prima para combustíveis não é nova.

Entre 1911 e 1912, Diesel afirmava: “O motor a diesel pode ser alimentado por óleos vegetais, e ajudará no desenvolvimento agrícola dos países que vierem a utilizá-lo... O uso de óleos vegetais como combustível pode parecer insignificante hoje em dia. Mas com o tempo irão se tornar tão importante quanto o petróleo e o carvão são actualmente.”. [5]

Os primeiros motores a diesel eram de injeção por compressão e eram alimentados por petróleo filtrado, óleos vegetais e também óleo de peixe. Durante a década 20 houve uma mudança nesses motores que passaram a ser por injeção directa, impossibilitando o uso de óleos vegetais que apresentavam dificuldades para se obter uma boa combustão, atribuídas à sua elevada viscosidade, que impedia uma adequada injeção.

Para tal situação começou-se a utilizar o gasóleo, um produto até então considerado como resíduo petrolífero. Devido ao preço acessível do gasóleo e à sua abundância, o uso de óleo vegetal foi esquecido e a evolução da tecnologia associada aos motores evoluiu para a exclusividade do uso de combustíveis minerais impossibilitando o uso dos óleos directamente do motor. Devido a esta grande evolução, o petróleo foi ganhando grande importância. [11]

Mas este combustível deixava depósitos de carbono nos cilindros e nos injectores o que requeria uma manutenção intensiva. Com o intuito de resolver esses problemas, foi descoberto, em 1937 por um cientista belga G. Chavanne, a transesterificação o qual diminuía a viscosidade do óleo vegetal e melhorava seu processo de combustão no interior do motor.

Assim, o nome “biodiesel” foi dado por investigadores chineses, em 1988, ao óleo vegetal transesterificado para descrever a sua utilização como combustível em motores de ciclo diesel. [12]

Ao nível químico, o produto da reacção do óleo com o álcool é um éster “monoalquílico” do óleo vegetal, cuja molécula apresenta muita semelhança com as moléculas dos derivados do petróleo e o rendimento térmico do novo combustível era de 95% em relação ao gasóleo. [8]

Na década de 30, o governo francês incentivava as experiências com óleo de amendoim, com o principal objectivo de obter independência energética das principais potências.

Durante a II Guerra Mundial, com o corte do abastecimento do petróleo vários países, como por exemplo, China, Índia e a Bélgica, utilizaram o óleo vegetal como substituto do combustível fóssil.

Em 1941 e 1942 havia uma linha de autocarros entre Bruxelas e Louvain que utilizava combustível obtido a partir do óleo de palma. Porém, o desenvolvimento dos combustíveis de origem vegetal foi praticamente abandonado quando o fornecimento de petróleo foi restabelecido no final da Guerra.

A abundância de petróleo importado, especialmente do Médio Oriente, por preços muito acessíveis, desestimulou a utilização de combustíveis alternativos.

Após a crise energética de 1973 e 1974 e com a elevação dos preços do petróleo em 300%, as pessoas passaram a dar mais valor às energias renováveis, que começaram a ser procuradas como substituto do petróleo.

A dimensão da importância que o petróleo adquiriu pôde ser vista com a crise do petróleo, que elevou os preços em mais de 300% entre 1973 e 1974, porque os países do Médio Oriente descobriram que o petróleo é um bem não renovável e, como tal, atingiria um dia o seu fim.

Os produtores de petróleo diminuíram então a produção, elevando o preço do barril em apenas três meses. As vendas para os EUA e a Europa também foram embargadas nessa época devido ao apoio dado a Israel na Guerra do Yom Kippur (Dia do Perdão)².

Essa crise representou um verdadeiro marco na história energética do Planeta, pois o homem passou a valorizar as energias, posicionando-as em destaque.

Devido aos conflitos entre países, choques petrolíferos, aumento do preço do petróleo, razões ambientais (aquecimento global) e ao fornecimento de subsídios para o desenvolvimento de combustíveis de fontes renováveis, tem-se alterado a situação mundial, tornando estes combustíveis mais atraentes. [12]

A década de 90 foi decisiva para o desenvolvimento tecnológico na utilização do biodiesel.

A necessidade estratégica de diversificar a matriz energética e as preocupações ambientais levaram muitos países, nomeadamente a União Europeia, a investirem em tecnologia e num quadro legislativo que estimule o uso de combustíveis alternativos.

A isenção de imposto sobre os biocombustíveis e o estabelecimento de padrões mínimos de qualidade para a oferta, farão com que a produção aumente nos próximos anos. [13]

2.3.2. Biodiesel

O biodiesel é um derivado de lípidos orgânicos renováveis, como óleos vegetais e gorduras animais, para utilização em motores de ignição por compressão (diesel) sendo obtido principalmente a partir de óleos de colza ou girassol, por um processo químico chamado transesterificação, onde a glicerina é separada da gordura ou do óleo vegetal.

O processo gera dois produtos, ésteres (o nome químico do Biodiesel) e glicerina (produto valorizado no mercado de sabões). [15]

O Biodiesel é simples de ser usado, biodegradável, não tóxico e, essencialmente, livre de enxofre e aromáticos, sendo assim, considerado um combustível ecológico.

Este pode ser considerado de 1ª ou 2ª geração, conforme a sua fonte. Se for biodiesel obtido a partir de óleo ou gordura animal virgem considera-se de 1ª geração, mas se for a partir de óleos ou gorduras usadas já é considerado de 2ª geração. [10]

² "A Guerra Israelo-Árabe de 1973, também conhecida como Guerra do Yom Kipur, ocorreu de 6 de Outubro, **sendo este ironicamente o dia do Yom Kipur, o feriado judaico conhecido como o Dia do Perdão**, a 22 de Outubro de 1973, entre Israel e uma coligação entre o Egipto e a Síria." [25]

Como se trata de uma energia limpa, não poluente, o seu uso num motor diesel convencional resulta, quando comparado com a queima do diesel fóssil, numa redução substancial de monóxido de carbono e de hidrocarbonetos não queimados.

O Biodiesel é quimicamente semelhante ao óleo diesel fóssil, podendo ser usado em motores do ciclo diesel sem a necessidade de adaptações ou em mistura com o óleo diesel em qualquer proporção. Tem aplicação singular quando utilizado em mistura com o óleo diesel de ultra baixo teor de enxofre, porque confere a este, melhores características de lubricidade. O uso dos ésteres em adição de 5 a 8% é visto como uma alternativa excelente para reconstituir essa mesma lubricidade.

Mundialmente passou-se a adoptar uma nomenclatura bastante apropriada para identificar a concentração do Biodiesel na mistura. É o Biodiesel BXX, onde XX é a percentagem em volume do Biodiesel da mistura. Por exemplo, o B2, B5, B20 e B100 são combustíveis com uma concentração de 2%, 5%, 20% e 100% de Biodiesel, respectivamente.

A experiência de utilização do Biodiesel no mercado de combustíveis tem sido feita em quatro níveis de concentração:

- Puro (B100)
- Misturas (B20 – B30)
- Aditivo (B5)
- Aditivo de lubricidade (B2)

As misturas em proporções volumétricas entre 5% e 20% são as mais usuais, sendo que para a mistura B5, não é necessário, nenhuma adaptação dos motores. [17]

O biodiesel é principalmente utilizado nos países europeus. Na maior parte dos casos, usa-se uma mistura de biodiesel combinada com combustível fóssil. [15]

Infelizmente a indústria petrolífera é uma das indústrias “donas do mundo” actualmente e a transacção de forma radical do diesel de petróleo para diesel biodegradável teria sérias consequências na economia mundial.

O Biodiesel de qualidade, deve ser produzido segundo especificações indústrias restritas, a nível internacional temos a ASTM D6751. Nos EUA, o Biodiesel é o único combustível alternativo a obter completa aprovação no Clean Air Act de 1990 e autorizado pela Agência Ambiental Americana (EPA) para venda e distribuição. Os óleos vegetais puros não estão autorizados a serem utilizados como óleo combustível. [17]

2.3.2.1. Processo de produção

O biodiesel pode ser obtido através da reacção entre óleos vegetais ou gordura animal, com álcoois primários (normalmente metanol ou etanol) na presença de um catalisador (geralmente hidróxido de sódio ou potássio).

Para que o processo de transformação ocorra são necessárias 10 partes de óleo, ou gordura, e uma parte de um álcool de cadeia curta (geralmente metanol) na presença de um

catalisado (normalmente hidróxido de sódio ou potássio) para produzir 10 partes de biodiesel e uma parte de glicerina. A glicerina é um açúcar, e é um co-produto da produção de Biodiesel.

A Figura 2.7 representa o processo de produção de Biodiesel.

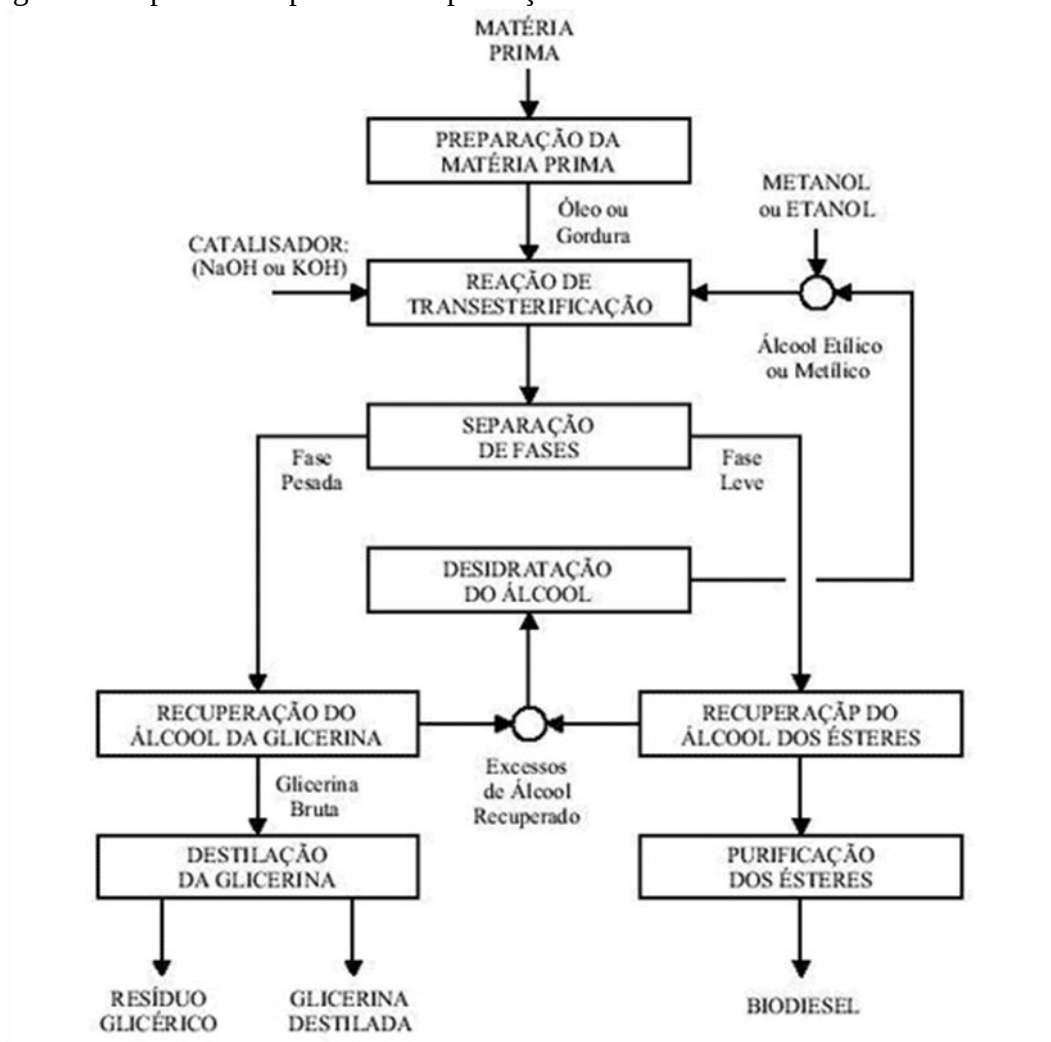


Figura 2.7 – Diagrama processual esquemático do processo de produção de biodiesel. [20]

A tecnologia de produção de biodiesel pode diferir em muitos aspectos nas várias etapas do processo de produção.

O processo de produção do Biodiesel divide-se em três etapas:

1. **Pré-tratamento das matérias-primas:** As matérias-primas utilizadas no processo de produção de biodiesel podem ser de diversas origens, contudo, a maioria das matérias-primas têm de sofrer um pré-tratamento antes de serem alimentadas à etapa que envolve a sua transformação em alquilésteres de ácidos gordos. Assim, os óleos e gorduras podem sofrer diversos tipos de tratamento, como sejam a pré-filtração, a desodorização, a redução dos ácidos gordos livres e o branqueamento. É muito comum a pré-filtração para óleos e gorduras em bruto que contêm, normalmente, grandes quantidades de fosfatídeos. O processo utilizado consiste na

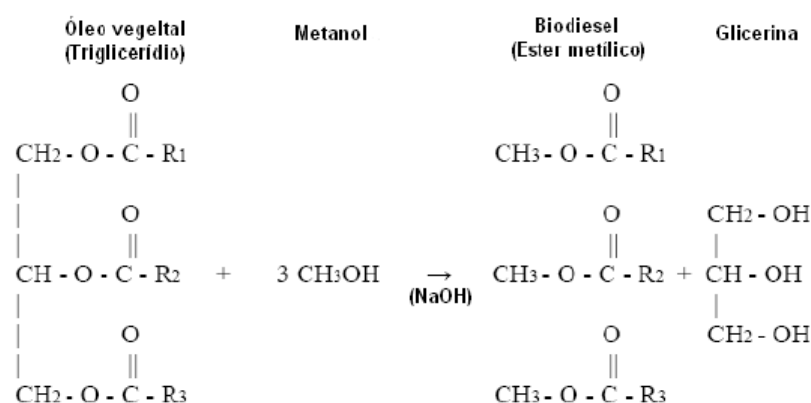
precipitação das gomas após adição de ácido fosfórico e injeção de vapor de água.

A desodorização permite reduzir a quantidade de cetonas e aldeídos, aclarar o produto através da destruição de carotenoides, reduzir a quantidade de pesticidas, detergentes, metais, etc.

Esta operação consiste numa destilação sob vácuo (2 a 5 mmHg) a 240 – 270° C, sendo por isso dispendiosa em termos energéticos.

A redução dos ácidos gordos livres pode ser efectuada por neutralização ou por extracção por solvente. Para efectuar a remoção dos ácidos gordos livres por neutralização adiciona-se uma base (NaOH, KOH) que leva à formação do sabão, podendo ser removido antes de qualquer outro tratamento subsequente. Para a redução por extracção por solvente utiliza-se um solvente para remover os ácidos gordos livres ou os triglicéridos. Assim, por exemplo, o etanol permite reduzir o conteúdo de ácidos gordos livres do azeite de 20% para menos de 3%. Outro exemplo é a utilização de propano líquido que, remove unicamente os triglicéridos, sendo por isso muito eficiente na redução da cor. Por último, o branqueamento é conseguido através da adição de carvão activado conseguindo-se a remoção de metais, água, insolúveis e pigmentos, reduzindo a cor e a possível turvação dos óleos e gorduras.

2. **Transesterificação:** De um modo geral chama-se transesterificação à reacção de um lípido com um álcool para produzir um éster e um subproduto, o glicerol. O processo global de transesterificação de óleos vegetais e gorduras é uma sequência de três reacções reversíveis e consecutivas, em que os monoglicéridos e os diglicéridos são os intermediários. Nesta reacção, são necessárias 3 moles de álcool por cada mole de triglicérido. Na prática, é sempre utilizado um excesso de álcool de modo a aumentar o rendimento em ésteres (deslocar a reacção para o lado dos produtos) e permitir a separação do glicerol formado. Na maioria dos casos, é utilizado um catalisador (por exemplo, NaOH, NaOCH₃ ou KOH) de forma a acelerar a reacção. É importante referir que, apenas os álcoois simples tais como o metanol, etanol, propanol, butanol e o álcool amílico, podem ser utilizados na transesterificação (Figura 2.8). [10]



"R" representa uma cadeia carbonica cujo comprimento varia de 14 - 24 carbonos

Figura 2.8 – Reacção de transesterificação [7]

3. **Separação/Purificação do produto final:** No processo de produção do biodiesel, para além do biodiesel também se forma glicerina na reacção principal. Esta separação é relativamente fácil, já que o biodiesel e a glicerina à temperatura ambiente são imiscíveis logo com uma decantação e centrifugação obtém-se bons resultados. O processo de separação/purificação é insuficiente para garantir que o biodiesel produzido cumpra a norma EN 14214. Pelo projecto de Norma Europeia, prEN14214, os ésteres têm de representar pelo menos 96.5% do produto final. Para além da glicerina, existem outros compostos produzidos nas reacções secundárias e existentes nas matérias-primas (que não reagem) e que requerem outros processos de purificação. Os principais contaminantes são a glicerina livre, metanol, metóxido de sódio, sabão e água proveniente das matérias-primas. O tratamento final mais usual consiste na lavagem do biodiesel com água. Por norma este processo requer entre 2 a 4 lavagens, resultando na perda de algum biodiesel para a água. Para recuperar este biodiesel da água tem de se efectuar uma dispendiosa destilação flash. Alguma água ficará retida no biodiesel assim sendo, o biodiesel passa por uma etapa de secagem antes de ser enviado para armazenagem. Em alguns sistemas, procede-se ainda à destilação do biodiesel com vista à obtenção de um produto de maior pureza. A presença de água no biodiesel é gravosa, sendo a problemática semelhante à existente com o diesel fóssil. [5,10]

2.3.2.2. Controlo de qualidade

A qualidade está associada ao perfeito cumprimento das especificações técnicas desse produto. Para o caso do Biodiesel em Portugal e na Europa, este terá de cumprir a norma EN 14214:2003 – Combustíveis Automóveis - Ésteres metílicos de ácidos gordos (FAME) para motores a diesel. Para se controlar estes parâmetros no biodiesel, ter-se-ão de controlar os parâmetros das matérias-primas e o processo de produção. Tanto o metanol como o metóxido

de sódio, são entregues com um elevado grau de pureza e as características dos mesmos não apresentam grandes oscilações ou variações. O mesmo já não acontece com o óleo. A falta de controlo das matérias-primas, não só poderá traduzir-se num produto final fora das especificações, bem como a paragem de toda a linha de produção e consequente limpeza e reparação da mesma.

Para o controlo de qualidade em questão é fundamental o controlo das especificações do óleo, o controlo das especificações do biodiesel final e o controlo pontual em diversos pontos da linha de produção, de forma a, esclarecer aí a qualidade do produto e que medidas deverão ser tomadas para melhorar o processo e a qualidade do produto final, ou que alterações/melhorias poderão ser feitas no processo sem alterar a qualidade do produto final.

Para o caso do Biodiesel em Portugal e na Europa, este terá de cumprir a norma EN 14214:2003 – Combustíveis Automóveis - Ésteres metílicos de ácidos gordos (FAME) para motores a diesel. (Figura2.9) [4,5,17]

Propriedade	Unidades	Limites	
		Mínimo	Máximo
Ésteres	% (m/m)	96.5	
Densidade a 15° C	g/ml	0.860	0.900
Viscosidade a 40° C	mm ² /s	3.50	5.00
Ponto de inflamação	° C	120	-
Enxofre	mg/kg	-	10.0
Resíduo carbonoso	% (m/m)	-	0.30
Número de cetano		51.0	
Cinzas sulfatadas	% (m/m)	-	0.02
Água	% (m/m)	-	0.05
Contaminação total	mg/kg		24
Corrosão do cobre (3h a 50° C)	Classificação	Classe 1*	
Estabilidade à oxidação, 110° C	horas	6.0	-
Número de acidez	mg KOH/kg		0.50
Índice de iodo			120
Metiléster do ácido linoleico	% (m/m)		12.0
Metiléster polinsaturados (>= 4 ligações duplas)	% (m/m)		1
Metanol	% (m/m)		0.20
Monoglicéridos	% (m/m)		0.80
Diglicéridos	% (m/m)		0.20
Triglicéridos	% (m/m)		0.20
Glicerina livre	% (m/m)		0.02
Glicerina total	% (m/m)		0.25
Metais do grupo I (Na+K)	mg/kg		5.0
Metais do grupo II (Ca+Mg)	mg/kg		5.0
Fósforo	mg/kg		10.0

Figura 2.9 – Parâmetros e limites da Norma EN 14214:2003. [5]

2.3.2.3. Comparação de propriedades do Biodiesel e do Diesel fóssil

O biodiesel possui propriedades físicas e químicas bastante diferentes do diesel fóssil, algumas dessas propriedades tornam o biodiesel uma alternativa viável.

Seguidamente mostrar-se-á algumas diferenças destes dois combustíveis. [1,10]

- % de Oxigénio existente no combustível - Cerca de 11% em peso do Biodiesel é Oxigénio fazendo que a combustão seja mais completa.

- Índice de cetano – O biodiesel apresenta um índice de cetano superior ao do diesel, sendo mais desejável, devido a proporcionar um funcionamento suave e baixa emissões de poluentes.
- Módulo de “bulk” e Velocidade do som (“speed of sound”) – O biodiesel possui valores superiores ao diesel, o que pode causar anomalias nos sistemas de injeção e na própria combustão.

A propagação mais rápida das ondas de pressão causada pelo índice de velocidade do som (speed of sound) superior do Biodiesel e a rápida subida de pressão resultante do módulo de “bulk” mais elevado pode levar à alteração do “timing” de injeção, normalmente otimizado pelo fabricante para Diesel fóssil, levando ao adiantamento do início da fase de combustão. Deste facto resultam temperaturas de combustão bem como pressões mais elevadas, levando à formação de óxidos de azoto (NO_x) nos gases de escape.

- Densidade e Viscosidade - A densidade e a viscosidade são mais elevadas no Biodiesel. Estas propriedades afectam directamente a quantidade de combustível, o “timing” de injeção e o padrão de spray injectado na câmara de combustão. Assim sendo, afectam significativamente o sistema de injeção.
- Poder calorífico – O Biodiesel apresenta um poder calorífico inferior, cerca de 12% comparativamente ao do Diesel, o que provoca uma perda de potência que deverá ser compensada com o aumento da quantidade de combustível injectado. Para fazer a compensação alguns sistemas de injeção começam o ciclo de injeção mais cedo e mantêm a injeção de combustível durante um intervalo de tempo maior, alternando o “timing” de combustão.

Na tabela 2.2 encontra-se referenciada algumas propriedades patenteadas para o Diesel e Biodiesel.

Tabela 2.2 — Comparação de algumas propriedades de Diesel e Biodiesel [10]

Propriedade	Diesel	Biodiesel
Densidade a 15°C (g/cm^3)	0.82-0.86	0.86-0.9
Viscosidade a 40°C (mm^2/s)	2.0-4.5	3.5-5.0
Ponto de inflamação (°C)	>55	>101
Enxofre (% massa)	0.20	<0.01
Cinzas de enxofre (% massa)	0.01	0.02
Água (mg/Kg)	200	<500
Resíduos de carbono (% Peso)	0.30	>0.03
Índice de cetano	>45	>51

2.3.2.4. Regulamentação

Tendo em vista o cumprimento do Protocolo de Quioto, mas também reduzir a dependência do sector dos transportes em relação ao petróleo a UE propõe uma resposta imediata a esta situação: incentivar a substituição do gasóleo e da gasolina pelos biocombustíveis.

Na Directiva Biocombustíveis adoptada em 2003, a Europa fixou objectivos de substituição de 2% da gasolina e do gasóleo nos transportes por biocombustíveis até 2005, e de 5,75% até 2010. O objectivo para 2005 não foi atingido. São de esperar progressos substanciais para 2010, mas não serão suficientes para atingir o objectivo fixado para 31 de Dezembro de 2010. Por conseguinte, a Comissão propõe o reforço do quadro legislativo, com uma quota mínima de 10% para o mercado de biocombustíveis em 2020. [17]

2.3.2.5. Benefícios de utilização

O biodiesel apresenta, segundo vários autores, vários benefícios que se podem dividir em quatro grupos: [6,7,10,12,15,17,18]

Benefícios Técnicos:

- Não requer modificações nas infra-estruturas de distribuição e venda de combustíveis líquidos instalada;
- É de fácil transporte e de fácil armazenamento, devido ao seu menor risco de explosão. Necessita de uma fonte de calor superior a 150 graus célsius para explodir;
- A viabilidade da utilização directa foi comprovada na avaliação dos componentes do motor, que não apresentaram qualquer tipo de resíduo que comprometesse o desempenho;
- A sua utilização não implica alterações no motor;
- Rendimentos similares comparados com o Diesel fóssil;
- O Biodiesel apresenta maior poder lubrificante e de limpeza que pode aumentar a vida útil do motor;
- As diferenças em binário, potência e consumos dos motores são mínimas em comparação com o Diesel;
- Tem um índice de cetano superior ao gasóleo (Tabela 2.2)
- Redução do ruído do motor e do fumo libertado.

Benefícios Energéticos:

- Promove recursos energéticos endógenos;
- Diminui a dependência energética;
- O calor produzido por litro é quase igual ao do diesel;
- Com 1 unidade de energia fóssil é possível produzir 3,2 unidades de energia do biodiesel³.

Benefícios Ambientais:

- Alta biodegradabilidade;
- O uso como combustível proporciona ganhos ambientais para todo o planeta, pois colabora para diminuir a poluição e o efeito estufa;
- O Biodiesel é derivado de matérias renováveis. A recolha de óleos vegetais é um método implementado em Portugal com bastantes benefícios a nível ambiental e na redução de custos por parte das autarquias;
- O facto de aproveitar os óleos alimentares usados contribui para a diminuição dos resíduos em aterros sanitários e facilita o tratamento das águas nas ETAR's;
- Sendo produzido através de matérias renováveis é amigo do ambiente não destruindo o ambiente se derramado;
- É constituído de carbono neutro. As plantas capturam todo o CO₂ emitido pela queima do Biodiesel e separam o CO₂ em Carbono e Oxigénio, neutralizando as emissões;
- Redução das emissões de dióxido de enxofre (SO₂), uma vez que o biodiesel é um combustível que não contém enxofre;
- Uma mistura B20 tem uma redução, em cerca de 15%. Das emissões de Monóxido de Carbono (CO) e partículas, e em cerca de 20%. Das emissões de hidrocarbonetos (ver Figura 2.10);
- Permite o uso de catalisadores para melhorar a combustão e minimização de gases de escape, devido a não conter enxofre;
- O ponto de ignição é superior (acima dos 150°C) ao dos combustíveis tradicionais tornando-o menos perigoso;
- A combustão do biodiesel é mais completa que a do diesel de petróleo;
- Pouca emissão de partículas de carvão. O Biodiesel é um éster e, por isso, já tem dois átomos de oxigénio na molécula;

³ Estudo Publicado do U.S.Department of Energy. Inclui neste cálculo toda a energia fóssil necessária para: abastecer os equipamentos agrícolas e transportes, produção de fertilizantes e pesticidas, produção de electricidade e vapor, e energia do metanol para o processo de fabricação do biodiesel. [7]

- Misturas de 35%, 50% e mais elevadas permitem a redução significativa das emissões de Monóxido de carbono, partículas, fumos, hidrocarbonetos e outros compostos tóxicos ou cancerígenos presentes no diesel.

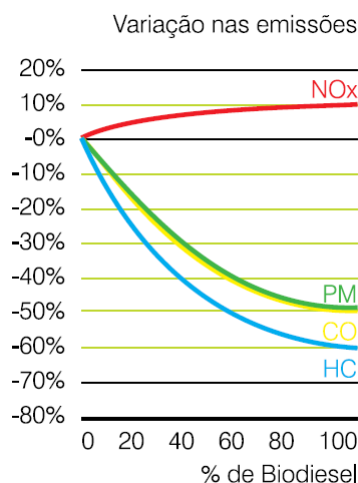


Figura 2.10 – Comparação das emissões GEE emitidas aquando da queima do gasóleo ou biodiesel verifica-se que este não emite Dióxido de Enxofre (SO_2) e emite em quantidades inferiores Monóxido de Carbono (CO), Dióxido de Carbono (CO_2) e Partículas (PM) [12]

Benefícios económicos:

- Com o valor do petróleo a aumentar consideravelmente o biodiesel apresenta-se como uma alternativa viável para a diminuição de custos, devido a ser mais barato e com isenção de imposto, e ainda com incentivos fiscais da comunidade Europeia que promovem a produção e o consumo do biodiesel em detrimento dos combustíveis fósseis;
- Reduz o pagamento de taxas devido à emissão de CO_2 ;
- Viabiliza o auto abastecimento de combustíveis ao produtor agro-pecuário (em termos de microeconomia);
- Permitirá ao país desenvolver uma nova actividade económica auto-suficiente (diminuindo a dependência dos constrangimentos internacionais ligados ao petróleo);
- Criação de novos postos de trabalho nas unidades de produção do biodiesel.

2.3.2.6. Inconvenientes

Alguns inconvenientes, encontrados na bibliografia: [6,7,10,12,15,17,18]

Inconvenientes económicos:

- Alta dependência do custo das matérias-primas;
- Geração de um subproduto (glicerina) cuja purificação técnica só é viável para produções industriais;
- Custo elevado de produção torna-o pouco competitivo a menos que existam incentivos fiscais.

Inconvenientes técnicos:

- Problema de fluidez a baixa temperatura (inferiores a 0°C), este tende a coagular, dificultando o seu transporte pelo sistema de admissão, bomba e filtros;
- Baixa estabilidade à oxidação (vida útil/ período máximo de armazenamento inferior a seis meses);
- Pode causar dissolução da pintura sendo necessário utilizar tintas resistentes;
- Pode também dissolver ou plastificar o asfalto;
- Poder detergente superior ao gasóleo;
- Quando se coloca em tanques sujos por depósitos provenientes do gasóleo, ao “limpar” os ditos depósitos por dissolução parcial, pode terminar obstruindo as linhas de combustível;
- A utilização de B20 não apresenta quaisquer implicações ao nível dos filtros apesar de a sua substituição possivelmente exigir uma maior frequência, devido aos sedimentos que se poderão acumular no tanque de armazenamento;
- Para misturas superiores a 20% poderão ocorrer problemas com as borrachas e as mangueiras, a menos que estas sejam substituídas por materiais compatíveis (este factor depende do ano da viatura, uma vez que as viaturas recentes já se encontram devidamente preparadas).

Inconvenientes ambientais:

- Aumento nas emissões de óxidos de azoto (NO_x), por exemplo para o B20 teremos um aumento entre 1 a 4%, apesar de cumprir os limites de emissão.

2.4. Emissões gasosas

A energia necessária para mover o automóvel é gerada através da queima de um combustível. A poluição produzida pelos automóveis é uma consequência do processo de combustão inerente ao uso de motores de combustão interna. Os combustíveis fósseis são uma mistura de hidrocarbonetos, compostos estes que possuem átomos de carbono. Num motor ideal, o oxigénio presente no ar converter-se-ia todo o Hidrogénio presente no combustível,

em água, e todo o carbono em Dióxido de Carbono. O Azoto presente no ar não seria afectado. Na realidade o processo de combustão não é perfeito, num motor real a combustão dá-se a uma temperatura elevada ($>1226,85^{\circ}\text{C} \approx 1500\text{k}$), a essas temperaturas dá-se uma reacção inversa, de dissociação do Dióxido de Carbono e da Água em Monóxido de Carbono, Óxidos de Azoto, Oxigénio e Hidrocarbonetos não Queimados. Esta dissociação existe porque o equilíbrio químico altera-se com a temperatura. [1,10]

Desta forma, os automóveis emitem vários tipos de poluentes (Figura 2.11).

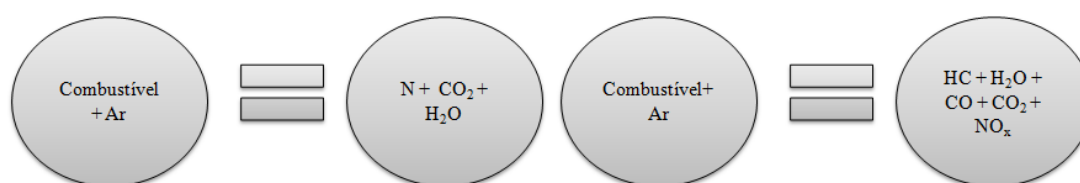


Figura 2.11 – Diagramas de processo de combustão num motor de combustão interna. No primeiro está representado o processo de uma combustão ideal, no segundo está representado o processo de combustão real. [10]

Na Europa a maior parte das emissões de Monóxido de Carbono, cerca de 90 %, é proveniente dos escapes dos veículos, sendo o restante produzido por fogos e outras combustões.

O Óxido de Azoto, cerca de 50% é proveniente dos transportes, sendo a produção de electricidade responsável por quase 20% e a produção industrial pelo restante.

Dos Hidrocarbonetos não Queimados (ou VOC – volatile organic compounds) cerca de 35% é proveniente dos transportes, sendo a indústria química (solventes) responsável por 25%. Emissões naturais (de árvores e plantas) destes compostos são elevadas, havendo uma contribuição média de 18% na Europa, mas elevando-se para 65% na Rússia.

Por último, relativamente às partículas materiais (PM 10, ou seja, de dimensões inferiores a 10 μm) a principal fonte é a produção de electricidade (30%) seguida pelos transportes, processos produtivos, combustão industrial e pequenas combustões, cada com cerca de 15%. [1]

Actualmente há uma grande preocupação na protecção da Camada de Ozono, esta é fundamental para assegurar a vida na Terra, uma vez que o ozono estratosférico tem a capacidade de absorver grande parte da radiação ultravioleta B (UV-B), radiação solar que pode provocar efeitos nocivos (ou até mesmo letais) nos seres vivos, ameaçando assim a saúde humana e o ambiente.

Nestes termos o problema foi encarado globalmente no sentido de se introduzirem medidas para reduzir a produção e uso de substâncias que destruam a Camada de Ozono (Ozone Depleting Substances - ODS). [22]

Neste intuito foram criadas normas para a emissão de gases poluentes.

As normas Europeias de emissões são um conjunto de requisitos que definem os níveis limite aceitáveis para as emissões de veículos novos vendidos nos países membros da União Europeia. Estas normas estão definidas num conjunto de directivas da União Europeia que visam uma introdução progressiva de normas cada vez mais rigorosas.

Actualmente, as emissões de Óxidos de Azoto, Monóxido de Carbono, Hidrocarbonetos não Queimados estão regulamentados para a maior parte dos veículos, incluindo automóveis, camiões, comboios, tractores, maquinaria diversa, barcos de pequena dimensão, mas excluindo navios e aviões. Para cada categoria de veículo existem diferentes normas limite. A concordância do veículo é testada através de ciclos de testes realizados ao motor. Os veículos que ultrapassam os valores máximos normalizados não podem ser vendidos na União Europeia, mas as normas não se aplicam a veículos que já se encontrem em circulação, portanto os veículos novos têm de obedecer à norma em vigor na altura da sua introdução no mercado. [10]

Na tabela 2.3, estão representados os níveis de emissão de poluentes limitados pela aplicação das várias Directivas até à actualidade.

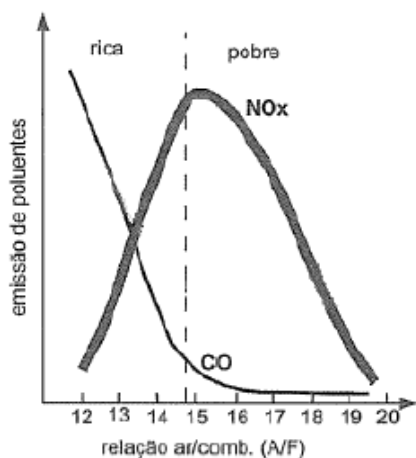
Tabela 2.3 — Limites de emissão de poluentes para automóveis na União Europeia. [1,7,10,24]

(g/Km)	Data	CO	HC	NOx	HC+NOx	part.	CO2
Euro I	07/ 1992	2,72	-	-	0,97	0,19	-
Euro II	01/1996	1,00	-	-	0,70	0,08	-
Euro III	01/2000	0,64	-	0,5	0,56	0,05	-
Euro IV	01/2005	0,50	-	0,25	0,30	0,025	-
Euro V	09/2010	0,50	-	0,18	0,23	0,0045	-
Euro VI	09/2014	0,50	-	0,08	0,17	0,0045	-

Desde 1992 (Euro I) que os níveis de emissões de poluentes limitados por legislação têm vindo a diminuir, havendo actualmente legislação diferente para veículos com motores a gasolina e Diesel. Também voltou-se a introduzir limites para os HC e NOx. [1]

Neste momento ainda não existem limites impostos pela União Europeia para a emissão de Dióxido de Carbono, estes limites são impostos apenas pelos fabricantes de automóveis mas no futuro deverá ser regulamentado um limite para estas emissões. Actualmente o objectivo dos fabricantes é atingir emissões de Dióxido de Carbono de 140 g/km até ao final de 2008 com uma redução até às 120 g/km nos próximos cinco anos. Esta emissão de Dióxido de Carbono é directamente proporcional à cilindrada dos veículos, assim sendo, a União Europeia espera que esta regulamentação favoreça a produção de automóveis mais pequenos e económicos, apesar da discórdia dos construtores de automóveis de grande cilindrada. [10]

A emissão dos vários poluentes varia gradualmente com a riqueza da mistura (Figura 2.12). Quanto mais pobre for a mistura menor será a formação de Monóxido de Carbono e de Hidrocarbonetos não Queimados, estes últimos não tão intensivamente.



O nível de produção de NOx diminui para misturas pobres e ricas, sendo o máximo de emissão coincidente com misturas estequiométricas ou levemente pobres. Assim sendo, quanto mais pobre for a mistura, menor será a quantidade de poluentes emitidos pelo motor (Figura 2.12). Se a temperatura do motor for mais baixa, o espectro de emissão de poluentes muda, havendo uma menor produção de NOx (temperatura mais baixa) e muito maior produção de HC. [1]

Figura 2.12 – Produção de poluentes em função da riqueza da mistura. [1]

2.4.1. Dióxido de Carbono (CO₂)

Na atmosfera existe CO₂ e este também é um produto da combustão. Como já visto anteriormente, numa combustão ideal os produtos da combustão seriam CO₂ e H₂O. A proporção relativa destes dois produtos depende da razão carbono/hidrogénio do combustível, cerca de 1:1,75 para o gasóleo tradicional. As emissões de CO₂ de um motor Diesel podem ser reduzidas ao reduzir o conteúdo de carbono por unidade de energia ou melhorando a eficiência de combustível do motor.

A elevada eficiência do combustível nos motores Diesel confere uma vantagem ambiental em relação aos outros combustíveis fósseis como a gasolina, apesar do facto do processamento de crude em Diesel apresentar elevadas emissões de CO₂. Mesmo sendo considerada benigna, a emissão de CO₂, derivada do uso de combustíveis fósseis, tem despertado a atenção nos últimos anos. O vapor de água e o CO₂ (juntamente com outros gases) permitem que a energia solar chegue à terra, mas isolam alguma radiação térmica emitida pela terra. Este efeito de estufa torna a terra mais quente e é vital para a sobrevivência na terra. No entanto os níveis atmosféricos de CO₂ têm vindo a aumentar desde o início da Revolução Industrial, aparentemente devido ao uso intensivo e crescente de combustíveis fósseis. Ao observar as medições da temperatura média na terra existem indícios que o clima global está a ser afectado e a temperatura tem vindo a subir de uma forma constante, é o fenómeno de aquecimento global.

É um inevitável resultado final da combustão, sendo impossível a sua diminuição através de algum tratamento final à combustão (como por exemplo através da utilização de catalisadores). Aliás, um catalisador de oxidação de CO e HC faz com que aumente ligeiramente as emissões de CO₂ (à custa da diminuição do CO e HC).

Os níveis de CO₂ são vigiados e apresentados em Relatório da Comissão ao Parlamento Europeu e ao Conselho. [7,23]

2.4.2. Monóxido de Carbono (CO)

O monóxido de carbono (CO) é um gás tóxico. É um produto intermédio na combustão de combustíveis à base de hidrocarbonetos, desta forma a sua emissão resulta de uma combustão incompleta. A emissão de CO depende directamente da razão ar/combustível em relação à proporção estequiométrica. Uma combustão rica em combustível irá produzir CO e a sua emissão aumenta quase linearmente com o desvio da razão estequiométrica.

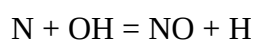
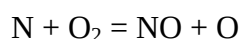
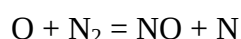
Devido aos motores Diesel operarem com misturas pobres, as emissões de CO estão normalmente abaixo dos valores limite legislados, não sendo motivo de preocupação especial.

Uma solução viável para baixar os níveis de emissão de CO e HC será a implementação de um catalisador de oxidação colocado na linha de escape. Este processo é melhorado com o excesso de ar nos gases de escape. [1,10]

2.4.3. Óxidos de Azoto (NO_x)

Os Óxidos de Azoto (NO_x) podem ser divididos em dois tipos, o óxido nítrico (NO) e o dióxido de nitrogénio (NO₂), sendo o NO responsável por 70-90% das emissões de NO_x provenientes do ciclo Diesel.

O NO_x, ao contrário de outros poluentes, é um efeito colateral da combustão e não uma consequência directa desta. O azoto (N) atmosférico representa praticamente todo o azoto presente no NO_x pois os combustíveis possuem níveis de azoto desprezáveis relativamente ao ar (79%). A formação de NO dá-se através do mecanismo de Zeldovich:



O Dióxido de Azoto (NO₂) forma-se a partir do NO. A formação de NO depende da quantidade de oxigénio disponível e da temperatura. Combustíveis que queimam antes de ser atingida a pressão máxima no cilindro são problemáticos. Após queimarem a sua pressão é elevada, bem como a sua temperatura. Desta forma a fase inicial da combustão é importante para o NO_x, quase todo o NO_x é formado durante os primeiros 20 graus de rotação da cambota após o início da combustão. As técnicas de controlo de NO_x operam neste estágio do ciclo de combustão. A maioria das técnicas reduz a temperatura da combustão obtendo desvantagens na emissão de hidrocarbonetos, emissão de partículas e consumo de combustível. É portanto necessário encontrar um compromisso entre as emissões de NO_x e a emissão de partículas bem como o consumo de combustível.

Os factores que influenciam a libertação de calor vão, inevitavelmente, influenciar a formação de NO_x. A quantidade de combustível queimado durante a fase de queima da pré

mistura pode ser reduzida recorrendo a uma menor taxa de injeção durante o período inicial de injeção ou recorrendo a uma injeção piloto, na qual é usada uma injeção de combustível separada para iniciar a combustão, usando uma quantidade de combustível mínima. [10]

2.4.4. Hidrocarbonetos não Queimados (HC)

A origem dos HC devem-se ao combustível que não queimado, ou apenas foi incompletamente queimados

O termo HC representa compostos orgânicos no estado gasoso. Os hidrocarbonetos no estado sólido fazem parte das partículas em suspensão. Visto que a combustão, nos motores Diesel, não é homogênea. A emissão de HC resulta de problemas na mistura ar/combustível. A emissão de HC não é afectada pela razão ar/combustível. Existem dois mecanismos principais pelos quais o combustível se escapa da combustão principal:

- O facto de se formarem regiões mais ricas e regiões mais pobres antes da ignição;
- O combustível que sofre uma mistura deficiente injectado a velocidade baixa perto do final da combustão.

O primeiro mecanismo é a formação de regiões mais ricas e de regiões mais pobres antes da ignição. No ciclo Diesel o combustível é injectado no ar quente e comprimido durante a fase final de subida do pistão (perto do ponto morto superior). Após um curto período de atraso (durante o qual o combustível e o ar se misturam, o combustível é aquecido pelo ar e iniciam-se reacções químicas), dá-se a ignição espontânea do combustível. Apenas as misturas ar/combustível dentro de certos limites irão ser queimadas, o que implica que o combustível injectado mais recentemente que ainda está demasiado rico (defeito de ar) terá de se misturar com ar suficiente para se poder dar a sua combustão. No entanto, algum combustível injectado antes de se dar a ignição já se misturou com excesso de ar (mistura pobre) e não será queimado. Mesmo com o facto de se darem, constantemente, misturas dentro do cilindro estas não conseguem inverter o facto de algum combustível já ter excesso de ar, facto pelo qual não será queimado. O combustível injectado após a ignição não poderá ser em excesso (mistura rica) pois a mistura a passar pela razão ar/combustível ideal irá queimar. Assim as misturas de combustível injectado durante o período de atraso da ignição são uma fonte significativa de combustível não queimado. Qualquer factor que aumente o atraso da ignição vai naturalmente aumentar as emissões de HC. [7]

2.5. Revisão de trabalhos efectuados

A revisão de trabalhos já efectuados, é bastante importante, devido ao facto de fornecer resultados para eventuais comparações.

Nesta revisão, não estarão todos os resultados obtidos pelos autores, sendo apenas enunciados os resultados importantes para este trabalho.

2.5.1. Influência do Biodiesel nas emissões poluentes de um motor turbo diesel. [10]

O estudo da influência do Biodiesel no funcionamento de um motor foi iniciado em Fevereiro de 2008, na Faculdade de Engenharia, pelo Engenheiro Sérgio Moreira.

Para a realização do trabalho em questão, o engenheiro, elaborou uma plataforma para realizar testes de emissões gasosas, usando combustíveis alternativos ao Diesel, preparando um Peugeot 107 HDi para receber Biodiesel e adquiriu um equipamento de medição de gases de escape.

O Veículo em questão foi sujeito a testes de emissão gasosa operando com Diesel fóssil, criando assim um padrão das emissões sob o uso de combustíveis derivados de petróleo (Diesel). Foram analisadas a evolução das emissões gasosas com o aumento de Biodiesel presente no combustível (B25, B50, B75 e B100). As emissões de gases das várias combinações de Diesel com Biodiesel foram registadas para um conjunto de rotações do motor desde o regime de ralenti até às 4000 rotações por minuto.

No final, o conjunto das emissões medidas foi analisado.

Os dados obtidos para as emissões produzidas por um automóvel ligeiro em vazio, sugerem uma curva diferente da apresentada pelo U.S. Department of Energy. O estudo visou as emissões de NO_x, CO, CO₂, O₂ e HC; nas figuras seguintes (Figura 2.13 – Figura 2.16), apresenta-se os valores das emissões para sete pontos de rotação do motor (desde o ralenti até às 4000 rpm). [6,10]

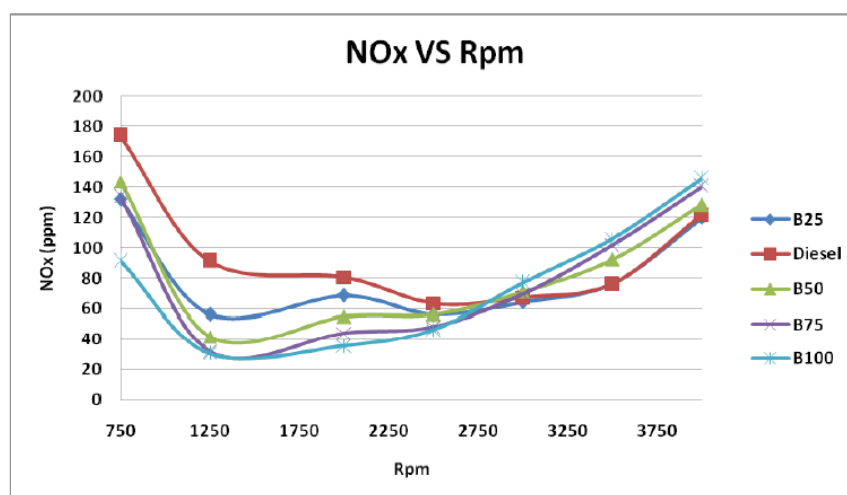


Figura 2.13 – Emissão de NO_x em função da rotação do motor para os combustíveis ensaiados. [10]

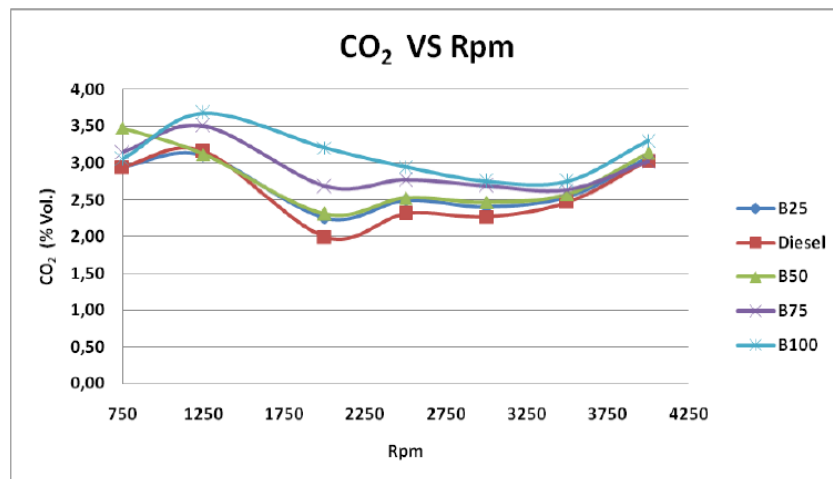


Figura 2.14 – Emissão de CO₂ em função da rotação do motor para os combustíveis ensaiados. [10]

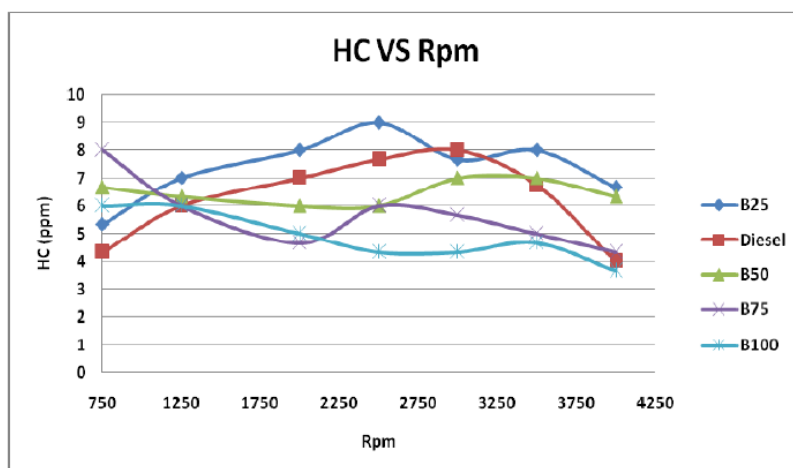


Figura 2.15 – Emissão de HC em função da rotação do motor para os combustíveis ensaiados. [10]

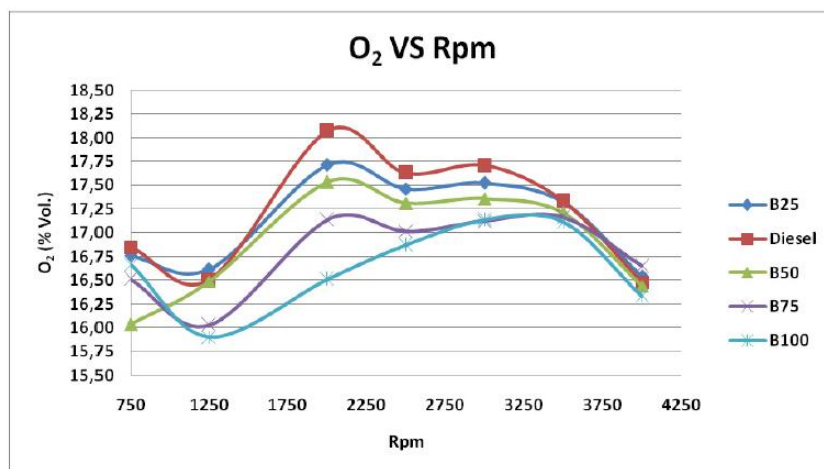


Figura 2.16 – Percentagem de O₂ nos gases de escape em função da rotação do motor para os combustíveis ensaiados. [10]

Segundo o autor do estudo, as conclusões retiradas são: [10]

- Da análise de todos os testes realizados com o Biodiesel no Peugeot 107 HDi, o autor conclui, que o uso de Biodiesel puro (B100), bem como o uso de fracções de Biodiesel diluídas em Diesel fóssil, num automóvel sem qualquer tipo de alteração, trazem variações significativas nas emissões gasosas produzidas pelo automóvel.
- O uso de Biodiesel provoca uma melhoria considerável nas emissões de hidrocarbonetos e monóxido de carbono do automóvel. Aquando da introdução crescente de Biodiesel, a análise de gases mostrou uma diminuição destes gases proporcional à quantidade de Biodiesel introduzida.
- As emissões de NOx são menores quanto maior a quantidade de Biodiesel presente no combustível, mas esta diminuição apenas se registou até um patamar de rotação (3000 rpm), a partir do qual, a emissão de NOx dos combustíveis possuindo mais Biodiesel foi superior à emissão do mesmo poluente recorrendo ao Diesel fóssil. Estes dados contrariam, até certo ponto, os dados encontrados na bibliografia consultada pelo autor. O autor explica que este facto poderá estar associado às diferenças tecnológicas dos veículos utilizados nos diferentes trabalhos.
- O autor explica que é frequente encontrar, nas mais variadas fontes, indicações sobre o aumento de NOx com a introdução de Biodiesel, e que tais autores baseiam-se em trabalhos realizados com veículos desactualizados para o padrão actual de tecnologia. O trabalho mostrou que mais investigação a este nível poderá inverter esta tendência bem como a opinião generalizada do aumento desta emissão.
- Para finalizar o autor concluiu, que o uso de Biodiesel no Peugeot 107 HDi trouxe mais vantagens do que era esperado. Assim, o Biodiesel, aliado à mais recente tecnologia, presente no automóvel ensaiado, mostraram que este biocombustível é uma boa opção para a redução de emissões poluentes.

2.5.2. Estudo da influência do Biodiesel no Funcionamento de um Motor Diesel. [6]

Este estudo foi iniciado em Julho de 2008, na Faculdade de Engenharia, pelo Engenheiro Daniel Pimenta.

A investigação encontra-se dividida em três áreas de estudo. O primeiro objectivo do autor era a determinação das propriedades físico-químicas do biodiesel que poderiam interferir directamente com o funcionamento e prestações de um motor diesel. O segundo ponto focado foi o estudo da influência do biodiesel nos resultados do motor (Potência e Binário), por ensaio de dois automóveis de tecnologias de injeções diferentes. [6]

Foram efectuados neste estudo, dois automóveis com dois sistemas de injeção diferentes. Sendo um com o sistema common-rail e o outro com sistema de bomba de injeção (mais antigo). Os automóveis usados foram:

- Peugeot 107 1.4 HDi com potencia máxima de 54 cv (40 kW) às 4000 rpm e binário máximo de 130 Nm às 1750 rpm.
- Fiat Bravo TD 100 com 100 cv de origem, mas preparado a nível de motor e chassis para competição [7]

O terceiro ponto abordado é respectivo às emissões gasosas e influência do biodiesel.

De seguida, serão enunciados os resultados obtidos nesta investigação:

- Poder calorífico Superior (PCS):

Tabela 2.4 — Resultados das determinações do PCS [7]

Combustível	Poder Calorífico [cal/g]
Biodiesel FEUP	9029,22
Diesel	10321,64
Diferença	12,52%

- Massa Volúmica:

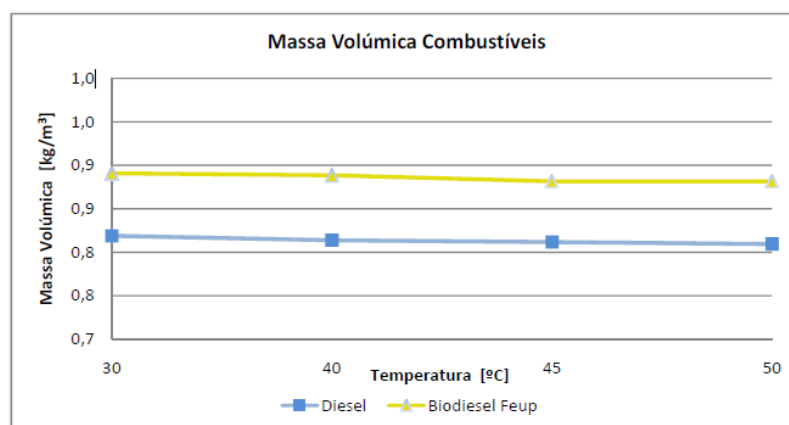


Figura 2.17 – Massa Volúmica dos combustíveis ensaiados em função da temperatura. [6]

- Viscosidade cinemática dos combustíveis:

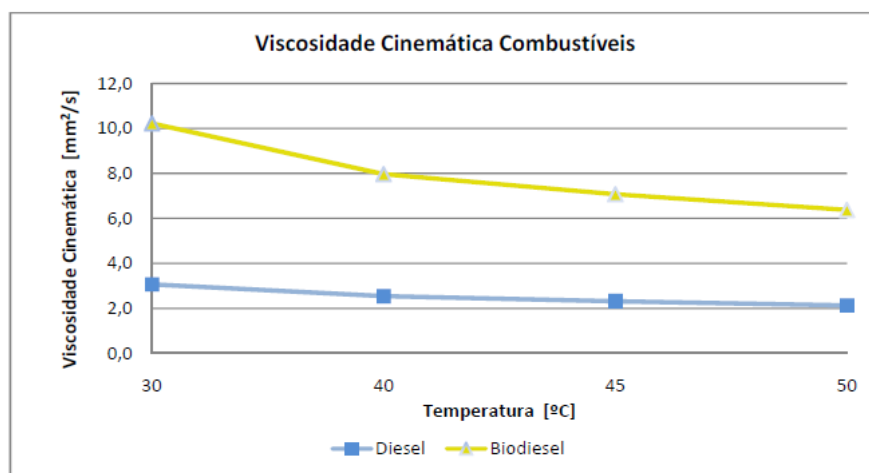


Figura 2.18 – Viscosidade Cinemática dos combustíveis ensaiados em função da temperatura. [6]

- Viscosidade Dinâmica dos Combustíveis:

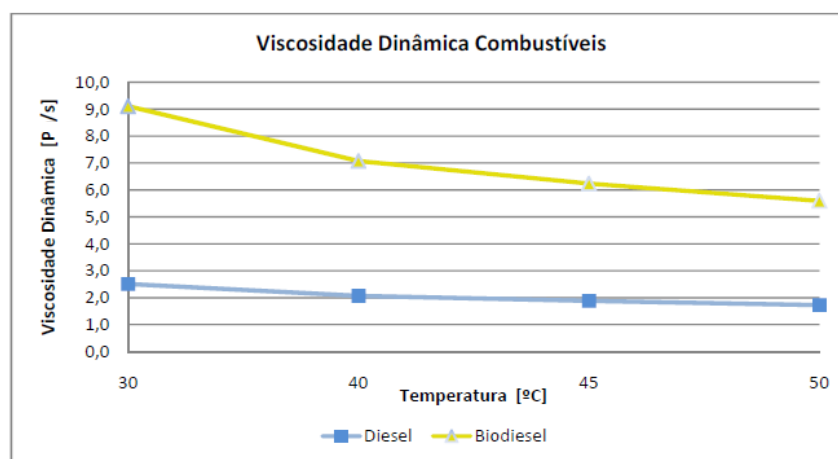


Figura 2.19 – Viscosidade Dinâmica dos combustíveis ensaiados em função da temperatura. [6]

- Ensaios de potência e Binário

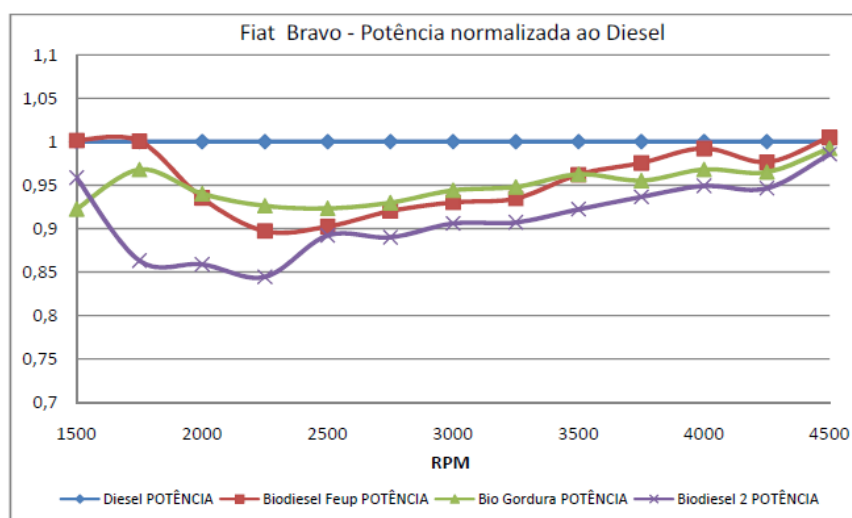


Figura 2.20 – Curvas de Potência do Fiat Bravo normalizadas ao Diesel. [6]

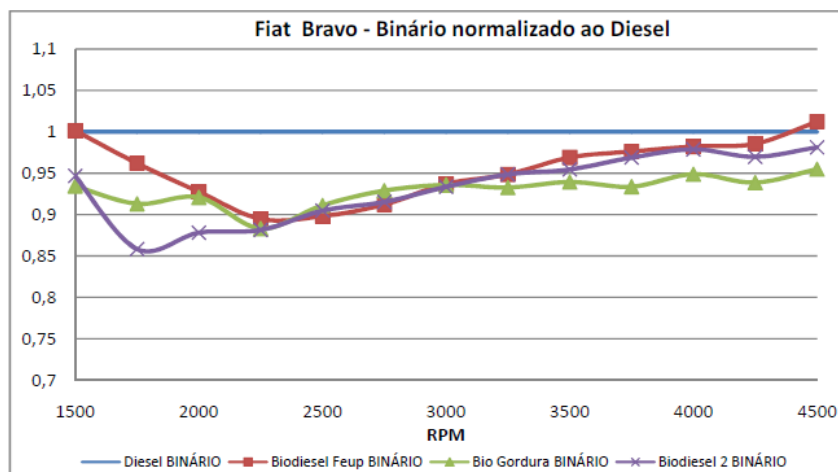


Figura 2.21 – Curvas de Binário do Fiat Bravo normalizadas ao Diesel. [6]

Apresentam-se de seguida, as conclusões obtidas pelo autor: [6]

- Nos motores diesel de injeção common-rail, a perda de potência é elevada, e deve resultar da combinação de duas propriedades do Biodiesel, o menor Poder Calorífico e a maior Viscosidade. Os quais, nas mesmas condições de funcionamento do motor, irão diminuir significativamente a potência calorífica fornecida ao motor, pois $Q = m \times PCI$. Pelo facto de a injeção neste sistema não ser volumétrica mas sim controlada pelo tempo de abertura dos injectores. Para iguais tempos de abertura dos injectores, diferentes viscosidades deverão resultar em diferentes quantidades de combustível injectadas em cada ciclo.
- Nos motores diesel equipados com bomba de injeção as perdas de potência e binário por utilização de biodiesel são muito inferiores às perdas observadas nos motores common-rail. Possivelmente por se tratar de um sistema de injeção volumétrico onde a viscosidade do combustível não interfere tão significativamente na quantidade de combustível injectado.
- Aparentemente, pelo observado nos ensaios do Biodiesel Feup à temperatura ambiente e a 50°C, os resultados de potência e binário não serão muito afectados pelo aumento de temperatura, para esta gama de temperaturas e níveis de viscosidade de cada combustível.
- Foi possível concluir pelo autor, que para a mesma quantidade de combustível injectada, situação próxima dos ensaios do Fiat Bravo, um Biodiesel permitirá resultados muito próximos do Diesel fóssil. Sugerindo eventualmente que o biodiesel poderá proporcionar melhores resultados que o diesel, se a combustão for optimizada às propriedades do biodiesel.
- A dúvida da quantidade de combustível injectada num sistema de bomba de injeção, só poderá ser analisada com o recurso a um equipamento de análise de

injecção de combustível. Este permitirá também o estudo da solução para a injecção deficiente de biodiesel pelos sistemas common-rail, pois aparentemente se garantida a injecção de igual quantidade de combustível as perdas de potência e binário seriam reduzidas.

- No entanto, é preciso não esquecer o outro factor que uma injecção por common-rail introduz face ao sistema de bomba de injecção, a injecção gradual com diversas pré e pós-injecções. Esta mudança no tipo de combustão poderá ser afectada pelas propriedades detonantes e físicas do biodiesel.

O autor conclui, que é possível admitir que uma adaptação da electrónica do controlo dos injectores às propriedades do biodiesel poderá garantir resultados de potência e binário ao nível do gasóleo. Outra solução, apesar de mais cara, seria a troca de injectores, por uns com maior diâmetro dos orifícios (maior caudal), os quais possibilitariam uma injecção de maior quantidade de combustível para os mesmos intervalos de tempo de abertura dos injectores.

2.5.3. Influência do Biodiesel na Injecção de um Motor Diesel. [7]

Por último, esta dissertação foi iniciada em Fevereiro de 2009, pelo Engenheiro Diogo Ramos.

O projecto teve como objectivo a análise de quantidade injectada em função do tempo e da pressão de injecção de um sistema de injecção common-rail, para vários combustíveis.

Foram determinadas as propriedades físico-químicas necessárias dos combustíveis que poderão interferir com um sistema de injecção common-rail. A análise de quantidade injectada foi feita a partir de uma máquina de testes a injectores que simula a pressão de injecção e a temporização.

Os resultados relevantes para este estudo, para comparação posterior com os resultados obtidos, serão seguidamente enunciados:

- Poder Calorífico:

Tabela 2.5 — Resultados das determinações do PCS (cal/g) [7]

	Poder calorífico (cal/g)	Diferença *(%)
Biodiesel	9074,75	10,98
Azeite	8946,67	12,23
Óleo de Soja	8707,04	14,58
Óleo de Milho	8743,99	14,22
Óleo de Girassol	9016,59	11,55
Óleo de Amendoim	8792,95	13,74

Óleo de Vegetais	8667,13	14,97
Diesel Normal	10193,60	0,00
Diesel especial	10164,80	0,28
Diesel Normal retorno	10411,30	-2,14
Biodiesel retorno	8844,22	13,24

- Viscosidade Cinemática:

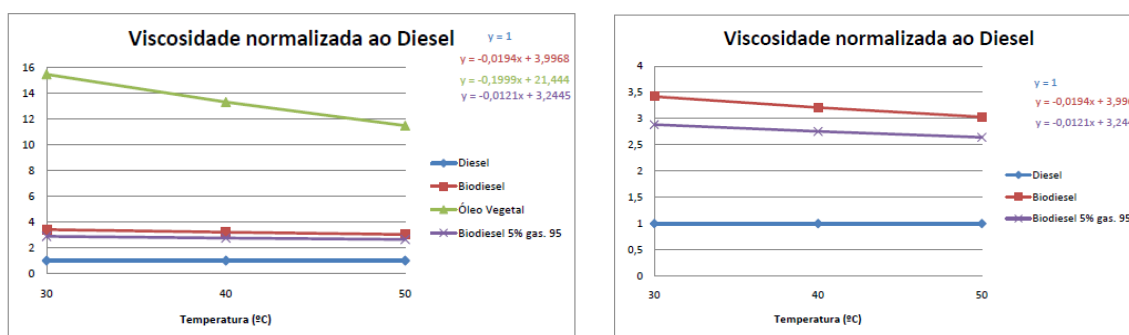


Figura 2.22 – Viscosidade Cinemática dos combustíveis normalizada ao Diesel em função da temperatura. [7]

Tabela 2.6 — Resultados das determinações das viscosidades a 40°C (mm²/s). [7]

Diesel normal	Diesel especial	Biodiesel	Biodiesel 5% 95	Biodiesel 5% 98	Biodiesel retorno	Diesel retorno
2,54	2,51	8,16	7,00	6,90	7,96	2,54

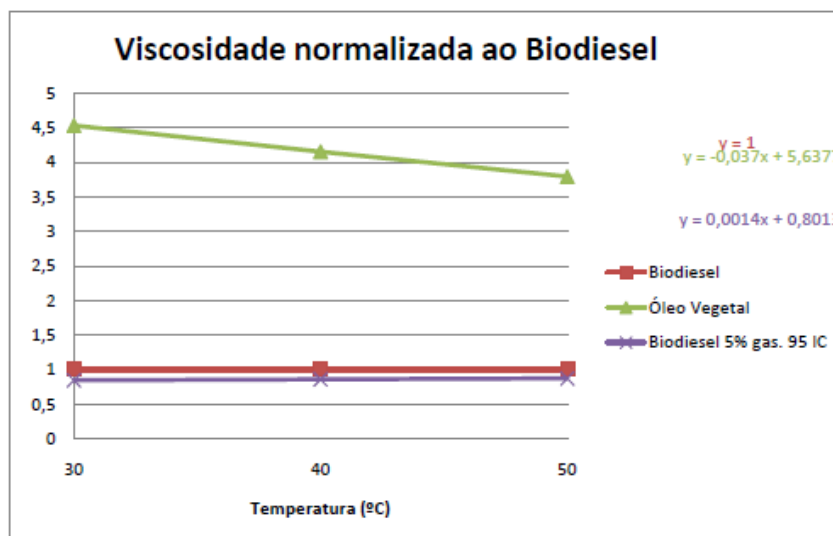


Figura 2.23 – Viscosidade Cinemática do óleo vegetal normalizado ao Biodiesel em função da temperatura. [7]

Conclusões obtidas pelo autor:

- O Poder calorífico do Biodiesel FEUP (9074,75 cal/g) é inferior cerca de 11 % em relação ao Diesel comercial (10193,60 cal/g). O poder calorífico do óleo de vegetais (8667,13 cal/g) é cerca de 15 % inferior em relação ao do Diesel.
- O azeite possui a maior viscosidade cinemática de todos os combustíveis testados (61 mm²/s a 30 °C e 29,99 mm²/s a 50 °C)
- A viscosidade cinemática do Biodiesel FEUP é cerca de 3,4 vezes superior ao do Diesel a 30 °C (10,5 mm²/s – 30 °C; 8,16 mm²/s – 40 °C Biodiesel FEUP). O Biodiesel Feup está fora da norma EN14214
- A viscosidade cinemática do óleo vegetal a 30 °C tem um valor de 47,58 mm²/s, cerca de 15,5 vezes superior ao do Diesel e 4,5 vezes superior ao do Biodiesel. No entanto tem uma descida mais acentuada com o aumento da temperatura (de 30 °C para 50 °C).

Metodologias aplicadas

O capítulo 3 apresenta os objectivos do presente projecto e descreve os métodos que serão utilizados.

No ponto 3.1 serão descritos os objectivos e será dada uma noção referente aos diferentes testes efectuados.

Nos pontos 3.2 e 3.3 apresenta-se as amostras ensaiadas e o automóvel ensaiado.

No ponto 3.4 encontra-se sintetizada as diferentes propriedades analisadas e os respectivos métodos utilizados.

3.1. Objectivos

Os objectivos deste projecto dividem-se em dois campos distintos. Um ligado às propriedades físico-químicas dos “ésteres” (biodiesel) e suas matérias-primas que poderão interferir no funcionamento e performance de motores diesel, e outro ligado ao estudo da influência destes nos resultados do motor e nas emissões gasosas.

Os parâmetros físico-químicos do biodiesel são importantes devido a poderem condicionar o bom funcionamento do motor e algum componente do sistema do combustível. Os combustíveis, até cumprirem a sua finalidade num motor de combustão interna, são transportados e pressurizados pelo sistema de injeção. E, como em qualquer escoamento de um fluído, as propriedades físicas do combustível condicionam a forma de escoamento do mesmo, afectando também a combustão, nomeadamente a mistura ar-combustível (ver Cap. 2.2). [6]

No caso das matérias-primas, estas podem condicionar a qualidade do biodiesel produzido, devido às propriedades do biodiesel dependerem do tipo de matéria-prima utilizada e do álcool utilizado na reacção de transesterificação. [4]

Neste trabalho as propriedades analisadas são:

- **Densidade:** A densidade do biodiesel depende da matéria-prima e esta influencia o sistema de injeção dos veículos e do bombeio do combustível.
Os motores são projectados para operar com combustíveis com uma determinada faixa de densidade, tendo em vista a bomba injectora dosear o volume injectado. Se a densidade do combustível estiver acima da norma leva à formação de uma

mistura rica ar/combustível aumentando a emissão de poluentes. Se pelo contrário, a densidade do combustível estiver abaixo da norma leva à formação de uma mistura pobre o que origina a perda de potência e ao aumento do consumo do combustível. [5]

- Viscosidade:** A viscosidade está directamente ligada à conversão do biodiesel. A importância deste parâmetro, para a qualidade do biodiesel baseia-se essencialmente no facto de a viscosidade do combustível poder implicar um mau funcionamento dos motores e para além disso pode fornecer informações sobre a facilidade que o combustível apresenta em movimentar-se no motor. Uma viscosidade muito elevada, indicará que a reacção não correu como esperado e poderá ter de ser reprocessado o biodiesel. A utilização de um combustível com uma viscosidade elevada provoca uma combustão pobre que causará um aumento da pressão máxima de entrada do combustível devido às dificuldades de bombeio. Esta provocará a diminuição do débito de combustível, uma pulverização incorrecta nos injectores e consequentemente provocará uma incorrecta combustão na câmara de combustão e um desgaste elevado do corpo da bomba injectora, podendo esta ficar danificada (Figura 3.1). Por sua vez, a utilização de um combustível pouco viscoso faz com que este seja bombeado em grande quantidade provocando assim uma combustão incompleta, o que implica a emissão de grandes quantidades de poluentes para a atmosfera. A presença de uma viscosidade mínima em alguns motores é exigida para a possibilidade de não perderem a potência do motor devido a eventuais vazamentos em equipamentos. [4,5]



Figura 3.1 – Corpo da bomba da unidade injectora - Pressão mais alta na entrada do combustível quando a válvula solenóide se abre (O-Ring do corpo da bomba sofre carga mecânica maior); Maior movimento relativo da unidade injectora (desgaste elevado no corpo da bomba). [7]

- Poder calorífico (PC):** O poder calorífico das matérias-primas é um importante factor devido a este influenciar o poder calorífico do biodiesel produzido. O poder calorífico de um combustível é um factor importante para o desempenho de um motor de combustão. Pois, sendo a potência calorífica do ciclo dada pelo produto do caudal mássico do combustível com o PCI do combustível (ver equação 1.9). Através da equação pode-se concluir que para o mesmo motor diesel funcionando segundo o mesmo ciclo e massa de combustível admitida, mas com diferentes combustíveis, o resultado da combustão dependerá unicamente do PCI. [6]

$$\dot{Q} = \dot{m}_{comb} \times PCI_{comb} \quad (1.9)$$

- **“Flash point”(ponto de inflamação) :** O “flash point” pode mostrar a flamabilidade de um combustível.

Esta propriedade não está directamente ligada com o desempenho do motor mas é uma propriedade importante a nível de segurança, no armazenamento e no manuseio do biodiesel e por isso é importante garantir o valor mínimo desta propriedade. Segundo prEN14214, o combustível não deve possuir um ponto de inflamação inferior a 120° C.

Esta propriedade no biodiesel está directamente relacionada com a quantidade de metanol existente neste. Assim sendo, um biodiesel com um “flash point” baixo é indicativo da presença excessiva de metanol.

A utilização de um combustível com um “flash point” baixo irá provocar problemas no pré-aquecimento, causando uma combustão prematura, causando timings irregulares, um excesso da explosão do combustível na câmara de combustão e consequente aumento das emissões e desgaste de todos os componentes do motor. [5]

Quando temos valores muito baixos ou muito elevados de “flash point”, estes não produzirão misturas de combustíveis, estas ficarão excessivamente ricas ou pobres. [1]

- **Temperatura de fusão:** Para o estudo das matérias-primas é necessário saber para que temperatura a gordura se encontra em óleo.

Para o estudo da influência do biodiesel no funcionamento e performance de motores diesel foram efectuados alguns ensaios num veículo:

- **Emissões gasosas:** O biodiesel é considerada uma energia limpa, para tal, é necessário fazer o estudo dos gases provenientes da queima deste combustível e compará-los ao combustível fóssil.
- **Ensaio de potência e binário:** Para a implementação do biodiesel nos motores diesel actuais, é fundamental perceber a resposta desses motores ao novo combustível. Para essa análise é preciso comparar as suas curvas de potência e binário relativamente ao diesel fóssil.

3.2. Amostras

Na elaboração deste projecto foram utilizados **banha de porco** e **sebo de bovino** (ácidos gordos de origem animal), **diesel** (gasóleo comercial de origem mineral), **biodiesel de banha de porco** e **biodiesel de sebo de bovino** (“ésteres metílicos de ácidos gordos”).

O Biodiesel utilizado no presente trabalho foi elaborado nas instalações da FEUP, produzido no âmbito do projecto GREN FatValue cujo responsável na FEUP é o Professor Manuel Afonso Magalhães da Fonseca Almeida, Professor associado, no Departamento de

Engenharia Metalúrgica e de Materiais da FEUP. Este docente conta com vários anos de experiência na produção e testes de Biodiesel no Laboratório de Tratamento de Resíduos do Departamento em questão. Assim de forma a realizar os testes foram adquiridos 5 litros de biodiesel de banha de porco e de sebo de bovino.



Figura 3.2 – Picnómetros contendo as amostras: No primeiro picnómetro contando da esquerda para a direita temos a Banha de porco, seguido do Sebo de bovino, o terceiro picnómetro contém Biodiesel de Banha e por último o Biodiesel de Sebo.

3.3. Automóvel ensaiado

O veículo utilizado para realizar os ensaios foi um **Fiat Bravo** (Figura3.3) fornecido pela Feup para o projecto.

O veículo utilizado para realizar os ensaios já possuía alterações realizadas pelo Eng. Daniel Pimenta, no sistema de alimentação e retorno de combustível.

De seguida serão expostas as características do automóvel. [6]

- **Cilindrada:** 1900 cm³
- **Nº de cilindros:** 4
- **Sistema de injeção:** bomba de injeção
- **Potência máxima:** 100 cv- 4000 rpm
- **Binário máximo:** 130 Nm – 1750 rpm



Figura 3.3 – Veículo ensaiado.

3.4. Métodos utilizados

Apesar da existência de várias propriedades importantes para a determinação da qualidade do biodiesel, apenas algumas foram analisadas.

Na tabela 3.1, encontram-se referenciadas as propriedades analisadas tal com o método e a respectiva amostra.

No anexo 1 encontra-se os protocolos experimentais utilizados neste projecto.

Tabela 3.1 — Análises e métodos utilizados na determinação das propriedades físico-químicas das amostras.

Análise	Método utilizado/ Material utilizado	Amostras
Massa volúmica e densidade	Método dos picnómetros	Banha; Sebo de bovino; Biodiesel de banha; Biodiesel de sebo
Viscosidade cinemática	Banho de precisão para viscosímetros “VB1423” / ISO3104	Banha de porco; Sebo de bovino
Viscosidade dinâmica	ISO3104	Banha de porco; Sebo de bovino
Poder Calorífico Superior	Calorímetro Parr 1341	Banha de porco; Sebo de bovino
PH	PH indicator strips	Banha de porco; sebo de bovino
“Flash Point”	setaflash series 3/ ISO3679	Banha de porco; Sebo de bovino
Temperatura de fusão		Banha de porco; Sebo de bovino

- **Poder calorífico**

O cálculo do poder calorífico de combustível (Q , ou PC) passa pela determinação da energia interna dos reagentes e dos produtos de combustão.

O poder calorífico das matérias-primas (neste caso, sólidas) e dos combustíveis líquidos é determinado num calorímetro. O calorímetro é um recipiente onde a mistura ar-combustível é queimada a um volume constante.

O calorímetro é imerso em água à temperatura ambiente, e o aumento da temperatura da água (e do calorímetro) é medido de modo a obter o calor gerado. Como todo o vapor de água produzido é condensado, calcula-se o Q_{vs} do combustível. [1]

Tabela 3.2 — Ensaio efectuados no automóvel

Análise	Método utilizado/ Material utilizado	Amostras
Potência e Binário	Banco de Potência - MAHA LPS2000 (DIN70020)	Várias percentagens de Biodiesel de banha; Biodiesel de sebo
Emissões gasosas	Equipamento de análise de gases Stargas 898	Várias percentagens de Biodiesel de banha; Biodiesel de sebo

- **Ensaio de potência e binário**

“Os ensaios de potência e binário, podem ser relativos apenas ao motor por dinamómetros, ou então em Bancos de Rolos em que é medido igualmente as perdas mecânicas de transmissão, dando um valor da potência e binário reais do automóvel. Para ensaiar um motor nas condições reais de carga, o Banco de Rolos precisa de estar equipado com um freio, para poder controlar a carga a vencer pelo automóvel.

O ensaio de um automóvel, no banco de rolos, consiste na medição da potência e binário do automóvel numa determinada relação de caixa e em carga máxima do motor. A carga exigida pelo banco é crescente até ao máximo do binário do motor. Durante a aceleração do motor, o banco regista o binário e a potência nas rodas do automóvel. Na desaceleração do automóvel é registada a curva de potência de perdas. O somatório das curvas de potência na roda e potência de perdas resulta na potência do motor do automóvel.” [6]

Resultados e Discussão

O capítulo 4 apresenta os resultados obtidos e a sua discussão.

No ponto 4.1 serão apresentados os resultados da análise laboratorial das matérias-primas.

No ponto 4.2 serão apresentados os resultados das análises efectuadas no automóvel (ensaio de potência e binário e análise das emissões gasosas).

4.1. Análise laboratorial das matérias-primas (banha e sebo)

4.1.1. Massa volúmica em função da temperatura

Na Tabela 4.1, apresentam-se os resultados obtidos nos ensaios da determinação da massa volúmica da banha de porco, do sebo de bovino e do seu respectivo biodiesel.

Na Figura 4.1, está representado o gráfico com os resultados da massa volúmica em função da temperatura.

No Anexo 3, apresenta-se os resultados detalhados.

Tabela 4.1 — Resultados da determinação da massa volúmica para diferentes temperaturas (kg/m³)

Temperatura (°C)	Massa volúmica de banha de porco	Massa volúmica Biodiesel de banhado	Massa volúmica Sebo de bovino	Massa volúmica Biodiesel de sebo de bovino
60	0,8852	0,8423	0,8854	0,8461
70	0,8804	0,8404	0,8773	0,8438
80	0,8725	0,8321	0,8682	0,8416
90	0,8663	0,8303	0,8627	0,8273

É de salientar que durante o ensaio a 60°C o sebo solidificou na extremidade do picnómetro e o ensaio a 90°C teve de se mudar de banho devido á limitação de temperatura do primeiro, podendo haver alguma alteração de condições em relação aos outros ensaios.

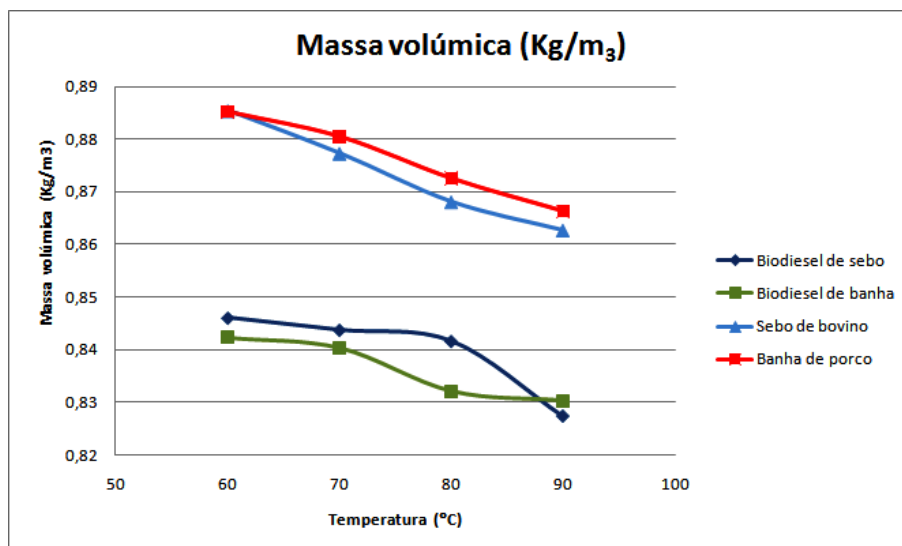


Figura 4.1 – Massa volúmica das amostras ensaiadas em função da temperatura

Da análise da figura, podemos verificar que a massa volúmica do biodiesel de sebo é superior ao do biodiesel de banha, mas o mesmo não se verifica nas suas matérias-primas, que tem um comportamento inverso.

4.1.2. Viscosidade

4.1.2.1. Viscosidade cinemática

Na Tabela 4.2, apresentam-se os resultados obtidos nos ensaios de determinação da viscosidade cinemática (mm^2/s) da banha de porco, do sebo de bovino e do seu respectivo biodiesel.

Na Figura 4.2, está representado o gráfico com os resultados da viscosidade cinemática em função da temperatura.

Tabela 4.2 — Resultados da determinação da viscosidade cinemática para diferentes temperaturas (mm^2/s)

Temperatura (°C)	Banha de porco	Sebo de bovino	Biodiesel de banha porco	Biodiesel de sebo de bovino
40	-	-	4,76*	5,05*
60	21,07	25,16	-	-
70	16,25	19,30	-	-
80	12,89	14,72	-	-
90	10,64	11,60	-	-
60-90	49,50%	53,90%		

*Valores obtidos no âmbito da execução do projecto FatValue

A diminuição da viscosidade das gorduras animais de 60 para 90 °C, em percentagem, pode ser observada na última linha da tabela 4.2. Observa-se uma diminuição de cerca de 50%. Este estudo foi realizado na perspectiva da utilização destas gorduras directamente como combustíveis, no âmbito do projecto FATVALUE. Relativamente ao biodiesel, apenas foi determinada viscosidade cinemática a 40° C dado que se pretendia comparar com os valores estabelecidos pela norma. EN 14214:2003.

Pode-se observar, que quanto maior a viscosidade, maior a sua diminuição com o aumento da temperatura.

Comparando as viscosidades dos diferentes combustíveis a 40°C (ver tabela 2.6), verifica-se que o Diesel fóssil tem uma viscosidade menor que a dos biocombustíveis.

Observa-se que o biodiesel de banha de porco tem uma viscosidade inferior ao biodiesel de sebo de bovino.

Em comparação com o biodiesel analisado em [7] tanto o biodiesel de banha como o de sebo têm uma viscosidade muito inferior.

Segundo a Norma EN14214(03), o valor da viscosidade cinemática, à temperatura de 40°C do biodiesel, deveria encontrar-se no intervalo 3,5-5,0 (mm²/s). O único biodiesel que obedece à norma é o biodiesel de banha de porco.

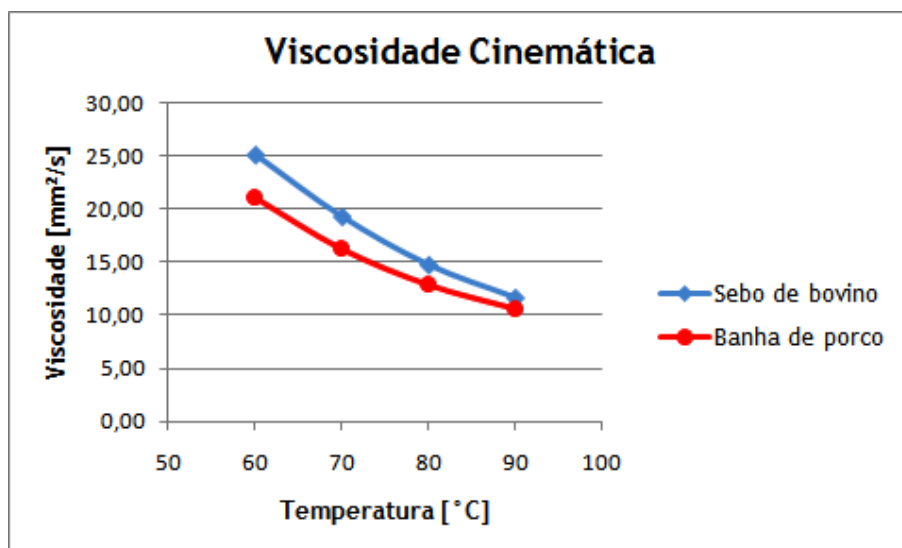


Figura 4.2 – Viscosidade cinemática das matérias-primas em função da temperatura.

Na figura 4.2 verifica-se que a viscosidade cinemática, de ambas as gorduras, diminui com a temperatura. Observa-se igualmente que a viscosidade cinemática do sebo é superior à da banha de porco, mas a variação desta característica de ambas as gorduras com a temperatura é semelhante.

4.1.2.2. Viscosidade dinâmica

Na Tabela 4.3, apresentam-se os resultados obtidos nos ensaios de determinação da viscosidade dinâmica (Pa/s) da banha de porco, do sebo de bovino e dos seus respectivos biocombustíveis.

Na Figura 4.3, está representado o gráfico com os resultados da viscosidade dinâmica em função da temperatura

Tabela 4.3 — Resultados da determinação da viscosidade dinâmica para diferentes temperaturas (Pa/s)

Temperatura (°C)	Banha de porco	Sebo de bovino
60	18,65	22,27
70	14,31	16,94
80	11,25	12,78
90	10,64	11,60

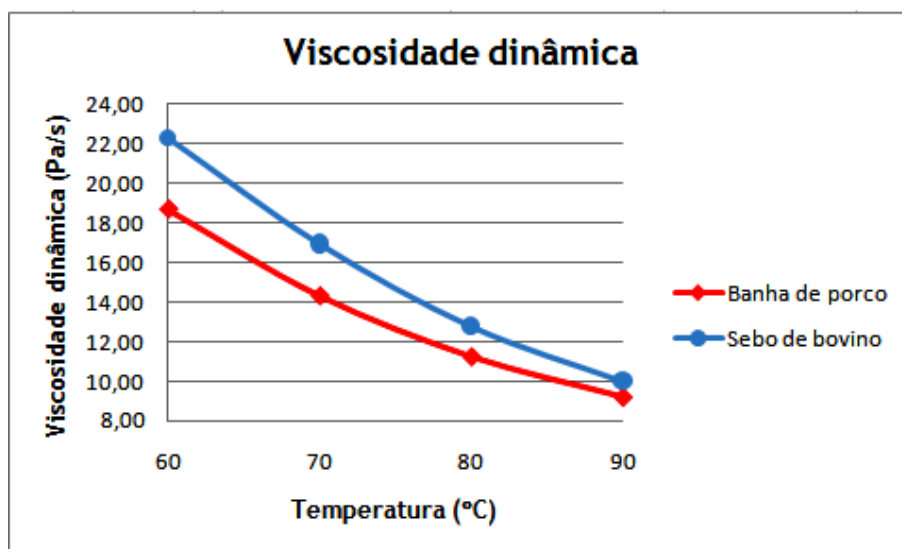


Figura 4.3 – Viscosidade dinâmica das matérias-primas em função da temperatura.

Na figura 4.3 verifica-se que o comportamento da viscosidade dinâmica é semelhante ao da viscosidade cinemática. Através desta figura pode-se verificar que a viscosidade dinâmica do sebo é superior à da banha de porco, mas a variação desta característica de ambas as gorduras com a temperatura é semelhante.

4.1.3. Poder Calorífico Superior

Na Tabela 4.4, apresentam-se os resultados obtidos nos ensaios de determinação do poder calorífico da banha de porco, do sebo de bovino e dos seus respectivos biocombustíveis.

Tabela 4.4 — Resultados das determinações do PCS (cal/g)

	Poder calorífico (cal/g)	Diferença ¹ (%)
Banha de porco	9076,63	10,96
Sebo de bovino	9148,24	10,26
Biodiesel de banha porco	9142,70*	10,03
Biodiesel de sebo de bovino	9171,53*	10,31

¹Diferença que se observa relativamente ao Diesel fóssil (padrão ver tabela 2.5).

O poder calorífico dos biocombustíveis de gordura animal é aproximadamente 10 % menor, relativamente ao diesel fóssil.

O poder calorífico das matérias-primas é muito semelhante ao seu correspondente biodiesel.

4.1.4. pH

Tabela 4.5 — pH das matérias-primas

Temperatura (°C)	Banha de porco	Sebo de bovino
70	4,5	4,5
85	4,5	4,5

O pH das gorduras é igual, podendo ter um erro de medição de 0,5.

4.1.5. “Flash Point”

Na Tabela 4.6, apresentam-se os resultados obtidos nos ensaios de determinação do “*Flash Point*” da banha de porco e do sebo de bovino.

Tabela 4.6 — Resultados das determinações do “*Flash Point*”

Banha de porco	Sebo de bovino	Biodiesel de banha porco	Biodiesel de sebo de bovino
255°C	260°C	172°C*	171°C*

Dos resultados obtidos verifica-se que o “*Flash Point*” do sebo de bovino é superior ao da banha. Comparando o biodiesel de banha e de sebo os resultados são muito próximos mas muito superior ao diesel que normalmente tem um valor a rondar os 50°C.

4.1.6. Temperatura de fusão

Na Tabela 4.7, estão representadas as temperaturas de fusão das duas gorduras analisadas.

Neste teste considerou-se a temperatura de fusão, temperatura para a qual estas duas gorduras se encontrassem completamente em óleo.

Tabela 4.7 — Temperatura de fusão das matérias-primas

Temperatura de fusão (°C)	
Banha de porco	≅48
Sebo de bovino	≅42

4.2. Ensaios no automóvel

Os valores obtidos estão dependentes das condições mecânicas apresentadas pelo veículo ensaiado, sendo necessário referir que não seriam as óptimas, visto que se tratava de um veículo já muito ensaiado em variados aspectos.

Em primeiro lugar convém realçar que a quantidade de biodiesel produzido e disponível para a realização destes ensaios foi de apenas 5 litros. Esta quantidade não permitiu a repetição de ensaios. Desta forma, apenas foi realizado um ensaio para cada um dos combustíveis. Esta situação associada à precisão do banco de ensaios utilizado e à proximidade dos valores obtidos na maioria dos combustíveis poderá em alguns casos penalizar as conclusões que se inferem dos resultados.

4.2.1. Ensaio de Binário e Potência

A análise dos resultados dos ensaios de Potência e Binário é dado através da análise das suas curvas, dado que, só estas conseguem traduzir uma ideia global da diferença de resultados dos diferentes combustíveis.

Para a melhor compreensão, a análise dos resultados será efectuada inicialmente pela visualização das curvas e posteriormente pela análise separada das curvas de binário e potência normalizadas à respectiva curva obtida por utilização de diesel.

4.2.1.1. Curvas Potência e Binário

Na Figura 4.4 apresentam-se as curvas de Potência e Binário dos principais combustíveis ensaiados.

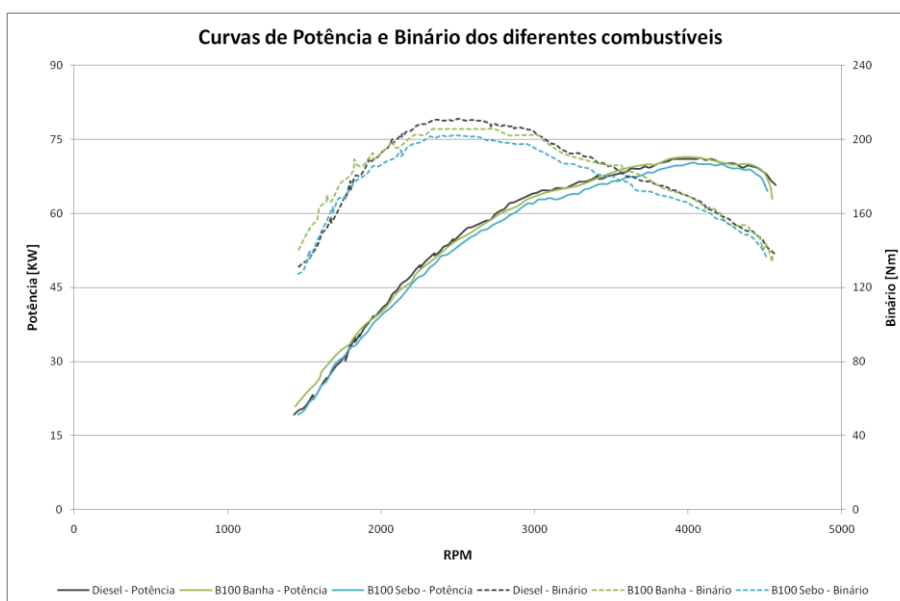


Figura 4.4 – Curvas de Potência e Binário dos diferentes Combustíveis

Através deste gráfico verifica-se que o binário, aproximadamente 1400 rpm, é maior para o B100 de banha de porco, mas às 1700 rpm o diesel apresenta maior binário em relação a ambos os biocombustíveis.

A análise das curvas permite concluir que a utilização dos biocombustíveis resulta numa ligeira diminuição da potência e binário.

Relativamente à análise das utilizações de diferentes percentagens de biodiesel, pode observar-se nas Figuras 4.5 e 4.6 as curvas referentes aos diferentes biocombustíveis.

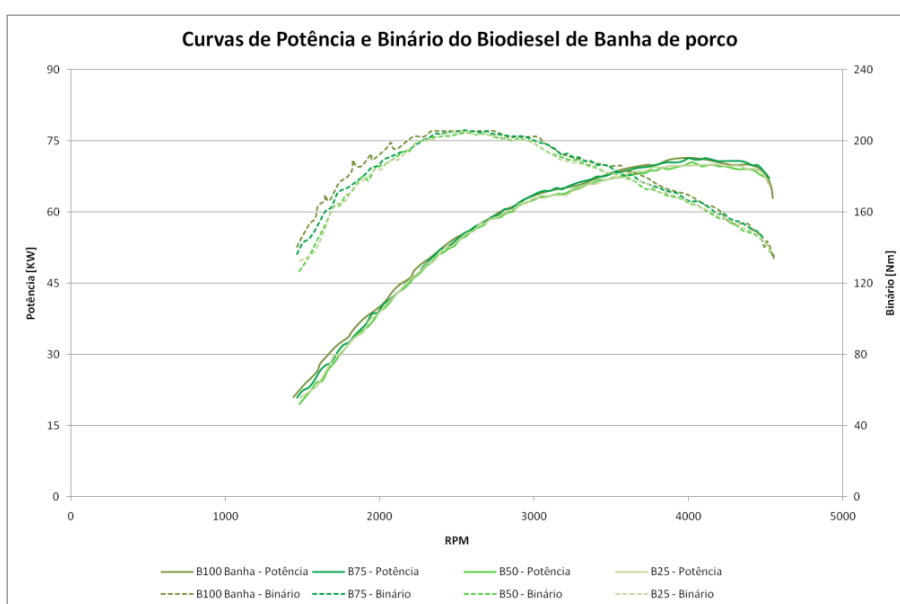


Figura 4.5 – Curvas de Potência e Binário relativas às misturas B25, B50, B75, B100 do Biodiesel de Banha de Porco.

Da observação da figura pode constatar-se que os diferentes biocombustíveis apresentam curvas muito similares. As diferenças observadas permitem identificar que o aumento da percentagem de biodiesel no combustível resulta, ao contrário do esperado, um ligeiro aumento de potência.

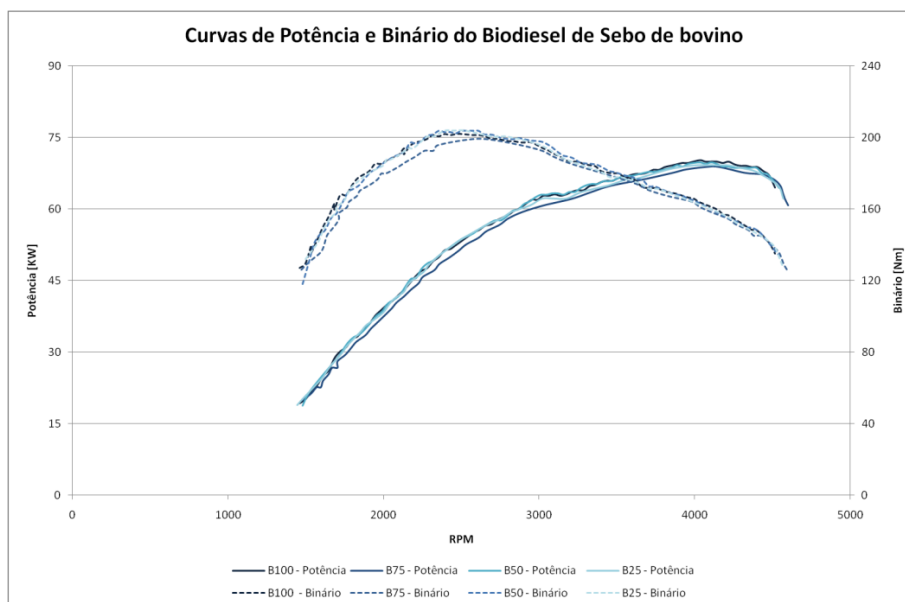


Figura 4.6 – Curvas de Potência e Binário relativas às misturas B25, B50, B75, B100 do Biodiesel de Sebo de Bovino.

A análise da figura permite identificar que, ao contrário do verificado para o biodiesel de banha de porco, os valores de potência e binário dos B25 e B50 são muito próximos de B100, mas para B75 os valores são inferiores.

4.2.1.2. Curvas de Binário e Potência normalizadas ao Diesel

Para facilitar a análise dos resultados obtidos serão apresentadas separadamente as curvas de binário e de potência dos vários ensaios realizados

Para a normalização foi utilizado o ensaio de potência e binário obtido com o diesel fóssil.

Nas Figuras 4.7 e 4.8 estão representadas as curvas de potência e binário normalizadas para os diferentes combustíveis.

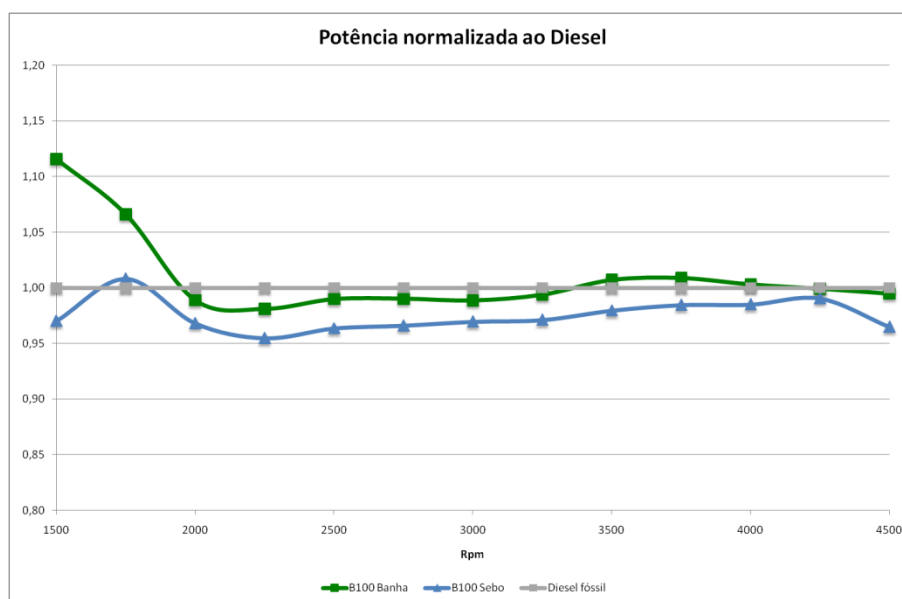


Figura 4.7 – Curvas de Potência normalizadas relativas aos diferentes combustíveis.

A análise da figura 4.7 permite verificar que para regimes inferiores a 2000 rpm os biocombustíveis conseguem apresentar potências mais elevadas que o diesel fóssil.

Para regimes superiores a 2000 rpm e até 3500 rpm o diesel apresenta valores de potência sempre superiores aos restantes combustíveis.

Para regimes superiores a 3500 rpm as curvas de potência dos biocombustíveis se aproximam da do diesel.

Da análise das curvas é possível concluir que a utilização de biocombustíveis resulta numa ligeira diminuição de potência. Convém referir, que a perda de potência é sempre inferior a 5%.

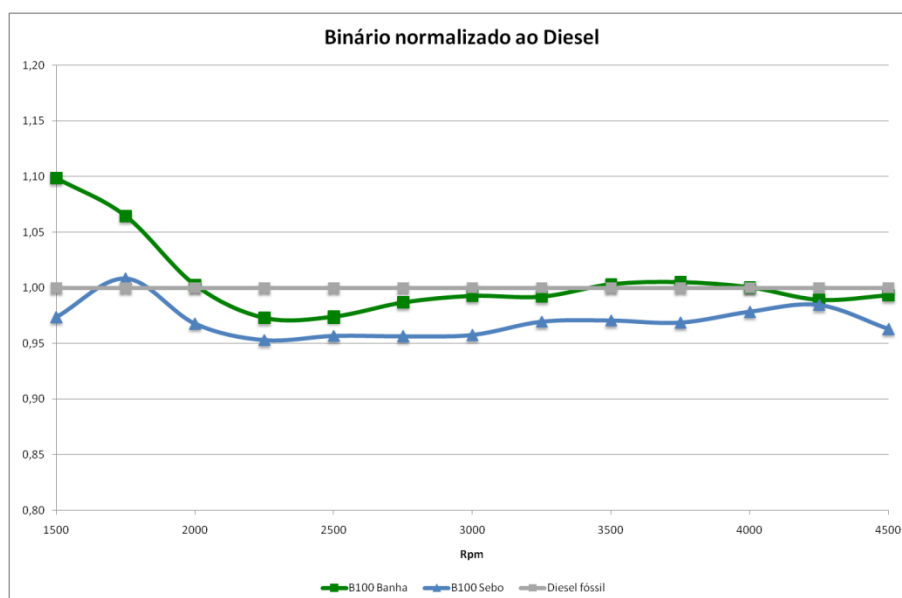


Figura 4.8 – Curvas de Binário normalizadas relativas aos diferentes combustíveis.

A análise da figura 4.8 permite verificar que para regimes inferiores a 2000 rpm os biocombustíveis conseguem apresentar binários mais elevadas que o diesel fóssil.

Para regimes superiores a 2000 rpm e até 3500 rpm o diesel apresenta valores de binários sempre superiores aos restantes combustíveis.

Para regimes superiores a 3500 rpm a curva de binário dos biodiesel de banha se aproxima da do diesel.

Da análise das curvas é possível concluir que a utilização de biocombustíveis resulta numa ligeira diminuição de binário. Convém referir, que a perda de binário é sempre inferior a 5%.

Nas Figuras 4.9 e 4.10 estão representadas as curvas de potência e binário normalizadas para os diferentes combustíveis com diferentes percentagens de biodiesel de banha de porco.

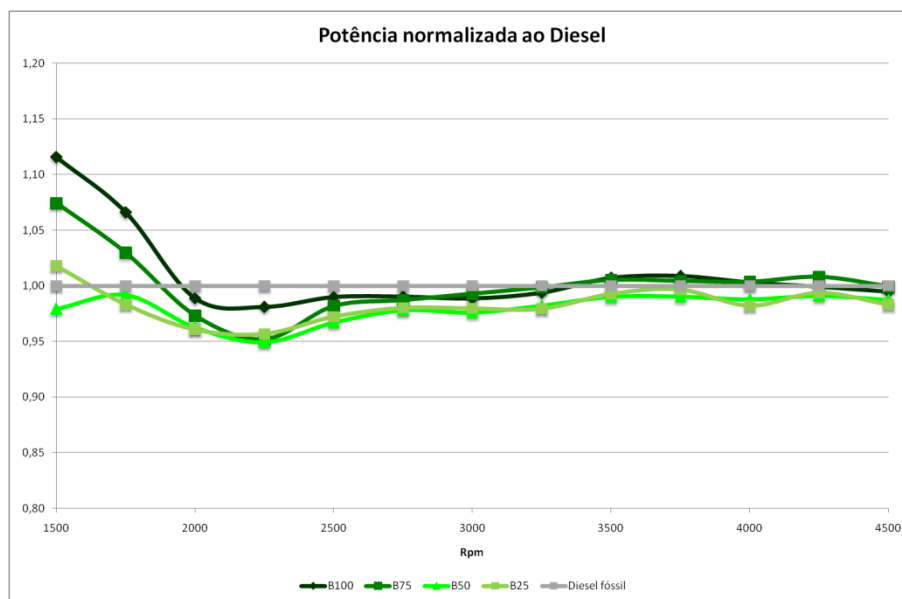


Figura 4.9 – Curvas de potência normalizadas relativas às misturas B25, B50, B75, B100 do Biodiesel de Banha de Porco.

A análise da figura 4.9 permite verificar que para regimes inferiores a 2000 rpm alguns dos combustíveis com biodiesel conseguem apresentar potências mais elevadas que o diesel fóssil. Para estes regimes verifica-se uma maior dispersão dos diferentes resultados.

Para regimes superiores a 2000 rpm e até 3500 rpm o diesel apresenta valores de potência sempre superiores aos combustíveis com biodiesel. No entanto, convém referir que a perda de potência é sempre inferior a 2,5%.

Para regimes superiores a 3500 rpm é possível verificar que as curvas de potência se aproximam da do diesel, sendo mesmo ligeiramente superiores em algumas das rotações. A análise permite dizer que para estes regimes a perda de potência é pouco significativa.

Uma análise mais aprofundada requererá, necessariamente, a utilização de um banco de potência estático no qual as condições de ensaio permitiriam uma superior precisão nos valores obtidos.

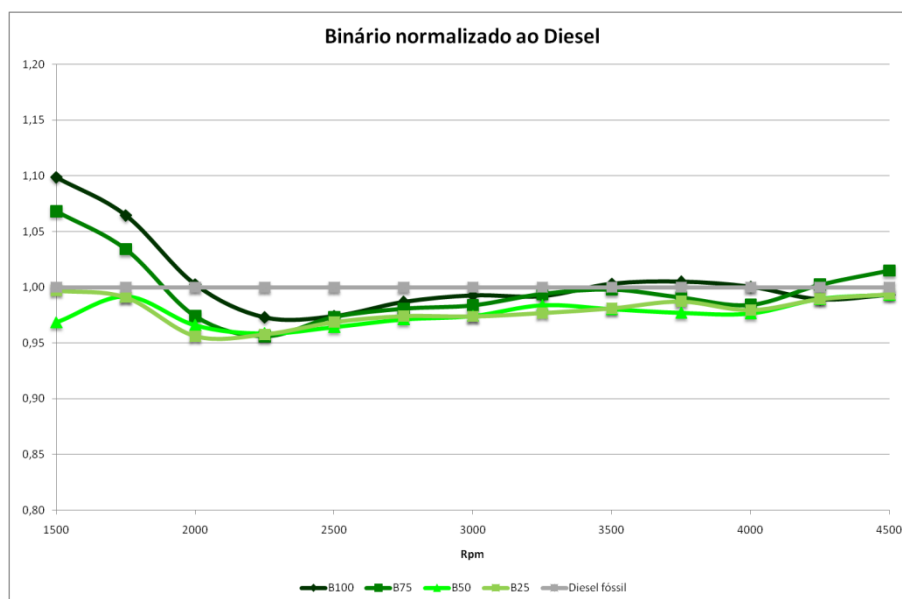


Figura 4.10 – Curvas de Binário normalizadas relativas às misturas B25, B50, B75, B100 do Biodiesel de Banha de Porco.

Como já foi visto na revisão bibliográfica a potência é dada pelo produto do binário pela velocidade. [1]

Assim como previsto a curva até perto das 2000, 2250 rpm tem uma perda de binário mais significativa e atinge valores aproximados de 4% para o B25 (Figura.4.10).

Para regimes entre 2000 e 3500 rpm o diesel apresenta valores de binário sempre superiores aos combustíveis com biodiesel. A perda máxima de binário registada é da ordem dos 5%.

Para regimes superiores a 3500 rpm é possível verificar que as curvas de potência se aproximam das do diesel, sendo ligeiramente superiores em algumas das rotações. A análise permite verificar que para estes regimes a perda de potência é pouco significativa.

Relativamente ao Biodiesel de sebo de bovino, fez-se uma análise idêntica apresentada nas figuras 4.11 e 4.12.

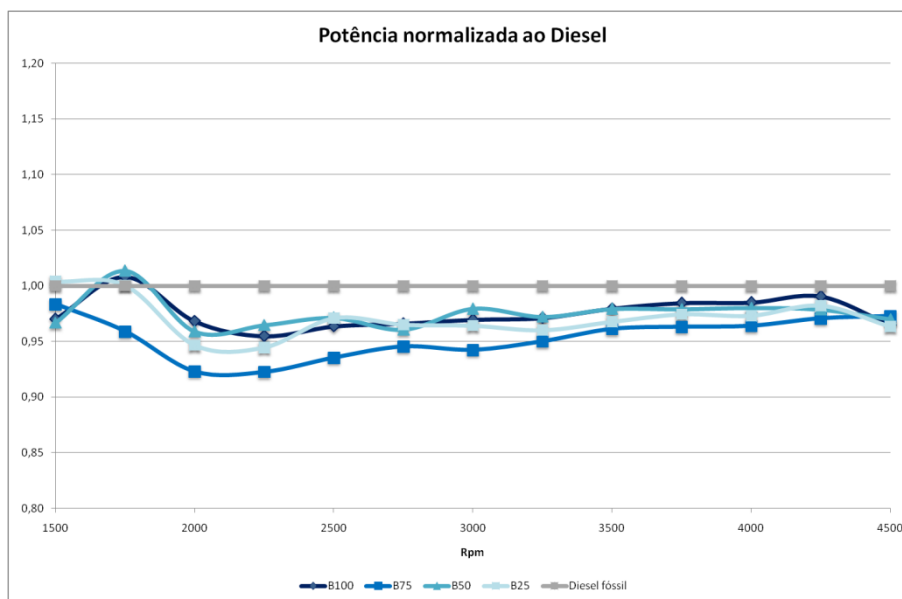


Figura 4.11 – Curvas de potência normalizadas relativas às misturas B25, B50, B75, B100 do Biodiesel de Sebo de Bovino.

Como se observa na figura 4.11, os resultados obtidos são muito semelhantes ao biodiesel de banha, exceptuando o B75 que apresenta uma maior perda em relação às outras misturas.

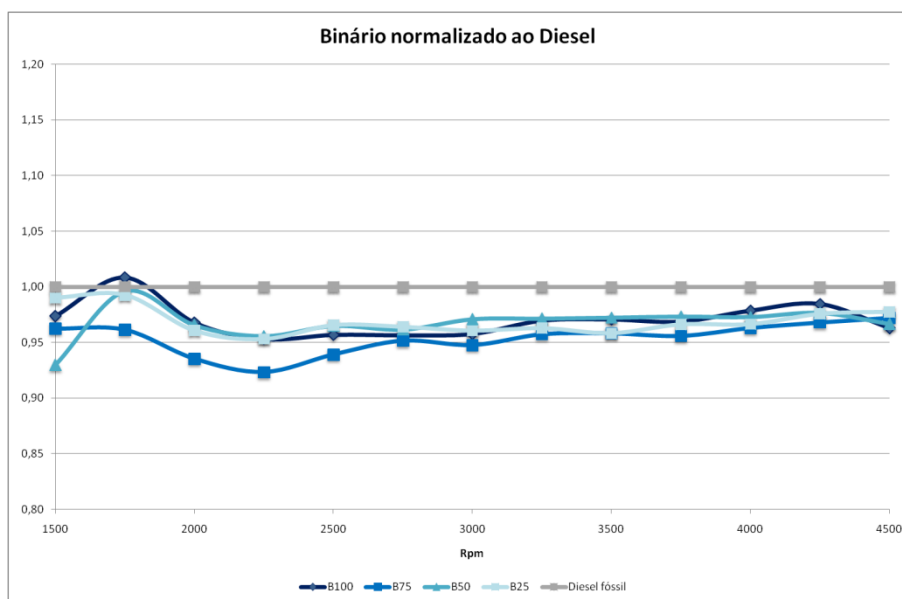


Figura 4.12 – Curvas de Binário normalizadas relativas às misturas B25, B50, B75, B100 do Biodiesel de Sebo de Bovino.

Tal como esperado, o binário comporta-se da mesma forma que a potência.

Como já referido o condicionamento da quantidade de biodiesel fornecido não permitiu repetir os ensaios.

4.2.2. Emissões de gases de escape

Neste último ponto, apresentam-se os resultados obtidos nos ensaios realizados para a obtenção das emissões de gases. Foram analisados os vários combustíveis e para cada regime do motor foram obtidas leituras de cada um dos gases a analisar.

Como já referido, a quantidade de biodiesel produzido e disponível para a realização dos ensaios de potência e das emissões gasosas era de 5 litros. Esta quantidade não permitiu a repetição de ensaios. Desta forma, apenas foi realizado um ensaio para cada um dos combustíveis a diferentes regimes.

4.2.2.1. Discussão dos resultados obtidos

Para uma melhor análise, - os resultados dos ensaios foram organizados para cada gás emitido.

1. CO

Nas tabelas 4.8 e 4.9 estão organizados os resultados das emissões de CO, para os nove combustíveis.

Com base nestes resultados foram elaborados os gráficos representados nas Figura 4.13-4.15.

Tabela 4.8 — Dados recolhidos dos níveis de CO (%Vol.) para cada combustível

RPM	Diesel	B100 Banha	B100 Sebo	B75 Banha	B75 Sebo
980	0,034	0,018	0,000	0,019	0,000
1250	0,046	0,013	0,008	0,008	0,000
2000	0,049	0,000	0,004	0,002	0,002
2500	0,053	0,000	0,002	0,001	0,000
3000	0,056	0,003	0,002	0,012	0,000
3500	0,064	0,006	0,004	0,010	0,003
4000	0,073	0,008	0,006	0,011	0,005

Tabela 4.9 — Dados recolhidos dos níveis de CO (%Vol.) para cada combustível

RPM	B50 Banha	B50 Sebo	B25 Banha	B25 Sebo
980	0,015	0,000	0,000	0,008
1250	0,004	0,000	0,003	0,008
2000	0,009	0,001	0,009	0,012
2500	0,006	0,002	0,010	0,008
3000	0,005	0,006	0,010	0,009
3500	0,007	0,006	0,012	0,011
4000	0,009	0,015	0,014	0,009

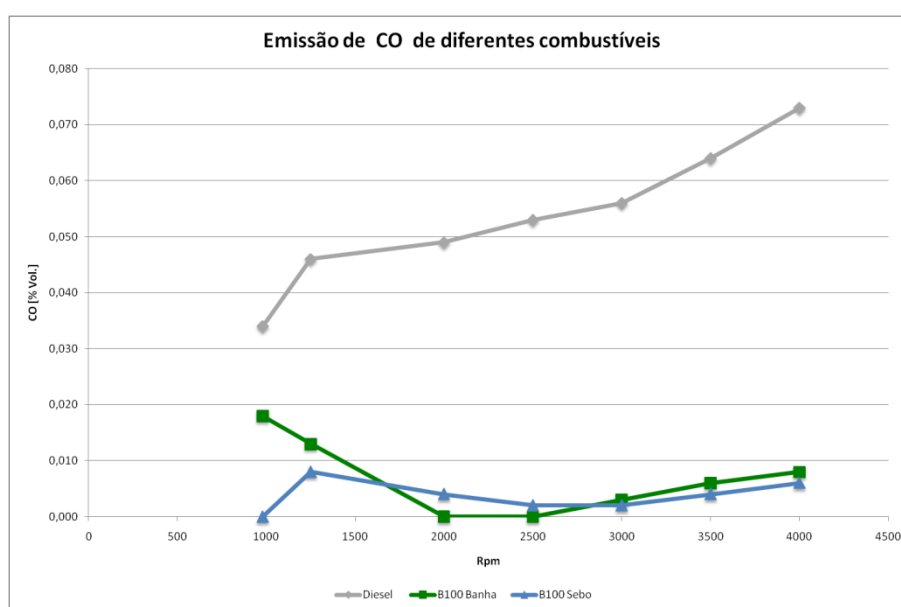


Figura 4.13 – Emissão de CO em função da rotação para os diferentes combustíveis.

Como se pode observar na figura 4.13, os biocombustíveis apresentam uma menor emissão de CO em comparação com o diesel fóssil. Por exemplo, para um regime a 2000 rpm as emissões de CO para o diesel são aproximadamente 11 vezes superiores aos dos biocombustíveis., facto este resultante da maior quantidade de carbono existente no diesel fóssil. Ou seja, como demonstrado anteriormente na revisão bibliográfica, o CO é resultado da combustão incompleta do carbono, assim quanto maior a quantidade de carbono existente no combustível maior será a emissão deste poluente.

O diesel fóssil ao contrário dos biocombustíveis, com o aumento da rotação, tende a aumentar a emissão deste poluente.

No caso dos biocombustíveis, é possível verificar que para regimes superiores a 1250 rpm, os valores de emissão de CO são muito similares.

Conclui-se que os biocombustíveis são menos poluentes que o diesel fóssil, relativamente a este poluente.

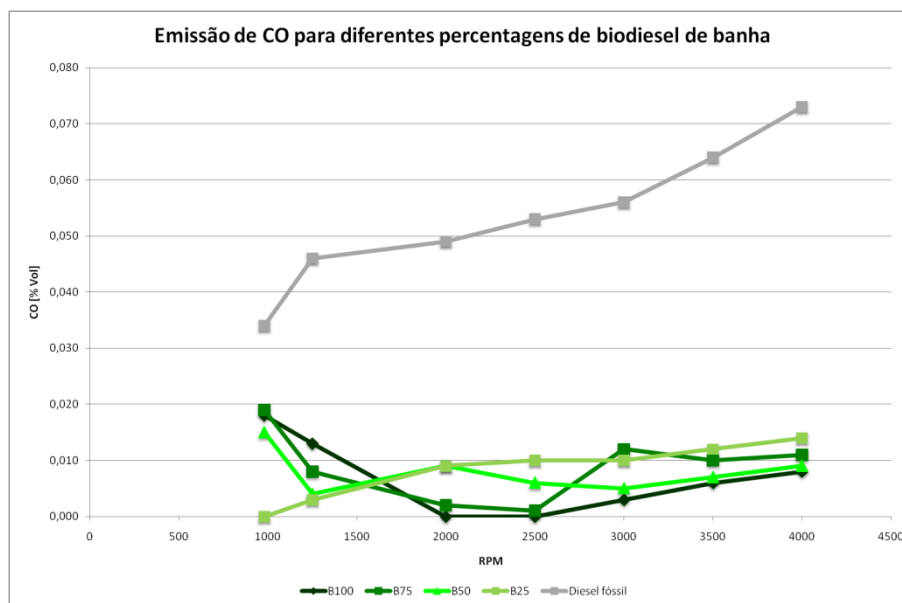


Figura 4.14 – Emissão de CO em função da rotação do motor para diferentes percentagens de biodiesel de banha.

Como se pode verificar na figura 4.14, a emissão de CO para as diferentes misturas de biodiesel continuam a ser baixas comparativamente ao diesel.

Mesmo para combustíveis com apenas 25 % de biodiesel a emissão de CO não é superior a 0,020 % Vol., enquanto o valor mínimo recolhido para o diesel é de 0,034 % Vol., mas apresenta uma tendência semelhante à do diesel.

Para regimes inferiores a 2000 rpm, verifica-se maior emissão de Monóxido de Carbono nos combustíveis com maior concentração de biodiesel.

Para regimes superiores a 2000 rpm e até perto das 3000 rpm, os combustíveis com menor percentagem de diesel têm emissões muito próximas de zero. Para estes regimes o valor máximo registado foi de 0,010% Vol. para o B25.

Para regimes superiores a 3000 rotações por minuto, inclusive, a emissão de CO dos vários combustíveis tende a estabilizar em torno de 0,020 % Vol.

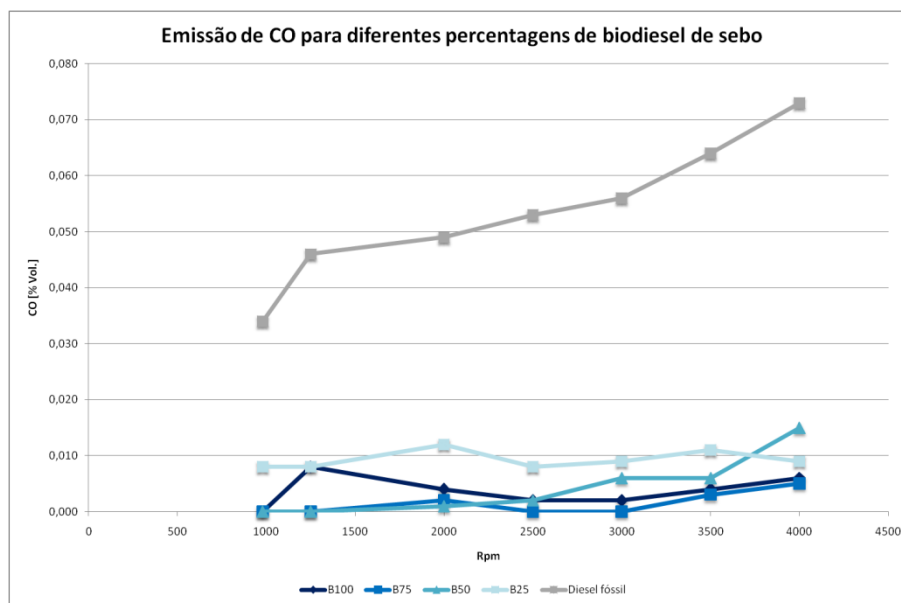


Figura 4.15 – Emissão de CO em função da rotação do motor para diferentes percentagens de biodiesel de sebo de bovino.

Da análise da figura 4.15 verifica-se que quanto maior a percentagem de biodiesel existente no combustível menor será a emissão deste poluente.

Pode-se concluir, nos testes realizados, que a utilização do biodiesel é uma solução para a diminuição da poluição por CO na atmosfera.

2. CO₂

Nas tabelas 4.10 e 4.11 estão organizados os resultados das emissões de CO₂, para os nove combustíveis.

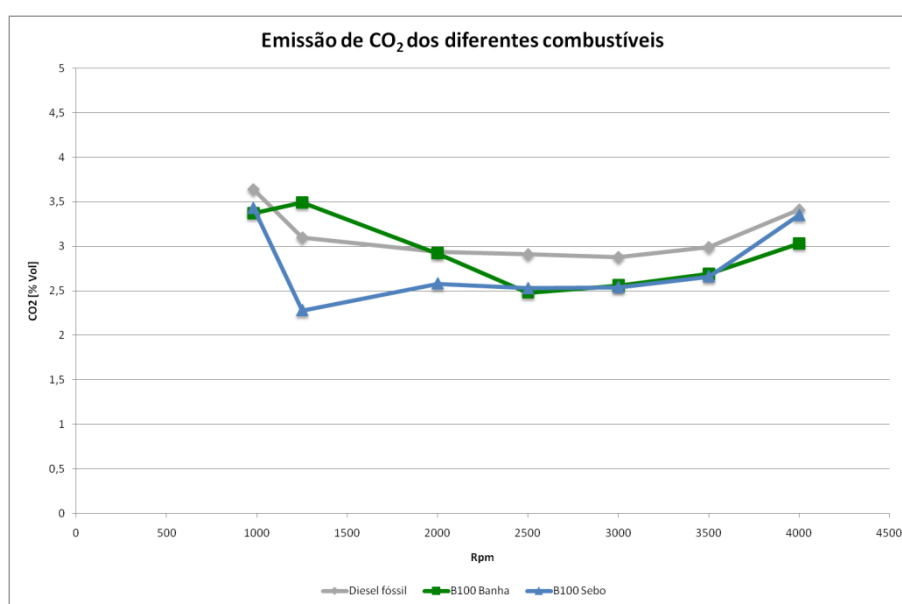
Com base nestes resultados foi elaborado o gráfico representado na Figura 4.16.

Tabela 4.10 — Dados recolhidos dos níveis de CO₂ (% Vol.) para cada combustível.

RPM	Diesel	B100 Banha	B100 Sebo	B75 Banha	B75 Sebo
980	3,64	3,37	3,43	3,51	2,71
1250	3,10	3,49	2,28	3,50	2,69
2000	2,94	2,92	2,58	2,78	2,66
2500	2,91	2,48	2,53	2,46	2,48
3000	2,88	2,56	2,54	3,63	2,57
3500	2,99	2,69	2,66	3,04	2,84
4000	3,41	3,03	3,35	3,04	3,35

Tabela 4.11 — Dados recolhidos dos níveis de CO₂ (% Vol.) para cada combustível.

RPM	B50 Banha	B50 Sebo	B25 Banha	B25 Sebo
980	3,49	3,06	3,47	3,32
1250	2,70	2,71	2,55	3,36
2000	2,58	2,97	2,50	3,17
2500	2,55	2,70	2,93	2,79
3000	2,54	2,53	2,82	2,73
3500	2,58	2,96	2,94	2,80
4000	3,08	4,78	3,21	3,08

Figura 4.16 – Emissão de CO₂ em função da rotação do motor para os diferentes combustíveis.

A tendência de emissão de CO₂ para os diferentes combustíveis é muito semelhante, mas os biocombustíveis continuam a ser um combustível com menor emissão deste gás inerte.

A regimes inferiores a 2000 rpm, a emissão de Dióxido de Carbono do biodiesel de sebo e do diesel tendem a diminuir, por outro lado, o biodiesel de banha tem um comportamento diferente para este regime. Seria aconselhado efectuar um novo ensaio para esclarecimento deste facto.

Para regimes superiores a 2000 rpm e até 3500 rpm as emissões de CO₂ tendem a estabilizar.

Nos regimes superiores a 3500 rpm é possível verificar que as emissões deste gás indesejável têm tendência a aumentar.

O Dióxido de Carbono, como foi evidenciado na revisão bibliográfica, é um gás inerte indesejável (não poluente) devido a ser um dos seis gases responsáveis pelo aquecimento global. Com a utilização do biodiesel analisado, obteve-se uma redução das emissões deste gás relativamente ao diesel fóssil.

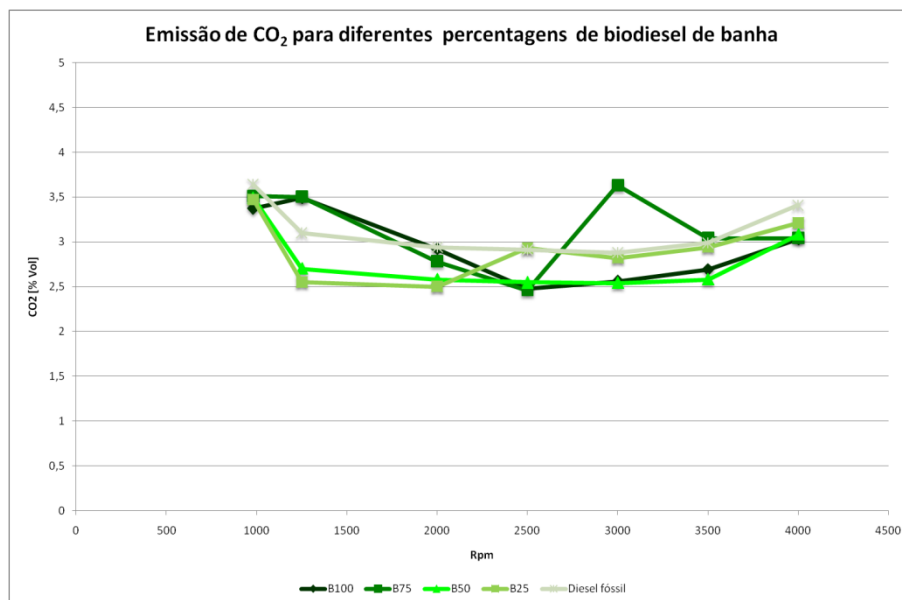


Figura 4.17 – Emissão de CO₂ em função da rotação do motor para diferentes percentagens de biodiesel de banha.

Da observação da evolução dos valores de emissão deste gás é perceptível que para regimes inferiores a 2000 rpm, a introdução de 25 e 50% de biodiesel no diesel favoreceu a diminuição da libertação deste gás, mas se o combustível tiver uma percentagem superior a 50% verifica-se que a introdução crescente de biodiesel no combustível favorece a formação deste composto.

Para regimes superiores a 2500 rpm, a emissão de CO₂ tende a estabilizar, mas verifica-se que o diesel apresenta maior emissão deste gás relativamente aos combustíveis com biodiesel.

Para regimes superiores a 3500 rpm é possível verificar que a emissão dos combustíveis com biodiesel aproxima-se da do diesel.

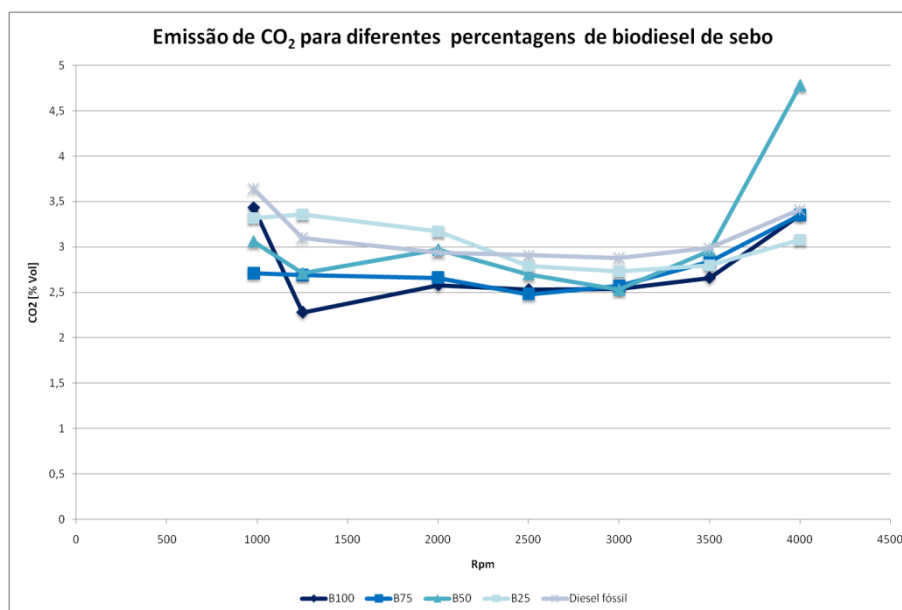


Figura 4.18 – Emissão de CO₂ para os vários regimes para o biodiesel de sebo.

Como se pode observar no gráfico da figura 4.18, existe uma tendência decrescente na emissão de CO₂, para valores de rotação constante, à medida que se aumenta a percentagem de biodiesel no combustível. Esta diminuição não se encontra de acordo com a bibliografia consultada.

Para regimes inferiores a 2000 rpm observa-se que o diesel apresenta maior emissão deste gás relativamente aos combustíveis com biodiesel, exceptuando o B25.

Para regimes superiores a 2000 rpm e até 3500 rpm o diesel apresenta valores de emissão sempre superiores aos combustíveis com biodiesel.

Para regimes superiores a 3500 rpm é possível verificar que a emissão dos combustíveis com biodiesel se aproxima da do diesel.

3. HC

Os resultados dos ensaios realizados para as emissões de HC foram organizados em duas tabelas 4.12 e 4.13 com as entradas de rotação do motor (Rpm) e nível de emissão de HC (ppm).

Com base nos resultados obtidos foram elaborados gráficos que ilustram a variação destas emissões, ver figura 4.19-4.21.

Tabela 4.12 — Dados recolhidos dos níveis de HC (ppm Vol.) para cada combustível.

RPM	Diesel	B100 Banha	B100 Sebo	B75 Banha	B75 Sebo
980	40	16	15	18	22
1250	68	37	18	14	19
2000	73	32	17	20	18
2500	78	33	17	22	22
3000	86	34	18	23	23
3500	98	35	19	23	24
4000	127	34	21	24	25

Tabela 4.13 — Dados recolhidos dos níveis de HC (ppm Vol.) para cada combustível.

RPM	B50 Banha	B50 Sebo	B25 Banha	B25 Sebo
980	15	17	19	10
1250	17	21	20	13
2000	18	23	22	15
2500	18	22	13	24
3000	19	23	14	22
3500	21	22	16	22
4000	23	23	18	22

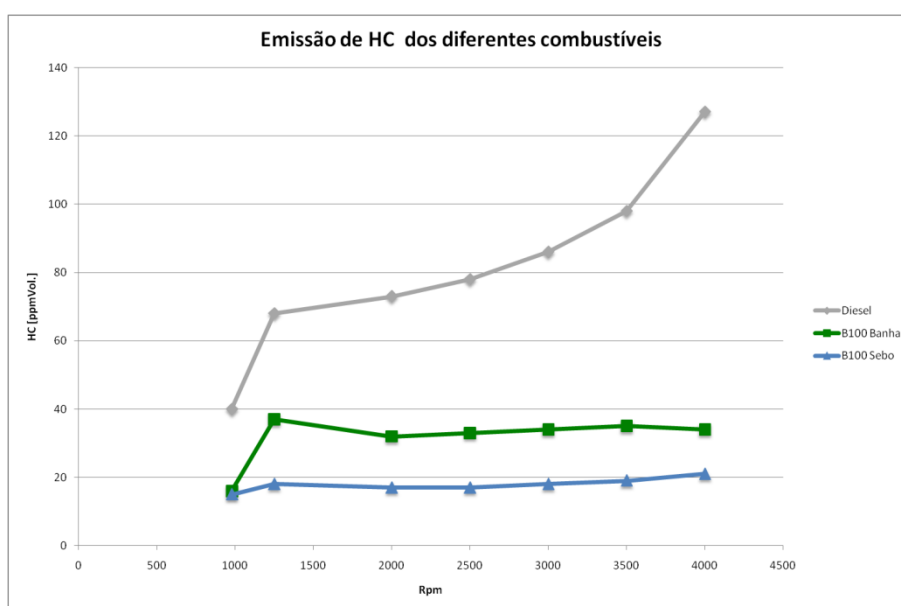


Figura 4.19 – Emissão de HC em função da rotação do motor para diferentes combustíveis.

Como se pode observar na figura 4.19, os biocombustíveis apresentam uma menor emissão de HC em comparação com o Diesel fóssil.

Os biocombustíveis com o aumento da rotação tendem a normalizar as emissões de HC.

O diesel fóssil pelo contrário, com o aumento da rotação, tende a aumentar a emissão deste poluente.

No caso dos biocombustíveis, é possível verificar que o biodiesel de sebo é menor emissor destes hidrocarbonetos.

Conclui-se que os biocombustíveis são menos poluentes do que o diesel fóssil, relativamente à emissão de HC.

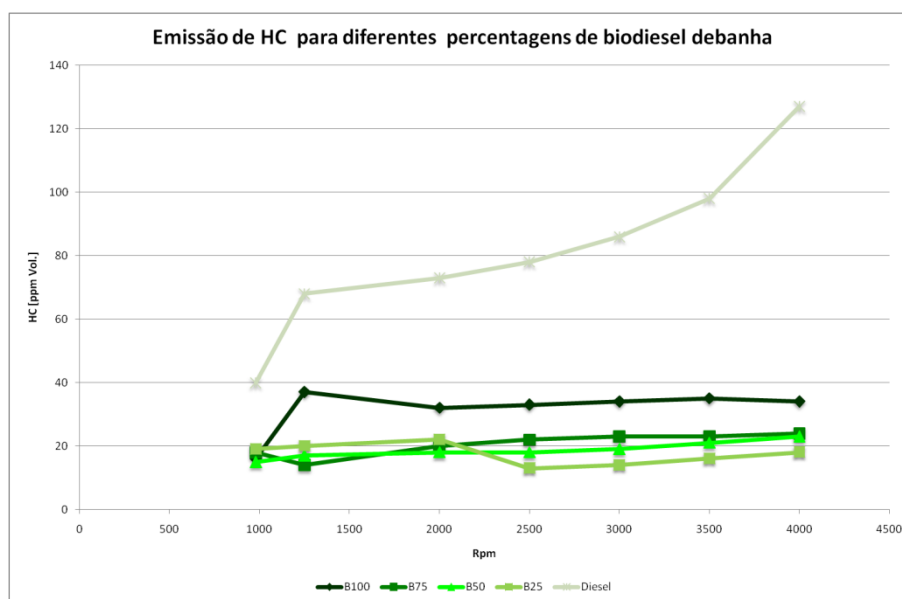


Figura 4.20 – Emissão de HC em função da rotação do motor para diferentes percentagens de biodiesel de banha.

Como se pode verificar na figura 4.20, as emissões de Hidrocarbonetos não Queimados para as diferentes misturas de biodiesel continuam a ser baixas comparativamente às diesel.

Para regimes inferiores a 2000 rpm, verifica-se uma superior emissão de HC para os combustíveis com menor concentração de biodiesel.

Para regimes superiores a 2000 rpm os combustíveis com menor percentagem de diesel têm emissões muito superiores, porém sempre inferiores às do diesel.

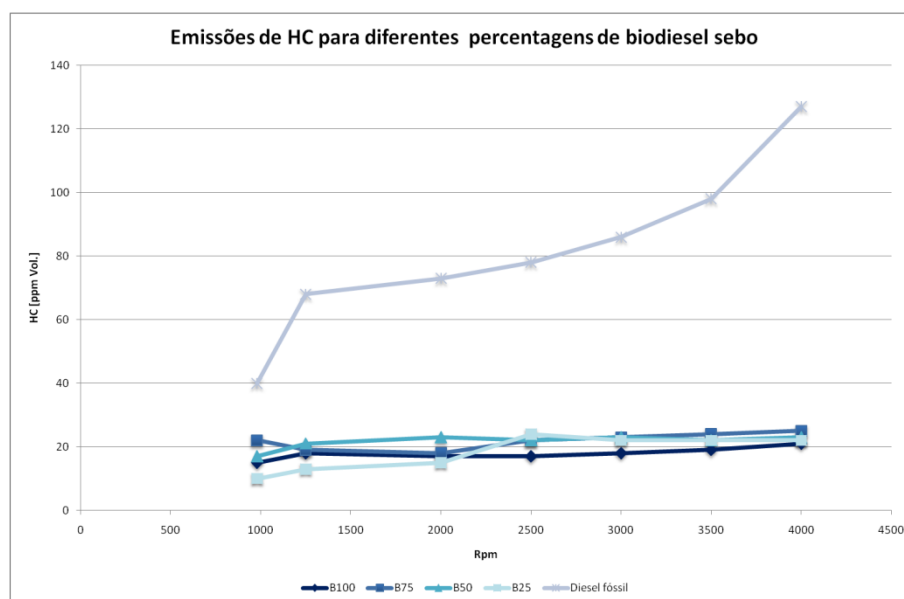


Figura 4.21 – Emissão de HC em função da rotação do motor para diferentes percentagens de biodiesel de sebo.

Da análise do gráfico da figura 4.21 verifica-se a existência de consistência dos resultados obtido.

O gráfico indica uma tendência para a sua diminuição com o aumento da percentagem de biodiesel, apesar das medições do B75 apresentarem valores superiores aos do B25 e do B75.

É de salientar que a introdução de biodiesel diminuiu a emissão de HC.

4. O₂

Nas tabelas 4.14 e 4.15 estão organizados os resultados das emissões de O₂, para os nove combustíveis.

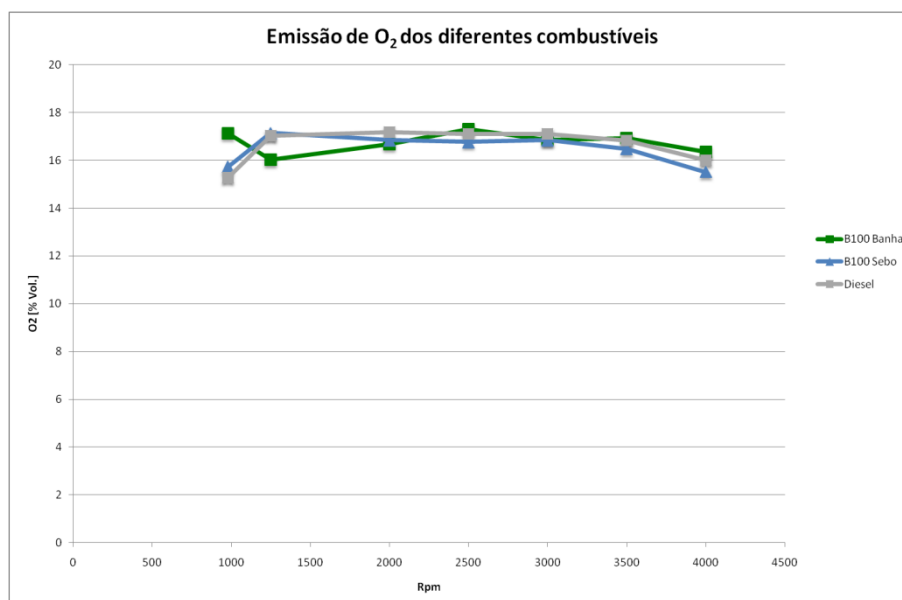
Com base nos resultados obtidos foram realizados diversos gráficos que ilustram a variação das emissões deste componente, ver figura 4.22-4.24

Tabela 4.14 — Dados recolhidos dos níveis de O₂ (% Vol.) para cada combustível.

RPM	Diesel	B100 Banha	B100 Sebo	B75 Banha	B75 Sebo
980	15,27	17,13	15,73	15,97	16,88
1250	17,02	16,03	17,14	15,87	16,76
2000	17,18	16,68	16,84	16,98	17,07
2500	17,10	17,30	16,77	17,21	16,97
3000	17,10	16,86	16,84	15,33	16,64
3500	16,82	16,92	16,48	16,43	16,26
4000	16,00	16,34	15,51	16,26	15,78

Tabela 4.15 — Dados recolhidos dos níveis de O_2 (% Vol.) para cada combustível.

RPM	B50 Banha	B50 Sebo	B25 Banha	B25 Sebo
980	15,92	16,35	15,79	16,06
1250	16,95	16,66	16,97	16,12
2000	17,02	16,26	16,91	16,24
2500	17,22	16,45	16,66	16,85
3000	17,04	17,13	16,74	16,65
3500	16,60	16,50	16,10	16,56
4000	16,19	15,34	15,75	16,07

Figura 4.22 – Emissão de O_2 em função da rotação do motor para diferentes combustíveis.

A tendência de emissão de O_2 para os diferentes combustíveis é muito semelhante.

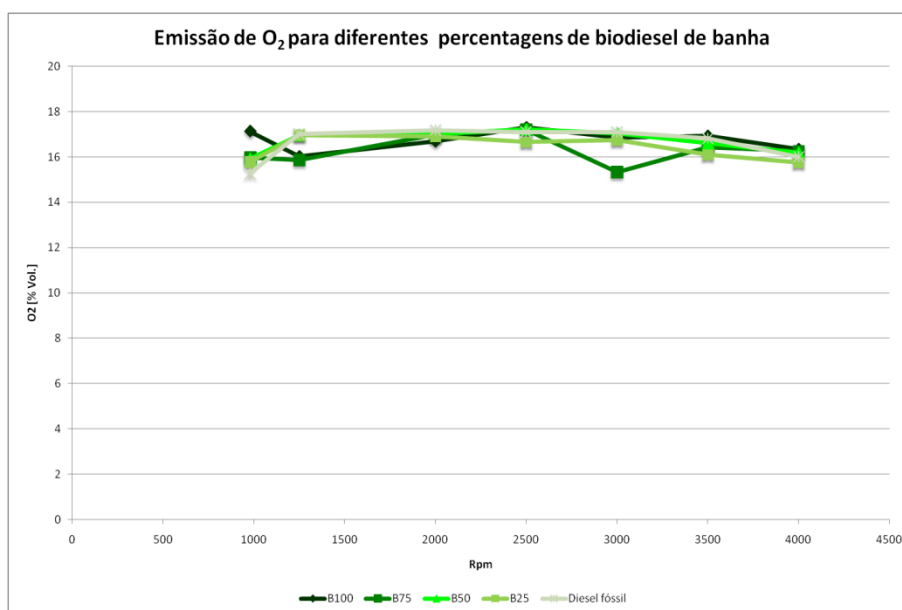


Figura 4.23 – Emissão de O_2 em função da rotação do motor para diferentes percentagens de biodiesel de banha.

Da observação da evolução dos valores de emissão deste gás é perceptível que as emissões dos diferentes combustíveis são muito semelhantes.

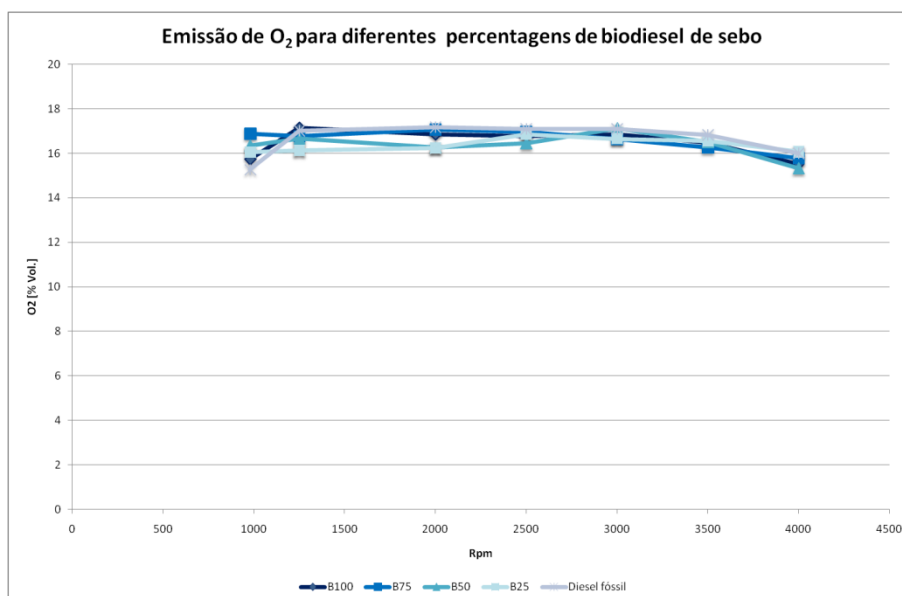


Figura 4.24 – Emissão de O_2 em função da rotação do motor para diferentes percentagens de biodiesel de sebo de bovino.

Por defeito o motor Diesel opera com excesso de ar, logo excesso de oxigénio. A semelhança de valores, de acordo com a bibliografia consultada, indica que o processo de queima do combustível terá ocorrido nas mesmas condições, obtendo-se assim valores muito semelhantes.

5. NO_x

Os resultados dos ensaios realizados para a emissão de NO_x foram organizados em duas tabelas com as entradas de rotação do motor (Rpm) e nível de emissão de NO_x (ppm) (Tabelas 4.16 e 4.17).

Com base nos resultados obtidos foram realizados gráficos que ilustram a variação desta emissão, figura 4.25-4.27.

Tabela 4.16 — Dados recolhidos dos níveis de NO_x (ppm Vol.) para cada combustível.

RPM	Diesel	B100 Banha	B100 Sebo	B75 Banha	B75 Sebo
980	245	285	334	186	299
1250	254	237	214	259	289
2000	234	306	247	237	208
2500	289	263	293	251	301
3000	203	175	209	335	205
3500	178	157	167	181	177
4000	182	147	173	135	187

Tabela 4.17 — Dados recolhidos dos níveis de NO_x (ppm Vol.) para cada combustível.

RPM	B50 Banha	B50 Sebo	B25 Banha	B25 Sebo
980	309	347	344	313
1250	224	330	207	313
2000	191	300	273	260
2500	280	258	234	326
3000	202	190	217	208
3500	176	150	173	194
4000	148	299	192	184

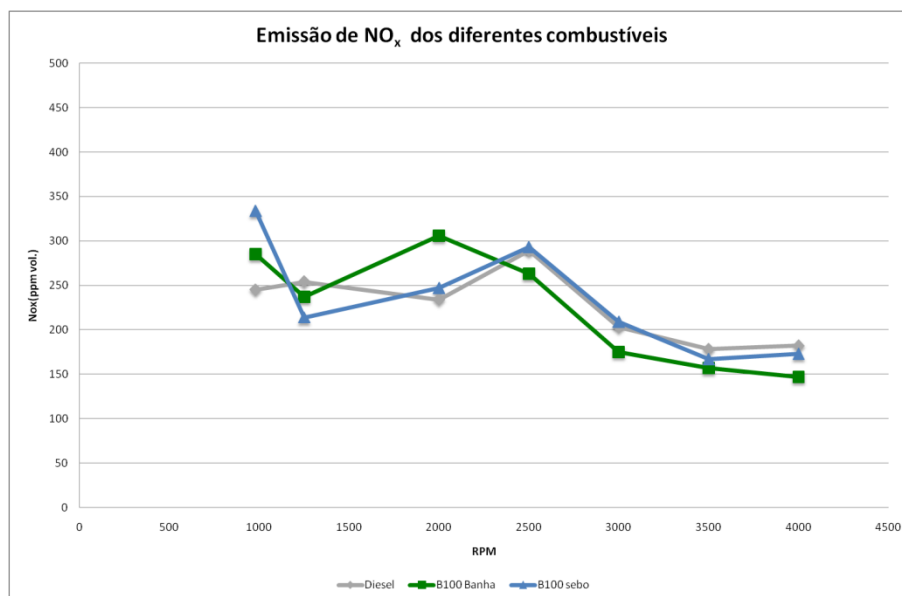


Figura 4.25 – Emissão de NO_x em função da rotação do motor para diferentes combustíveis.

Para as condições de ensaio, verifica-se que para regimes inferiores a 2500 rpm as emissões deste poluente são superiores nos biocombustíveis.

Para regimes superiores a 2500 rpm as emissões de NO_x variam das anteriormente analisadas, passando a registar-se valores superiores para o diesel e o biodiesel de sebo, que são muito semelhantes, e inferiores para o biodiesel de banha.

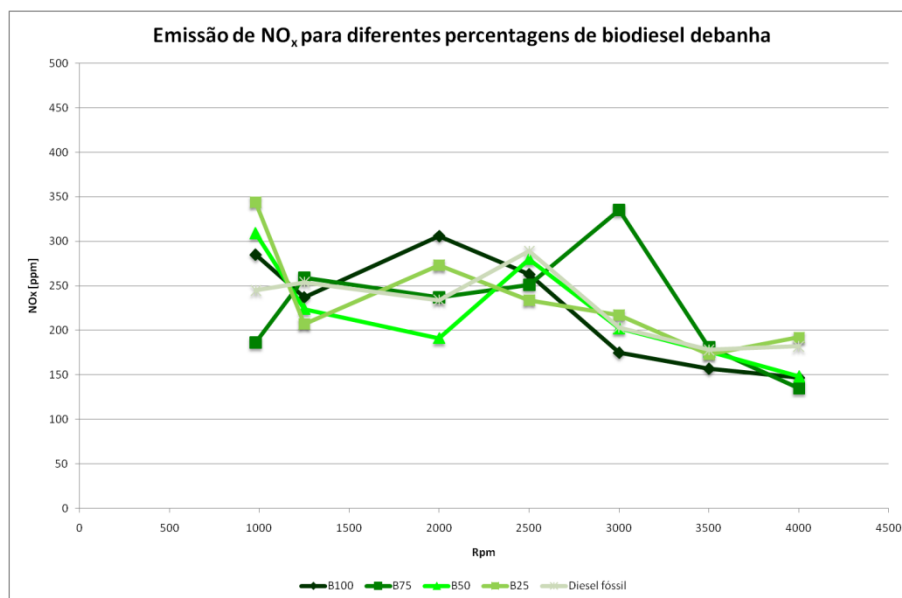


Figura 4.26 – Emissão de NO_x em função da rotação do motor para diferentes percentagens de biodiesel de banha.

Da análise do gráfico da figura 4.26, verifica-se que os dados obtidos são inconclusivos. Este ensaio deveria ser novamente repetido, mas devido às limitações da quantidade de biodiesel existente para estudo, tal não pode acontecer. Aconselha-se uma nova análise em trabalhos futuros.

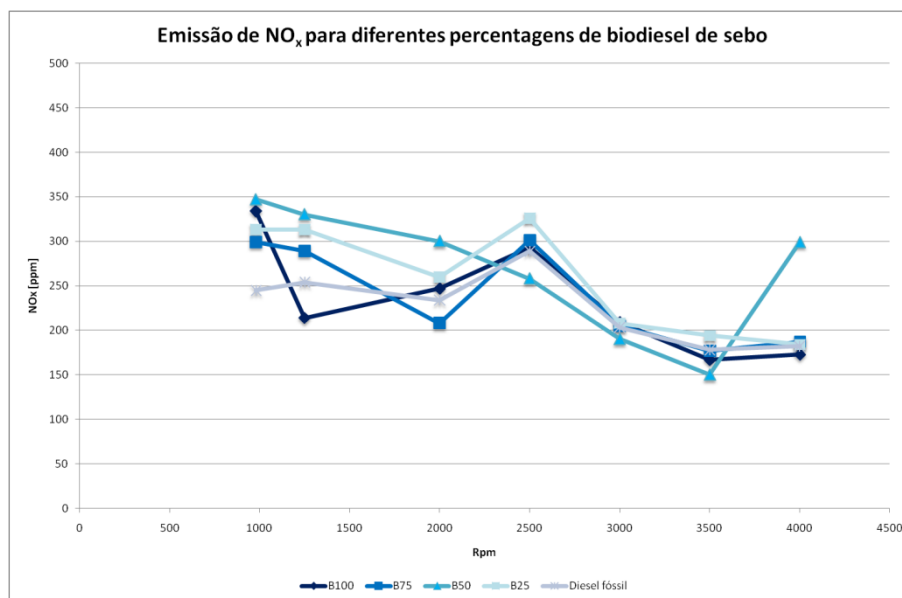


Figura 4.27 – Emissão de NO_x em função da rotação do motor para diferentes percentagens de biodiesel de sebo.

Da análise do gráfico da figura 4.27, verifica-se que os dados obtidos são inconclusivos para o B50. Este ensaio deveria ser novamente repetido, mas devido às limitações da quantidade de biodiesel existente para estudo, tal não pode acontecer. Aconselha-se uma nova análise em trabalhos futuros.

Conclusões e trabalhos futuros

5.1. Conclusões

Nesta dissertação, foi efectuado inicialmente um estudo de algumas propriedades da matéria-prima e do biodiesel, com o intuito de estudar mais aprofundadamente as suas características de forma a garantir a qualidade do biodiesel como combustível e na perspectiva da utilização destas gorduras directamente como combustíveis, no âmbito do projecto FATVALUE.

Através da análise dos resultados obtidos no subcapítulo 4.1 retiram-se as seguintes conclusões:

- O biodiesel de gordura tem o mesmo comportamento que a sua matéria-prima, ou seja, aquando do aumento da temperatura a massa volúmica diminui.
- As viscosidades cinemáticas dos biocombustíveis produzidos de gordura animal são cerca de 2 vezes superior ao do diesel fóssil. Da análise das viscosidades verifica-se que o único biodiesel que obedece à norma EN14214 é o biodiesel de banha de porco (4,76 mm²/s – 40°C). O biodiesel de sebo de bovino encontra-se ligeiramente superior à norma (5,05 mm²/s – 40°C).
- Com o aumento da temperatura de 60°C para 90°C verifica-se uma redução de viscosidade cinemática das gorduras animais de aproximadamente 50%.
- O poder calorífico dos biocombustíveis de gordura animal é aproximadamente 10% inferior relativamente ao diesel fóssil.
- O poder calorífico das matérias-primas é muito semelhante ao seu correspondente biodiesel.
- O “Flash Point” do sebo de bovino é superior ao da banha. Comparando o biodiesel de banha e de sebo os resultados são muito próximos mas muito superiores ao diesel (biodiesel de gordura $\cong$ 170°C; diesel fóssil $\cong$ 50°C).

A segunda fase desta dissertação, realiza uma análise a nível da prestação de motores diesel e emissões gasosas aquando da utilização do biodiesel puro (B100) de gordura animal, bem como o uso de fracções de biodiesel diluídas em diesel fóssil, num automóvel sem qualquer tipo de alteração.

Através da análise dos resultados de toda a investigação realizada nesta fase é possível retirar algumas conclusões sobre o comportamento do biodiesel obtido a partir de gordura animal.

Para as condições de ensaio de potência e binário foi possível concluir que:

- A utilização dos biocombustíveis resulta numa ligeira diminuição da potência e do binário.
- Os diferentes biocombustíveis apresentam curvas muito similares sendo por isso uma boa alternativa ao diesel fóssil.
- O aumento da percentagem destes biocombustíveis no combustível resulta, ao contrário do esperado, num ligeiro aumento de potência.

Da análise de todos os testes realizados com os biocombustíveis podemos concluir que o uso de biodiesel puro (B100), bem como o uso de fracções de biodiesel diluídas em diesel fóssil, num automóvel sem qualquer tipo de alteração, trazem variações significativas nas emissões gasosas produzidas por este automóvel.

A utilização destes biocombustíveis como combustível, resulta num ganho ambiental, pois contribui para a diminuição da poluição e do efeito estufa (diminui a emissão de CO₂, CO e HC).

Os resultados obtidos para o poluente NO_x foram inconclusivos, pois apenas foi possível verificar que para baixas rotações (<2000 rpm) os biocombustíveis puros são mais poluentes comparativamente ao diesel.

Em suma, pode-se concluir que a utilização destes biocombustíveis são uma boa opção para a redução da poluição provocada pelos gases de escape sem que para isso se tenha uma perda de eficiência no motor.

5.2. Trabalhos futuros

De seguida apresentam-se alguns trabalhos futuros suscitados pela realização deste trabalho:

- Realizar uma análise mais precisa na medição da potência e do binário do automóvel, utilizando um banco de potência estático no qual as condições de ensaio permitiriam uma precisão superior nos resultados obtidos.
- Utilização de um veículo automóvel com menos deficiências de ordem mecânica

Referências

- [1] Martins, Jorge (2006). *Motores de Combustão Interna*, 2ª edição. Publindústria
- [2] In Diciopédia 2008 [DVD-ROM]. Porto: Porto Editora, 2007. ISBN: 978-972-0-65263-8
- [3] <http://www.anossaescola.com/esvagos/recursos/MC2.ppt>
- [4] Torres, Felipe Carneiro da Cunha; Estudo da Utilização do Biodiesel para Geração de Energia Eléctrica no Brasil; Dissertação de Mestrado – Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da PUC-Rio; PUC-Rio –Certificação Digital nº 02102105/CA; Setembro de 2006; Rio de Janeiro.
- [5] Rei, Paulo Alexandre Guinote Verga; Procedimentos laboratoriais para o controlo da qualidade do Biodiesel; Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Química do Instituto Superior Técnico Universidade técnica de Lisboa; Setembro de 2007; Lisboa.
- [6] Pimenta, Daniel; Estudo da Influência do Biodiesel no Funcionamento de um Motor Diesel; Dissertação de Mestrado da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto; Julho de 2008; Porto.
- [7] Ramos, Diogo Mesquita; Influência do Biodiesel na Injecção de um Motor Diesel; Dissertação de Mestrado da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto; Fevereiro de 2009; Porto.
- [8] KNOTHE, G. Perspectivas históricas de los combustibles diesel basados em aceites vegetales. Revista A&G, 47, Tomo XII, No. 2., 2001.
- [9] Jr., Luiz Carlos Martinelli. “Máquinas Térmicas I – Motores de combustão interna” disponível em <http://fabioferrazdr.files.wordpress.com/2008/08/mci.pdf>

- [10] Moreira, Sérgio; Estudo da Influência do Biodiesel nas emissões poluentes de um motor turbo Diesel; Dissertação de Mestrado da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto; Fevereiro de 2008; Porto.
- [11] <http://www.biodieselbr.com/biodiesel/historia/biodiesel-historia.htm>
- [12] <http://www.sober.org.br/palestra/9/171.pdf>
- [13] <http://www.lipor.pt/upload/Lipor/ficheiros/caderno%20biodiesel%20final%20290109.pdf>
- [14] Decreto-Lei nº 62/, de 21 de Março de 2006, I SÉRIE-A disponível em <http://dre.pt/pdf1sdip/2006/03/057A00/20502053.pdf>
- [15] <http://www.energiasrenovaveis.com>
- [16] http://www.spq.pt/boletim/docs/boletimSPQ_110_041_09.pdf
- [17] <http://www.pme.online.pt/fotos/noticias/BIODIESEL.pdf>
- [18] http://www.sugre.info/docs/AGENEAL_Joana_Fonseca_PRIO.pdf
- [19] http://www.serviteste.com.br/hist_diesel1.htm
- [20] <http://www.biodieselbr.com/estudos/biodiesel>
- [21] <http://www.ebb-eu.org/biodiesel.php#eupro>
- [22] <http://www.apambiente.pt/politicasambiente/CamadaOzono/Documents/Ozono.pdf>
- [23] <http://eur-lex.europa.eu>
- [24] www.buzina.pt
- [25] <http://www.diario-universal.com/2007/10/aconteceu/guerra-do-yom-kipur/>

Anexo A

Protocolos experimentais

Descreve-se neste anexo os protocolos da análise laboratorial das matérias-primas, estes protocolos são os normalmente utilizados para a caracterização no Laboratório de Resíduos da FEUP.

Neste anexo encontra-se a descrição dos ensaios realizados no automóvel (ensaio de potência e binário, e análise das emissões gasosas).

1.1. Análise laboratorial das matérias-primas (banha e sebo)

Estes ensaios para a determinação das propriedades das matérias-primas foram realizados nos laboratórios de tratamento de resíduos e no LEPAE

1.1.1. Massa volúmica em função da temperatura

A massa volúmica vai ser fundamental para o cálculo das propriedades abaixo descritas.

Para obtermos a variação desta característica em função da temperatura foi necessário efectuar ensaios a diferentes temperaturas (60°C, 70°C, 80°C e 90°C) e utilizar um elemento padrão.

1.1.1.1. Material utilizado

- 5 Goblés com as Amostras (banha, sebo, biodiesel de sebo e de banha) e com um elemento padrão(água destilada);
- 4 Picnómetros de 25 ml;
- Banho termoestático;
- Balança analítica;
- Suporte para picnómetros;
- O`rings;
- Papel absorvente;
- Placa de aquecimento;

- Termómetro;
- Funil;
- Água destilada (solução padrão);
- Acetona;
- Estufa;
- Cronómetro.

1.1.1.2. Procedimento experimental

- Colocar os picnómetros na barra suporte e fixa-los com os o' rings. (Ver Figura A1)
- Calibrar os picnómetros (pelo menos 15 minutos após a sua colocação no banho colocado na bancada, procedendo da seguinte forma para cada um e realizando as determinações no espaço de tempo o mais curto possível de forma a minimizar erros decorrentes das variações de temperatura:
 - Retirar o picnómetro do banho a 60°C.
 - Enxaguar muito bem com papel absorvente e pesar na balança analítica, repetindo a pesagem 3 valores de massa que sejam suficientemente próximos.
 - Encher o picnómetro com a água destilada a 60 °C (previamente aquecida, até a temperatura do banho, na placa de aquecimento) enxaguar muito bem com papel absorvente e proceder à pesagem como no ponto anterior.
 - Retirar a água, lavar o picnómetro com acetona, secar na estufa e voltar a colocar no banho.
- Encher cada um dos picnómetros previamente calibrados com as diferentes amostras que se encontram nos goblés (previamente aquecidas, até a temperatura do banho, na placa de aquecimento), enxaguar muito bem com papel absorvente e pesar na balança analítica e registando 3 valores de massa que sejam suficientemente próximos.
- Transferir as amostras para o frasco de resíduos, lavar os picnómetros algumas vezes com água corrente e sabão, de seguida com acetona e por fim água destilada e colocá-los na estufa a secar.
- Repetir o procedimento para as restantes temperaturas a ensaiar.



Figura A1 – Material utilizado



Figura A2 – Calibração dos picnómetros

1.1.1.3. Determinação

A massa volúmica, ou densidade absoluta (ρ), está definida como sendo a massa por unidade de volume (Eq.1.10) e exprime-se em Kg/m³.

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1.10)$$

A determinação da massa volúmica pode ser feita com base na determinação do peso de um volume conhecido da substância em causa. Conhecido o seu volume é possível determinar por pesagem a massa específica de qualquer substância por aplicação da expressão de definição da massa específica Eq.1.10

O método consiste:

- 1) **Taragem do picnómetro.** Corresponde à pesagem do picnómetro vazio à temperatura a determinar.
- 2) **Volume do picnómetro.** Corresponde à pesagem do picnómetro cheio de água destilada (elemento padrão). Através da Eq.1.11 obtemos a massa da água.

$$m_0 = m_{p+0} - m_p \quad (1.11)$$

No qual

m_0 - Massa do elemento padrão

m_{p+0} - Massa do picnómetro com o elemento padrão

m_p - Massa do picnómetro vazio

Como se tem a massa volúmica da substância padrão (ρ_0) a várias temperaturas (Anexo B), pode-se calcular o volume do picnómetro (V_p) através da Eq.1.12

$$V_p = \frac{m_0}{\rho_0} \quad (1.12)$$

- 3) **Massa volúmica do elemento em estudo.** Trata-se da pesagem do picnómetro cheio de líquido cuja massa volúmica (ρ) se pretende determinar. A massa do elemento em estudo (m) é dada por:

$$m = m_{p+e} - m_p \quad (1.13)$$

No qual

m_{p+e} - Massa do picnómetro com o elemento em estudo

Aplicando a Eq.1.10 obtém-se a massa volúmica desejada.

1.1.2. Densidade em função da temperatura

A densidade, ou densidade relativa (d), como grandeza adimensional determinada pelo quociente entre a massa volúmica da substância em questão (ρ) e a massa volúmica duma substância padrão (ρ_0), a pressão e temperatura bem sucedidas.

1.1.2.1. – Determinação

Define-se densidade, ou densidade relativa (d), como a grandeza adimensional determinada pelo quociente entre a massa volúmica do elemento em questão (ρ) e a massa volúmica dum elemento padrão (ρ_0), a pressão e temperatura bem definidas (Eq.1.14). Para líquidos toma-se como padrão a água pura que à temperatura de 3,98°C e à pressão de 1 atm, regista uma massa volúmica de 0,9999973 g/cm³.

$$d_{T_0, P_0}^{T, P} = \frac{\rho(T, P)}{\rho_0(T_0, P_0)} \quad (1.14)$$

1.1.3. Viscosidade

A viscosidade é uma propriedade característica dos líquidos e gases reais e newtonianos que se caracteriza pela medida da resistência ao escoamento que um fluído oferece quando se encontra sujeito a um esforço tangencial. [2]

A viscosidade cinemática mede a resistência que um fluído apresenta ao fluir sob o efeito da força da gravidade.

1.1.3.1. Material utilizado

- Banho de precisão para viscosímetros;
- Suporte de viscosímetros;
- Cronometro;
- Pêra;
- Pipeta;
- Pompete;
- Amostras;
- Termómetro;
- Acetona;
- Água destilada.



Figura A3 – Banho de precisão para viscosímetros

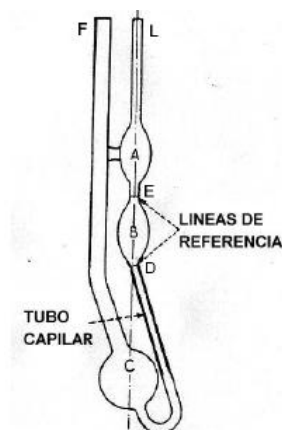


Figura A4 – Viscosímetro [5]

1.1.3.2. Procedimento experimental

- Verificar se o viscosímetro se encontra em perfeitas condições, isto é, se o viscosímetro se encontra limpo, sem gordura e completamente seco.
- Montagem do viscosímetro no suporte e colocação deste no banho termostático (à temperatura desejada e verificado com o termómetro).
- Calibrar o viscosímetro (pelo menos 20 minutos após a sua colocação no banho termostático)
- Introduzir os 10 ml da amostra no viscosímetro, pelo tubo L (ver Figura A4).
- Aguardar 20 minutos para que a temperatura da amostra fique homogênea.
- Aspirar o líquido com a ajuda da pêra até que este esteja cerca de 5 mm acima da marca E, retirar a pêra e cronometrar o tempo de escoamento da amostra desde o menisco da marca E até ao D.
- Repetir e registar valores até uma aproximação óptima (pelo menos 3 valores).
- Transferir a amostra para o frasco de resíduos, lavar o viscosímetro algumas vezes com água corrente e sabão, de seguida com acetona e finalmente água destilada e colocá-lo na estufa a secar.
- Quando o viscosímetro estiver seco, repetir para as várias amostras e temperaturas.

1.1.3.3. Determinação

O cálculo das viscosidades segue a norma ISO 3104 e apresenta-se a seguir:

- Viscosidade cinemática** é dada por:

$$\nu = Cxt \quad (1.15)$$

No qual

ν - Viscosidade cinemática [mm^2/s]

C – Constante de calibração do viscosímetro [mm^2/s^2]

t – Tempo de ensaio [s]

- **Viscosidade dinâmica** No cálculo desta viscosidade vamos são necessários os dados obtidos a partir da Eq.1.15.

$$\mu = \nu \times \rho \times 10^{-3} \quad (1.16)$$

No qual

μ - Viscosidade dinâmica [mPa/s]

ρ - Massa volúmica [kg/m³]

1.1.4. Poder calorífico superior

O poder calorífico é a quantidade de energia química disponível no combustível.

Este é medido a partir da quantidade de calor extraída durante a combustão, considerando as temperaturas dos reagentes iguais às dos produtos da combustão. [1]

1.1.4.1. Material utilizado

- Calorímetro de Bomba de Oxigenio-Parr 1341
- 2l de água destilada;
- Fio fusível;
- Acetona;
- Amostras;
- Balança analítica.

1.1.4.2. Procedimento experimental

- Preparação da pelete:
 - a) Pesar aproximadamente 1.000g de amostra.
- Preparação do sistema:
 - b) Medir exactamente 2 litros de água desionizada e colocá-la em repouso para atingir temperatura constante. Deitá-la no balde do calorímetro.
 - c) Medir e cortar exactamente 10 cm de fio de fusão. Colocá-lo no suporte de modo que as pontas fiquem bem presas no suporte.
 - d) Colocar a pelete sobre o fio de fusão. Deve haver sempre o cuidado ao mexer na bomba para que a pelete não perca o contacto com o fio de fusão, caso contrário não se efectuará a combustão da amostra.
 - e) Fechar a bomba pressionando o suporte. Durante esta operação a válvula de saída do gás deve permanecer aberta. Colocar a rosca até ao máximo e fechar a válvula de saída do gás.
 - f) Encher a bomba com oxigénio até a pressão de 30 atm, muito lentamente. Este procedimento deve demorar cerca de 1 minuto.

- g) Colocar a bomba dentro do balde do calorímetro. Cuidado para não remover água do interior do balde e para não agitar a bomba para que a paleta não se desloque no seu interior. A bomba deve ficar colocada no local exacto para evitar que se desloque durante a combustão.
- h) Colocar a tampa do corpo do calorímetro com o agitador e o termopar. O agitador deve ficar ligado durante 5 minutos para estabilizar a temperatura da água do balde.
- i) Para proceder ao ensaio, fazer:
 - a. *15 [ENTER] (para dar início ao ensaio)
 - b. [ENTER] (numeração automática do ensaio)
 - c. Massa de amostra [ENTER] (introduzir o valor da massa da amostra)A partir deste momento o programa está a decorrer, no pré-período. Passado este período ouve-se um sinal sonoro que significa que se deve proceder à ignição da bomba, premindo o botão do lado direito do condensador. Após a ignição está a decorrer o post-período. O final do ensaio será assinalado por um sinal sonoro. Premindo a tecla [DONE], aparecerá no ecran o valor do poder calorífico da amostra em cal/g.
- j) Retirar a bomba do balde do calorímetro e despressurizá-la lentamente, por abertura gradual da válvula de saída do gás.
- k) Lavar o interior da bomba com água

1.1.5. pH

A escala de pH, em que p significa potencial e H hidrogénio, consiste numa escala algorítmica para exprimir a acidez ou alcalinidade de uma solução. O pH pode ser medido de forma aproximada com o auxílio de indicadores, que experimentam viragens de cores a determinados valores de pH. [2]

1.1.5.1. Material utilizado

- PH indicater strips
- Termómetro
- Placa de aquecimento
- Goblés com as amostras a analisar

1.1.5.2. Procedimento experimental

- a) Colocar o goblé com a amostra na placa de aquecimento.
- b) Deixar elevar a temperatura um pouco acima da desejada e retirar da placa.
- c) Quando a amostra estiver á temperatura desejada mergulhar a tira na amostra e aguardar 3 segundos e retirar.
- d) Verificar o padrão de cores da tira com a tabela de padrões de cores existente no frasco (realizar a identificação no espaço de tempo mais curto possível de forma a minimizar erros)

- e) Registrar o valor obtido e aumentar a temperatura para verificar se o pH vai ser alterado pela temperatura da amostra.
- f) Transferir a amostra para o frasco de resíduos, lavar o goblé algumas vezes com água corrente e sabão, de seguida com acetona e finalmente água destilada e colocá-lo na estufa a secar.
- g) Lavar o termómetro algumas vezes com água corrente e sabão, de seguida com água destilada e enxugar bem com papel absorvente.

1.1.6. “Flash Point”

O “flash point” de um combustível é a temperatura mínima para a qual o combustível ou neste caso as matérias-primas entram facilmente em ignição aquando em presença de uma fonte de ignição (neste caso uma chama). [1]

1.1.6.1. Material utilizado

- Goblés com amostras;
- Placa de aquecimento;
- Isqueiro;
- Papel absorvente;
- Régua;
- Barra magnética;
- Flash point testers;
- Seringa 2ml.



Figura A5 – Flash Point testers

1.1.6.2. Procedimento experimental

- a) Verificar se o isqueiro do equipamento tem gás;
- b) Verificar se o vaso do equipamento está limpo;
- c) Ligar o aparelho à corrente;
- d) Verificar o tamanho da chama;
 - a. Posicionar o botão do gás do isqueiro em on;
 - b. Com um isqueiro ligar a ponta piloto;
 - c. Regular o tamanho da chama;
 - d. Verificar com uma régua o tamanho das duas chamas (piloto 12mm de altura e a chama de teste 4 mm de diâmetro);
- e) Desligar o gás;
- f) Ligar o aparelho;
- g) Premir sem largar no botão do tempo até se ouvir um sinal sonoro;
- h) Largar o botão e rodar o controlo até aparecer 1 minuto;
- i) Premir sem largar o botão da temperatura até se ouvir um sinal sonoro;
- j) Largar o botão e rodar o controlo até aparecer a temperatura desejada;
- k) Esperar pelo sinal sonoro;

- l) Injectar a amostra previamente aquecida;
- m) Premir o botão do tempo e começará uma contagem decrescente de 60 segundos;
- n) Nesses segundos deve-se repetir a alínea iv;
- o) Esperar pelo sinal sonoro e puxar pela patilha e larga-la 2,5 segundos depois
- p) Repetir no mínimo 3 vezes e verificar se no visor aparece flash;
- q) Repetir a alínea j e descer a temperatura limpar tudo muito bem com um papel absorvente;
- r) Se foi detectado flash:
 - a. Limpar o vaso com álcool;
 - b. Esperar até o sinal hot estiver desligado;
 - c. Desligar o aparelho;
 - d. Verificar se o gás do isqueiro está na posição off;
 - e. Tapar o aparelho.
- s) Se não foi detectado flash:
 - a. Procedimento a partir da alínea i.

1.1.7. Temperatura de fusão

Temperatura à qual as matérias-primas passam do estado sólido para o estado líquido (óleo).

1.1.7.1. Material utilizado

- Goblés com amostra
- Banho termoestático;
- Suporte para goblés;
- O`rings;
- Termómetro;
- Acetona;
- Estufa;
- Placa de aquecimento;
- Barra magnética.

1.1.7.2. Procedimento experimental

- a) Colocar o goblé e o termómetro na barra suporte e fixa-los com o`rings.
- a) Calibrar o goblé com a amostra (pelo menos 20 minutos após a sua colocação no banho colocado na hotte) e verificar a temperatura do banho.
- b) Colocar uma barra magnética e ligar a placa magnética.
- c) Verificar se a amostra começa a liquidificar;
- d) Se não houver alteração voltar a aumentar a temperatura até as amostras apresentarem-se completamente líquidas (em óleo).
- e) Registrar a temperatura e realizar o teste pelo menos 2 vezes.

- f) Retirar a barra magnética e transferir a amostra para o frasco de resíduos, lavar o goblé algumas vezes com água corrente e sabão, de seguida com acetona e finalmente água destilada e colocá-lo na estufa a secar.

1.2. Ensaios no automóvel

1.2.1. Ensaio de Binário e Potência

1.2.1.1. Material usado

- Depósito externo com combustíveis a ensaiar;
- Derivações das ligações de admissão e retorno;

1.2.1.2. Equipamento

- Banco de potência -MAHA LPS2000

1.2.1.3. Procedimento [6]

- Montagem do automóvel no banco de potência
 - Colocar o carro nos rolos, alinhar e prendê-lo.
 - Ligar exaustor do escape e ventilador frontal de arrefecimento.
- Ligação do depósito externo com o combustível a ensaiar (ver Figura A6)
- Ligar a admissão ao depósito externo.
- Após um minuto de funcionamento do motor (tempo suficiente para garantir a renovação de todo o combustível no sistema de admissão e filtro de combustível), ligar o retorno para o depósito externo.

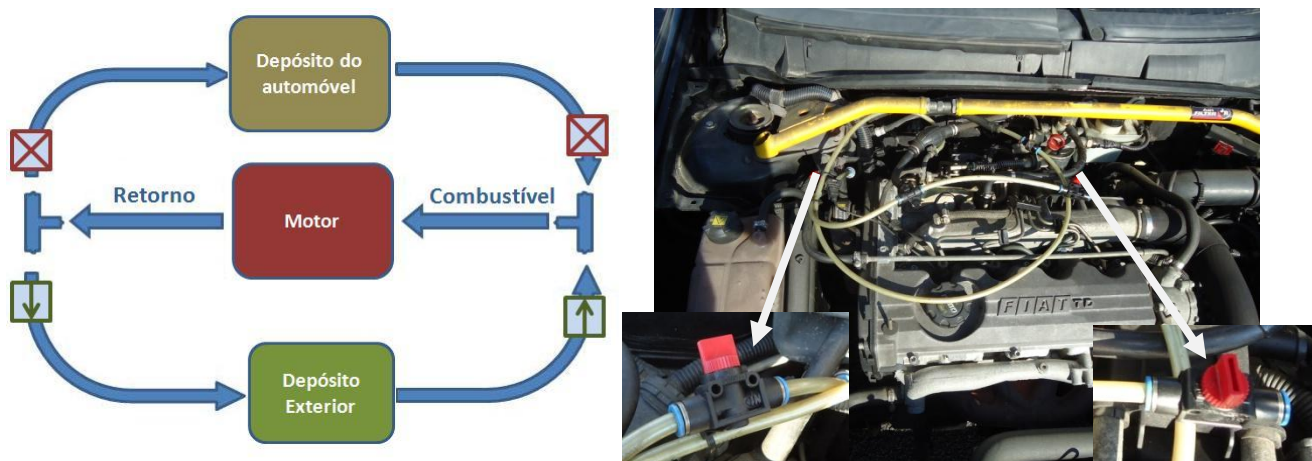


Figura A6 – Esquema das alterações introduzidas no sistema de alimentação e retorno de combustível do automóvel utilizado nos ensaios realizados. [10]



Figura A7 – Banco de Rolos.

1.2.2. Emissões gasosas

Este ensaio foi efectuado nas oficinas de Engenharia Mecânica. Os vários combustíveis foram ensaiados sem carga, a sete regimes de rotação pré-definidos para a caracterização das emissões gasosas ao longo de todo o regime de utilização do motor.

O estudo desta questão foi já iniciado na investigação da Faculdade, por Sérgio Moreira, assim sendo, e com base nas curvas de potência e binário obtidas no banco de potência foram definidas as seguintes rotações de leitura de gases:

- 980 Rpm (Ralenti do automóvel ensaiado)
- 1250 Rpm (Regime de subida de binário e potência)
- 2000 Rpm (Regime de binário máximo)
- 2500 Rpm (Regime de binário máximo com potência em subida)
- 3000 Rpm (Binário em queda e subida de potência)
- 3500 Rpm (Regime de potência máxima com queda de binário)
- 4000 Rpm (Regime a partir do qual ambas as curvas têm uma trajectória descendente)

1.2.2.1. Material utilizado

- Depósito externo com combustíveis a ensaiar;
- Derivações das ligações de admissão e retorno;

1.2.2.2. Equipamento

- Equipamento de análise de gases Stargas 898– (Figura A8)

1.2.2.3. Procedimento

- a) Ligação do depósito externo com o combustível a ensaiar
- b) Ligar a admissão ao depósito externo.

- c) Após um minuto de funcionamento do motor (tempo suficiente para garantir a renovação de todo o combustível no sistema de admissão e filtro de combustível), ligar o retorno para o depósito externo.



Figura A8 – Equipamento de análise de gases Stargas 898. [10]

Anexo B

Propriedades dos biocombustíveis ensaiados:

Apresentação da caracterização parcial dos combustíveis Biodiesel de Banha de Porco e Biodiesel de Sebo de bovino, segundo Norma EN 14214(2003). Os valores apresentados são os obtidos no âmbito da execução do projecto FatValue

Propriedades	Norma EN 14214(2003)		Biodiesel de banha	Biodiesel de sebo
	Limite mínimo	Limite máximo		
Teor de água (mg/Kg)	-	500	109	68
Massa volúmica a 15°C (Kg/m ³)	860	900	877,7	873,1
Viscosidade cinematic a 40°C (mm ² /s)	3,50	5,00	4,762	5,045
Corrosão da lâmina de cobre (3h a 50°C)	Class1		Classe 1a	Classe 1a
Ponto de inflamação (°C)	120	-	172,0	171,0
Índice de acidez (mg KOH/g)	-	0,50	0,10	0,07
Teor de ésteres metílicos (%m/m)	96,5	-	91,8	84,1
Teor de ésteres metílicos do ácido linolénico (%m/m)	-	12	0,6	0,6
Índice de iodo (g I ₂ /100g)	-	120	70,0	36,2
Poder calorífico (cal/g)	-	-	9142,70	9171,53
Ponto de entupimento do filtro a frio (°C)	-	-	8	17

Anexo C

Propriedades da água para uma gama de temperaturas de 0°-100° C

PROPERTIES OF WATER IN THE RANGE 0 — 100 °C

This table summarizes the best available values of the density, specific heat capacity at constant pressure (C_p), vapor pressure, viscosity, thermal conductivity, dielectric constant, and surface tension for liquid water in the range 0 — 100 °C. All values (except vapor pressure) refer to a pressure of 100 kPa (1 bar). The temperature scale is IPTS-68.

t °C	Density g/cm ³	C_p J/g K	Vap. pres. kPa	Visc. μPa s	Ther. cond. mW/K m	Diel. const.	Surf. ten. mN/m
0	0.99984	4.2176	0.6113	1793	561.0	87.90	75.64
10	0.99970	4.1921	1.2281	1307	580.0	83.96	74.23
20	0.99821	4.1818	2.3388	1002	598.4	80.20	72.75
30	0.99565	4.1784	4.2455	797.7	615.4	76.60	71.20
40	0.99222	4.1785	7.3814	653.2	630.5	73.17	69.60
50	0.98803	4.1806	12.344	547.0	643.5	69.88	67.94
60	0.98320	4.1843	19.932	466.5	654.3	66.73	66.24
70	0.97778	4.1895	31.176	404.0	663.1	63.73	64.47
80	0.97182	4.1963	47.373	354.4	670.0	60.86	62.67
90	0.96535	4.2050	70.117	314.5	675.3	58.12	60.82
100	0.95840	4.2159	101.325	281.8	679.1	55.51	58.91
Ref.	1—3	2	1, 3	3	3	4	5

REFERENCES

1. L. Harr, J. S. Gallagher, and G. S. Kell, *NBS/NRC Steam Tables*, Hemisphere Publishing Corp., 1984.
2. K. N. Marsh, Ed., *Recommended Reference Materials for the Realization of Physicochemical Properties*, Blackwell Scientific Publications, Oxford, 1987.
3. J. V. Sengers and J. T. R. Watson, Improved international formulations for the viscosity and thermal conductivity of water substance, *J. Phys. Chem. Ref. Data*, 15, 1291, 1986.
4. D. G. Archer and P. Wang, The dielectric constant of water and Debye-Hückel limiting law slope, *J. Phys. Chem. Ref. Data*, 19, 371, 1990.
5. N. B. Vargaftik, et al., *International tables of the surface tension of water*, *J. Phys. Chem. Ref. Data*, 12, 817, 1983.

Fonte: CRC Handbook of chemistry and physics: A ready-reference book of chemical and physical data / Editor-in-Chief David R. Lide. Boca Raton, FL :
 Lide, D. R.
 HTTP://www.bipm.fr

Anexo D

Resultados experimentais

Tabela D1 - Resultados obtidos para o cálculo da massa volúmica, nesta tabela está representada a média, o desvio padrão e o coeficiente de variação das 3 medições efectuadas para cada picnómetro.

Temp.	Elemento caracterizado	Biodiesel de sebo			Biodiesel de banha		
		$\bar{x}$	s	cv (%)	$\bar{x}$	s	cv (%)
60°C	ar	14440,2	0,001414214	9,79359E-06	12835,0	0,000524	4,08E-06
	água destilada	40727,5	0,00183324	4,50123E-06	39400,8	0,000524	1,33E-06
	elemento caracterizado	37061,4	5,23783E-05	1,41329E-07	35594,0	5,24E-05	1,47E-07
70°C	ar	14439,8	0,00183324	1,26958E-05	12835,4	0,000524	4,08E-06
	água destilada	40442,6	0,000523783	1,29513E-06	39100,7	0,011733	3E-05
	elemento caracterizado	36878,3	0,000523783	1,4203E-06	35409,4	0,000524	1,48E-06
80°C	ar	14440,1	0,000419026	2,90182E-06	12834,9	0,001414	1,1E-05
	água destilada	40168,1	0,000523783	1,30398E-06	38983,0	0,004243	1,09E-05
	elemento caracterizado	36721,0	0	0	35223,1	0,013618	3,87E-05
90°C	ar	14447,3	0,014665918	0,000101513	12841,9	0,011314	8,81E-05
	água destilada	40243,5	0,002880805	7,15844E-06	38992,5	0,008066	2,07E-05
	elemento caracterizado	36553,9	0,001466592	4,01214E-06	35333,5	0,06453	0,000183

Tabela D2 — Resultados obtidos para o cálculo da massa volúmica para as gorduras

Temp.	Elemento caracterizado	Sebo de bovino			Banha de porco		
		$\bar{x}$	s	cv (%)	$\bar{x}$	s	cv (%)
60°C	ar	13265,2	0,000523783	3,94856E-06	14325,6	0	0
	água destilada	39363,8	8,23181E-13	2,09121E-15	40312,0	0,001833	4,55E-06
	elemento caracterizado	36768,5	0	0	37721,0	0,000419	1,11E-06
70°C	ar	13265,4	0	0	14328,0	0	0
	água destilada	39185,4	0,034831556	8,88892E-05	40119,6	0,008485	2,11E-05
	elemento caracterizado	36522,7	5,14488E-14	1,40868E-16	37552,5	0	0
80°C	ar	13269,8	1,28622E-14	9,69283E-17	14325,7	0,000524	3,66E-06
	água destilada	39140,4	0,021213203	5,41977E-05	40005,4	0,003352	8,38E-06
	elemento caracterizado	36380,7	0,023046443	6,33481E-05	37381,3	0,004766	1,28E-05
90°C	ar	13273,7	0,002880805	2,17032E-05	14336,1	0,013618	9,5E-05
	água destilada	39023,6	0,023046443	5,90577E-05	39923,5	0,047664	0,000119
	elemento caracterizado	36286,7	0,014665918	4,04168E-05	37297,4	0,021213	5,69E-05

Tabela D3 — Resultados obtidos para o cálculo da massa volúmica.

Temp.	Elemento caracterizado	m picnómetro	m água destilada	m elemento	V picnómetro	ρ água	ρ elemento	d elemento
60°C	biodiesel de sebo	14440,2	26287,3	22621,2	26736,51	0,9832	0,8461	0,8461
	biodiesel de banha	12835,0	26565,8	22759,0	27019,73	0,9832	0,8423	0,8423
	sebo	13265,2	26098,6	23503,3	26544,58	0,9832	0,8854	0,8855
	banha	14325,6	25986,4	23395,4	26430,4	0,9832	0,8852	0,8852
70°C	biodiesel de sebo	14439,8	26002,8	22438,6	26593,71	0,97778	0,8438	0,8438
	biodiesel de banha	12835,4	26265,4	22574,1	26862,25	0,97778	0,8404	0,8404
	sebo	13265,4	25920,0	23257,3	26509	0,97778	0,8773	0,8774
	banha	14328,0	25791,6	23224,5	26377,71	0,97778	0,8805	0,8805
80°C	biodiesel de sebo	14440,1	25728,0	22280,9	26474,04	0,97182	0,8416	0,8416
	biodiesel de banha	12834,9	26148,1	22388,2	26906,32	0,97182	0,8321	0,8321
	sebo	13269,8	25870,6	23110,9	26620,77	0,97182	0,8682	0,8682
	banha	14325,7	25679,6	23055,6	26424,27	0,97182	0,8725	0,8725
90°C	biodiesel de sebo	14447,3	25796,1	22106,5	26722,05	0,96535	0,8273	0,8273
	biodiesel de banha	12841,9	26150,6	22491,6	27089,21	0,96535	0,8303	0,8303
	sebo	13273,7	25750,0	23013,0	26674,23	0,96535	0,8627	0,8628
	banha	14336,1	25587,4	22961,3	26505,83	0,96535	0,8663	0,8663

Anexo E

Dados obtidos na análise dos gases de escape

1. Diesel fóssil BP

Tabela E4 — Dados recolhidos utilizando Diesel fóssil BP

RPM	CO (%Vol.)	CO ₂ (%Vol.)	HC (ppm Vol.)	O ₂ (%Vol.)	NO _x (ppm Vol.)
980	0,034	3,64	40	15,27	245
1250	0,046	3,10	68	17,02	254
2000	0,049	2,94	73	17,18	234
2500	0,053	2,91	78	17,10	289
3000	0,056	2,88	86	17,10	203
3500	0,064	2,99	98	16,82	178
4000	0,073	3,41	127	16,00	182

2. Biodiesel de banha - B100

Tabela E5 — Dados recolhidos utilizando 100% Biodiesel de banha de porco

RPM	CO (%Vol.)	CO ₂ (%Vol.)	HC (ppm Vol.)	O ₂ (%Vol.)	NO _x (ppm Vol.)
980	0,018	3,37	16	17,13	285
1250	0,013	3,49	37	16,03	237
2000	0,000	2,92	32	16,68	306
2500	0,000	2,48	33	17,30	263
3000	0,003	2,56	34	16,86	175
3500	0,006	2,69	35	16,92	157
4000	0,008	3,03	34	16,34	147

3. Biodiesel de banha – B75

Tabela E6 — Dados recolhidos utilizando 75% de Biodiesel de banha de porco

RPM	CO (%Vol.)	CO ₂ (%Vol.)	HC (ppm Vol.)	O ₂ (%Vol.)	NO _x (ppm Vol.)
980	0,019	3,51	18	15,97	186
1250	0,008	3,50	14	15,87	259
2000	0,002	2,78	20	16,98	237
2500	0,001	2,46	22	17,21	251
3000	0,012	3,63	23	15,33	335
3500	0,010	3,04	23	16,43	181
4000	0,011	3,04	24	16,26	135

4. Biodiesel de banha – B50

Tabela E7 — Dados recolhidos utilizando 50% de Biodiesel de banha de porco

RPM	CO (%Vol.)	CO₂ (%Vol.)	HC (ppm Vol.)	O₂ (%Vol.)	NO_x (ppm Vol.)
980	0,015	3,49	15	15,92	309
1250	0,004	2,70	17	16,95	224
2000	0,009	2,58	18	17,02	191
2500	0,006	2,55	18	17,22	280
3000	0,005	2,54	19	17,04	202
3500	0,007	2,58	21	16,60	176
4000	0,009	3,08	23	16,19	148

5. Biodiesel de banha – B25

Tabela E8 — Dados recolhidos utilizando 25% de Biodiesel de banha de porco

RPM	CO (%Vol.)	CO₂ (%Vol.)	HC (ppm Vol.)	O₂ (%Vol.)	NO_x (ppm Vol.)
980	0,000	3,47	19	15,79	344
1250	0,003	2,55	20	16,97	207
2000	0,009	2,50	22	16,91	273
2500	0,010	2,93	13	16,66	234
3000	0,010	2,82	14	16,74	217
3500	0,012	2,94	16	16,10	173
4000	0,014	3,21	18	15,75	192

6. Biodiesel de sebo de bovino - B100

Tabela E9 — Dados recolhidos utilizando 100% de Biodiesel de sebo de bovino

RPM	CO (%Vol.)	CO ₂ (%Vol.)	HC (ppm Vol.)	O ₂ (%Vol.)	NO _x (ppm Vol.)
980	0,000	3,43	15	15,73	334
1250	0,008	2,28	18	17,14	214
2000	0,004	2,58	17	16,84	247
2500	0,002	2,53	17	16,77	293
3000	0,002	2,54	18	16,84	209
3500	0,004	2,66	19	16,48	167
4000	0,006	3,35	21	15,51	173

7. Biodiesel de sebo – B75

Tabela E10 — Dados recolhidos utilizando 75% de Biodiesel de sebo de bovino

RPM	CO (%Vol.)	CO ₂ (%Vol.)	HC (ppm Vol.)	O ₂ (%Vol.)	NO _x (ppm Vol.)
980	0,000	2,71	22	16,88	299
1250	0,000	2,69	19	16,76	289
2000	0,002	2,66	18	17,07	208
2500	0,000	2,48	22	16,97	301
3000	0,000	2,57	23	16,64	205
3500	0,003	2,84	24	16,26	177
4000	0,005	3,35	25	15,78	187

8. Biodiesel de sebo – B50

Tabela E11 — Dados recolhidos utilizando 50% de Biodiesel de sebo de bovino

RPM	CO (%Vol.)	CO₂ (%Vol.)	HC (ppm Vol.)	O₂ (%Vol.)	NO_x (ppm Vol.)
980	0,000	3,06	17	16,35	347
1250	0,000	2,71	21	16,66	330
2000	0,001	2,97	23	16,26	300
2500	0,002	2,70	22	16,45	258
3000	0,006	2,53	23	17,13	190
3500	0,006	2,96	22	16,50	150
4000	0,015	4,78	23	15,34	299

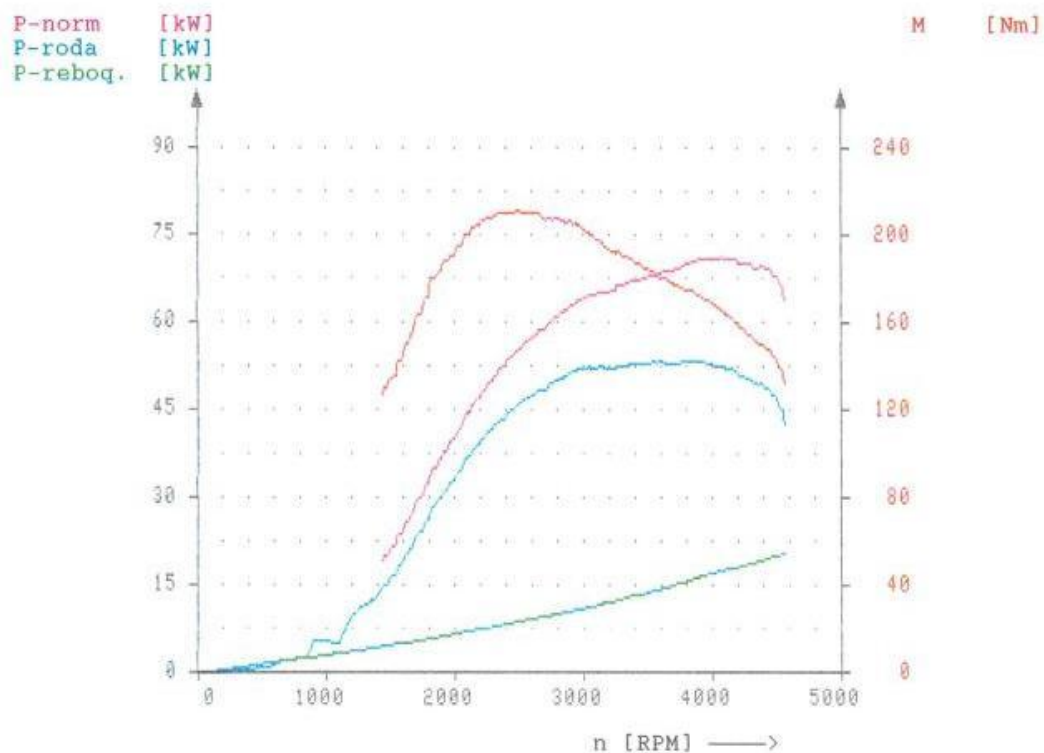
9. Biodiesel de sebo – B25

Tabela E12 — Dados recolhidos utilizando 25% de Biodiesel de sebo de bovino

RPM	CO (%Vol.)	CO₂ (%Vol.)	HC (ppm Vol.)	O₂ (%Vol.)	NO_x (ppm Vol.)
980	0,008	3,32	10	16,06	313
1250	0,008	3,36	13	16,12	313
2000	0,012	3,17	15	16,24	260
2500	0,008	2,79	24	16,85	326
3000	0,009	2,73	22	16,65	208
3500	0,011	2,80	22	16,56	194
4000	0,009	3,08	22	16,07	184

Anexo F1

Ensaio de potência e binário - 100% Diesel



DADOS DA POTÊNCIA:

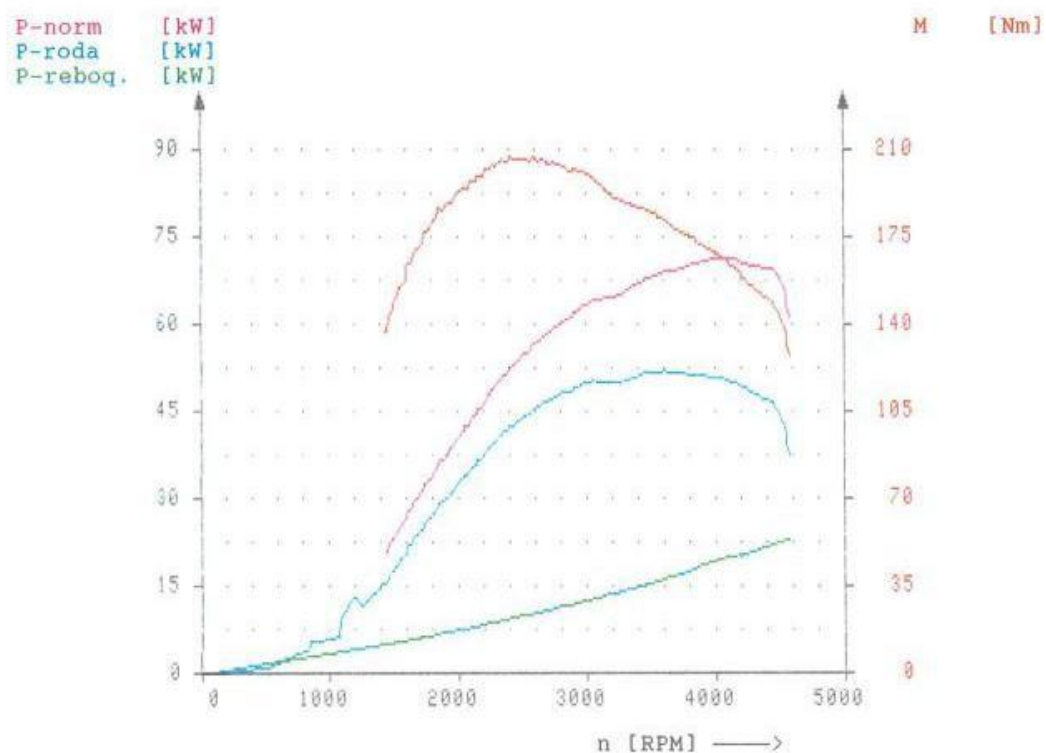
Potência normal	P-norm	: 71,5 kW (97,2 PS)	De acordo DIN 70020
Potência do motor	P-Mot	: 70,5 kW (95,8 PS)	
Potência da roda	P-roda	: 52,5 kW (71,4 PS)	
Potência de reboque	P-reboque	: 18,0 kW (24,4 PS)	
Potência máxima em	142 km/h	4090 RPM	

Torque	M	: 212 Nm
Torque máx. com	87 km/h	: 2510 RPM
Velocidade máxima		: 160 km/h
RPM máxima		: 4610 RPM

Pres. atmosfér.	: 995 mbar	Temp. do ar	: 21 °C
Pressão 1	: --- mbar	Temper. do óleo	: --- °C
Pressão 2	: --- mbar	Temp.gás de esc.	: --- °C

Anexo F2

Ensaio de potência e binário - 100% Biodiesel Banha de porco



DADOS DA POTÊNCIA:

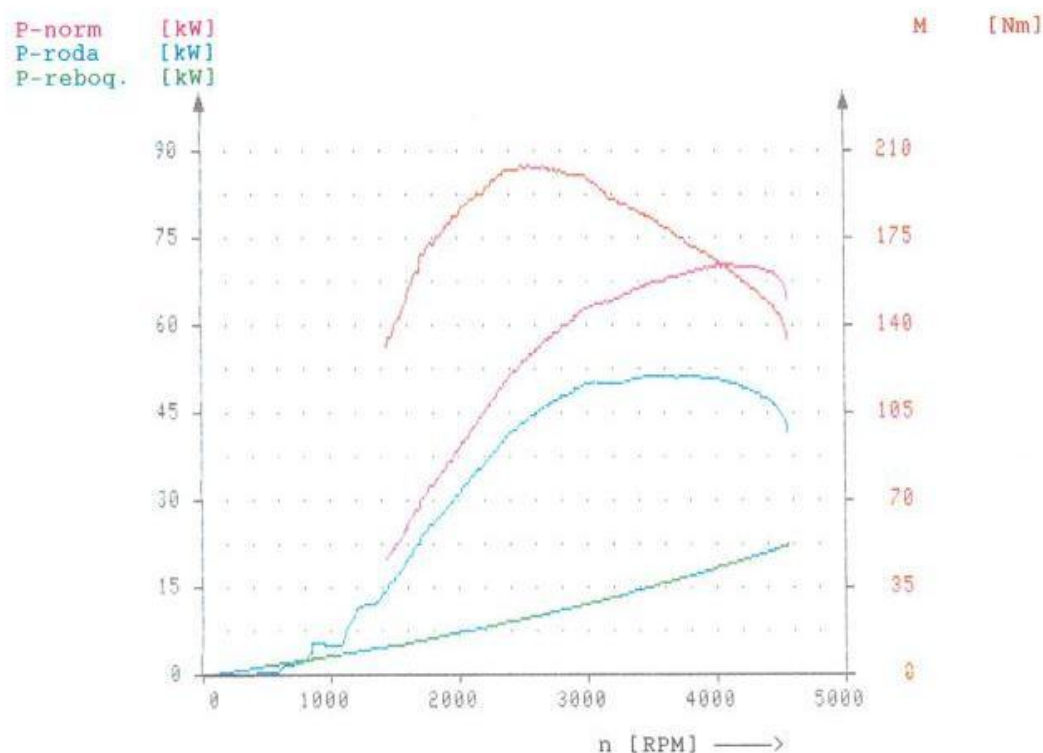
Potência normal	P-norm	: 71,5 kW (97,2 PS)	De acordo DIN 70020
Potência do motor	P-Mot	: 70,5 kW (95,8 PS)	
Potência da roda	P-roda	: 51,0 kW (69,3 PS)	
Potência de reboque	P-reboque	: 19,5 kW (26,5 PS)	
Potência máxima em 140 km/h		4050 RPM	

Torque	M	: 208 Nm
Torque máx. com 84 km/h		2430 RPM
Velocidade máxima		: 159 km/h
RPM máxima		: 4600 RPM

Pres. atmosfér. :	995 mbar	Temp. do ar :	21 °C
Pressão 1 :	--- mbar	Temper. do óleo :	-- °C
Pressão 2 :	--- mbar	Temp.gás de esc.:	--- °C

Anexo F3

Ensaio de potência e binário - 75% Biodiesel Banha de porco



DADOS DA POTÊNCIA:

Potência normal	P-norm	: 71,0 kW (96,5 PS)	De acordo DIN 70020
Potência do motor	P-Mot	: 70,0 kW (95,2 PS)	
Potência da roda	P-roda	: 50,5 kW (68,6 PS)	
Potência de reboque	P-reboque	: 19,5 kW (26,5 PS)	
Potência máxima em		142 km/h	4100 RPM

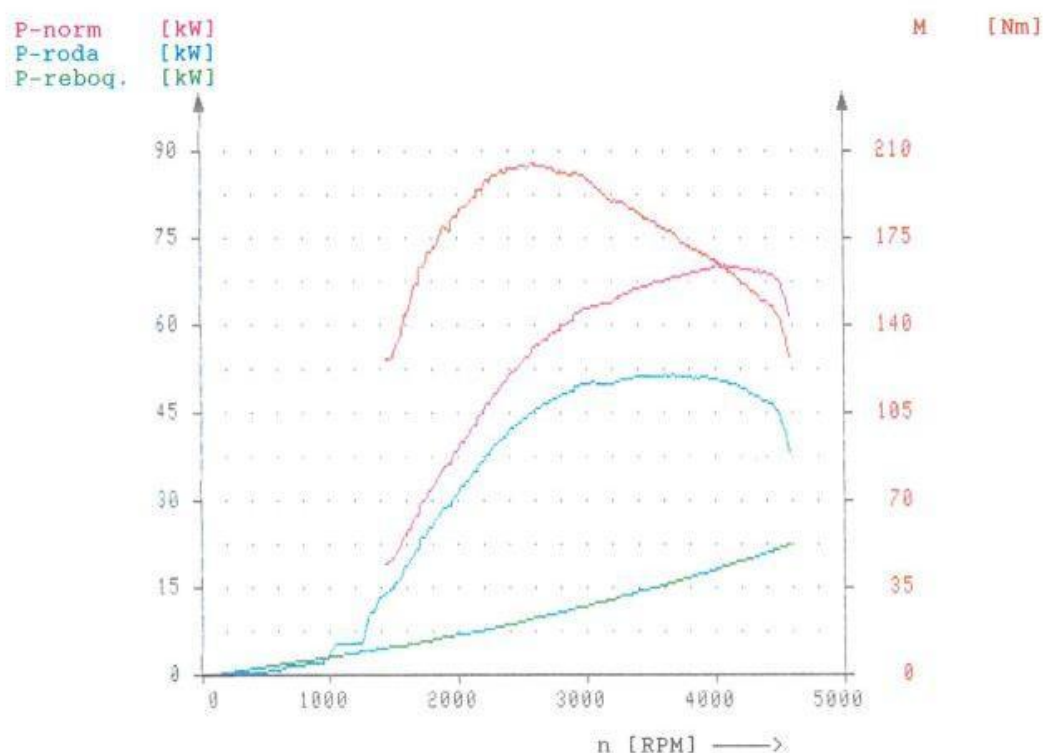
Torque	M	: 205 Nm
Torque máx. com	87 km/h	: 2510 RPM

Velocidade máxima	: 159 km/h
RPM máxima	: 4600 RPM

Pres. atmosférica	: 995 mbar	Temp. do ar	: 21 °C
Pressão 1	: --- mbar	Temper. do óleo	: -- °C
Pressão 2	: --- mbar	Temp. gás de esc.	: --- °C

Anexo F4

Ensaio de potência e binário - 50% Biodiesel Banha de porco



DADOS DA POTÊNCIA:

Potência normal	P-norm	: 70,5 kW (95,8 PS)	De acordo DIN 70020
Potência do motor	P-Mot	: 69,5 kW (94,5 PS)	
Potência da roda	P-roda	: 51,0 kW (69,3 PS)	
Potência de reboque	P-reboque	: 18,5 kW (25,1 PS)	
Potência máxima em 140 km/h		4050 RPM	

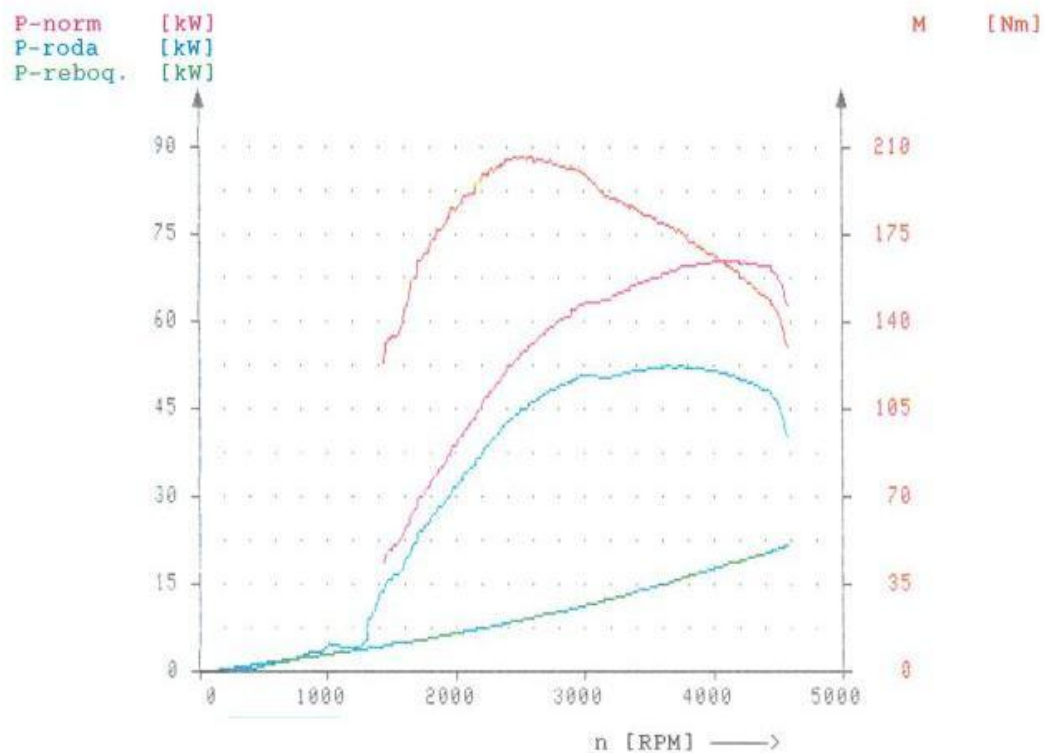
Torque	M	: 206 Nm
Torque máx. com 90 km/h		2600 RPM

Velocidade máxima		: 159 km/h
RPM máxima		: 4600 RPM

Pres. atmosfér. :	995 mbar	Temp. do ar :	21 °C
Pressão 1 :	--- mbar	Temper. do óleo :	--- °C
Pressão 2 :	--- mbar	Temp.gás de esc.:	--- °C

Anexo F5

Ensaio de potência e binário - 25% Biodiesel Banha de porco



DADOS DA POTÊNCIA:

Potência normal	P-norm	: 71,0 kW (96,5 PS)	De acordo DIN 70020
Potência do motor	P-Mot	: 70,0 kW (95,2 PS)	
Potência da roda	P-roda	: 51,5 kW (70,0 PS)	
Potência de reboque	P-reboque	: 18,5 kW (25,1 PS)	
Potência máxima em		142 km/h	4100 RPM

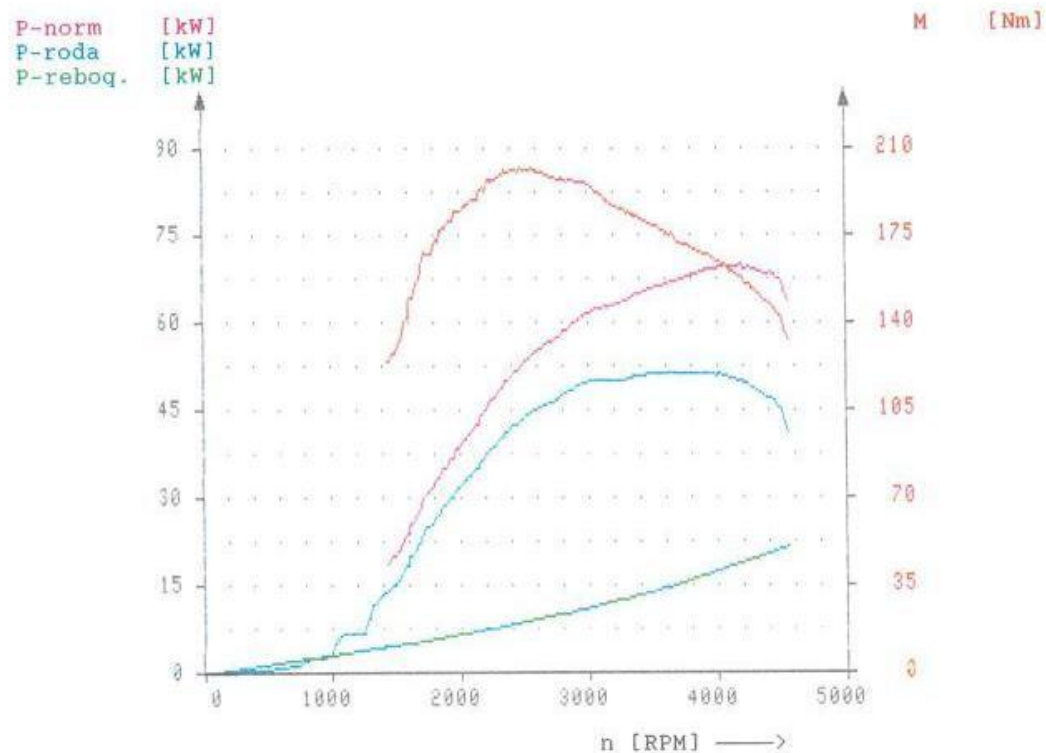
Torque	M	: 207 Nm
Torque máx. com	85 km/h	: 2460 RPM

Velocidade máxima	: 159 km/h
RPM máxima	: 4600 RPM

Pres. atmosfér. :	995 mbar	Temp. do ar :	21 °C
Pressão 1 :	--- mbar	Temper. do óleo :	-- °C
Pressão 2 :	--- mbar	Temp.gás de esc.:	--- °C

Anexo F6

Ensaio de potência e binário - 100% Biodiesel Sebo de bovino



DADOS DA POTÊNCIA:

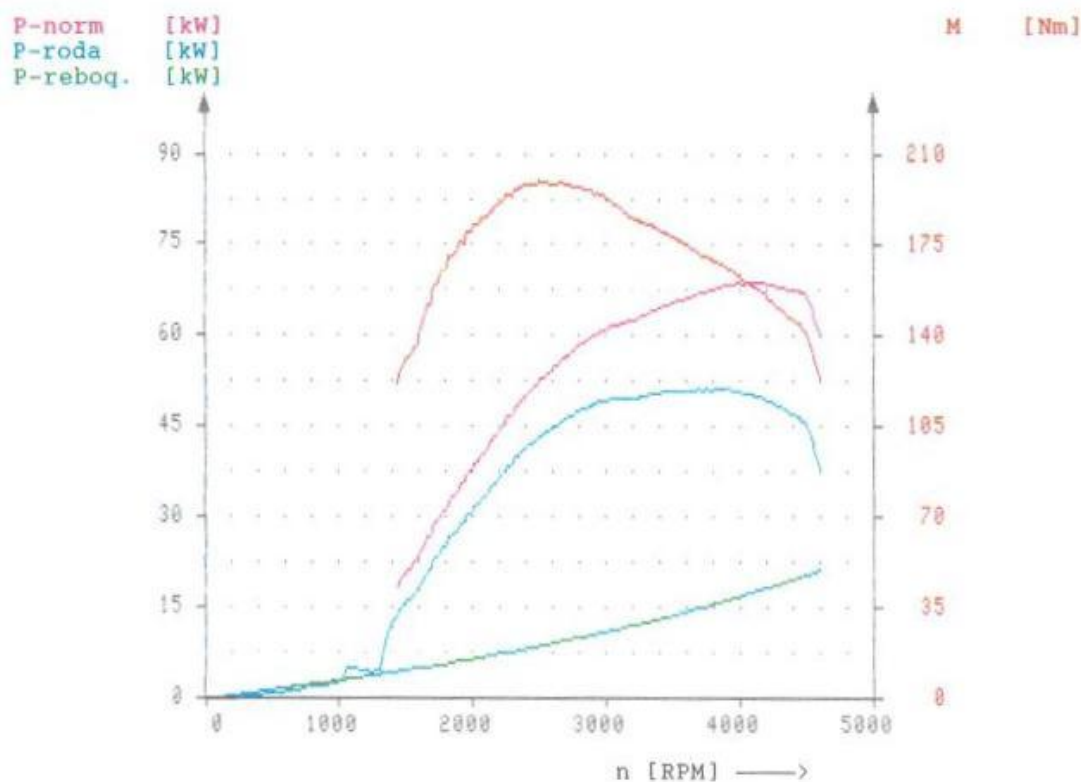
Potência normal	P-norm	: 70,5 kW (95,8 PS)	De acordo DIN 70020
Potência do motor	P-Mot	: 69,5 kW (94,5 PS)	
Potência da roda	P-roda	: 51,0 kW (69,3 PS)	
Potência de reboque	P-reboque	: 18,5 kW (25,1 PS)	
Potência máxima em		141 km/h	4070 RPM

Torque	M	: 203 Nm
Torque máx. com	86 km/h	: 2490 RPM
Velocidade máxima		: 158 km/h
RPM máxima		: 4570 RPM

Pres. atmosfêr.	: 995 mbar	Temp. do ar	: 21 °C
Pressão 1	: --- mbar	Temper. do óleo	: -- °C
Pressão 2	: --- mbar	Temp.gás de esc.	: --- °C

Anexo F7

Ensaio de potência e binário - 75% Biodiesel Sebo de bovino



DADOS DA POTÊNCIA:

Potência normal	P-norm	: 69,5 kW (94,5 PS)	De acordo DIN 70020
Potência do motor	P-Mot	: 68,5 kW (93,1 PS)	
Potência da roda	P-roda	: 50,5 kW (68,6 PS)	
Potência de reboque	P-reboque	: 18,0 kW (24,4 PS)	
Potência máxima em	142 km/h	4100 RPM	

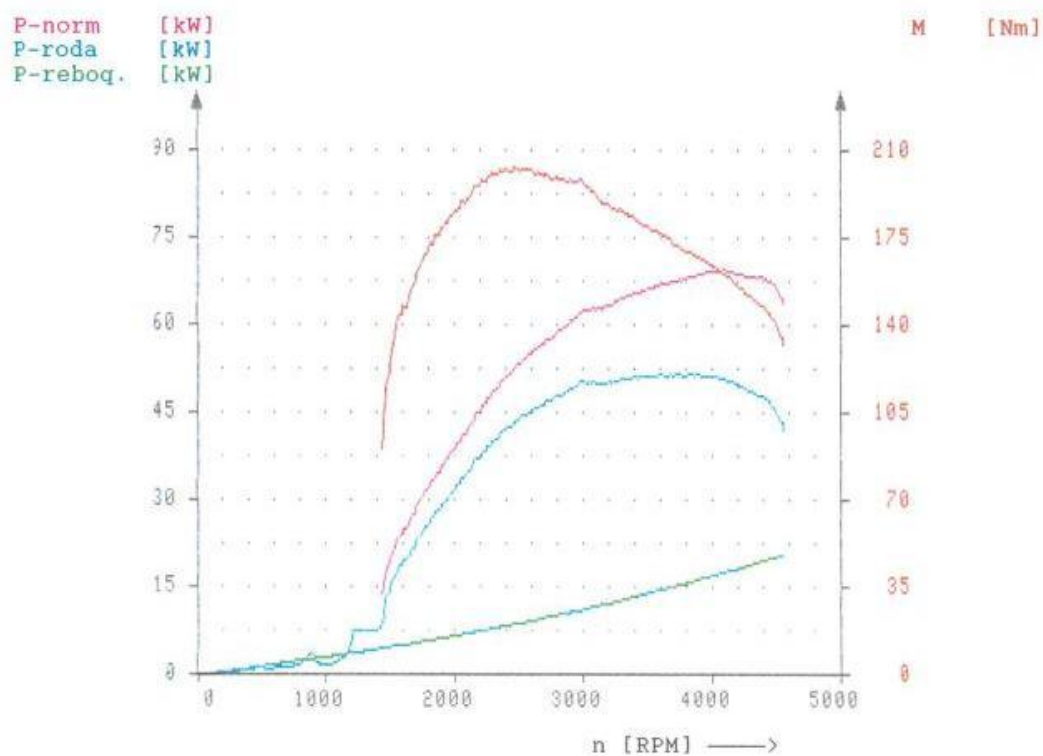
Torque	M	: 201 Nm
Torque máx. com	87 km/h	: 2510 RPM

Velocidade máxima	: 160 km/h
RPM máxima	: 4620 RPM

Pres. atmosférica	: 995 mbar	Temp. do ar	: 21 °C
Pressão 1	: --- mbar	Temper. do óleo	: --- °C
Pressão 2	: --- mbar	Temp. gás de esc.	: --- °C

Anexo F8

Ensaio de potência e binário - 50% Biodiesel Sebo de bovino



DADOS DA POTÊNCIA:

Potência normal	P-norm	: 70,0 kW (95,2 PS)	De acordo DIN 70020
Potência do motor	P-Mot	: 69,0 kW (93,8 PS)	
Potência da roda	P-roda	: 51,0 kW (69,3 PS)	
Potência de reboque	P-reboque	: 18,0 kW (24,4 PS)	
Potência máxima em	142 km/h	4100 RPM	

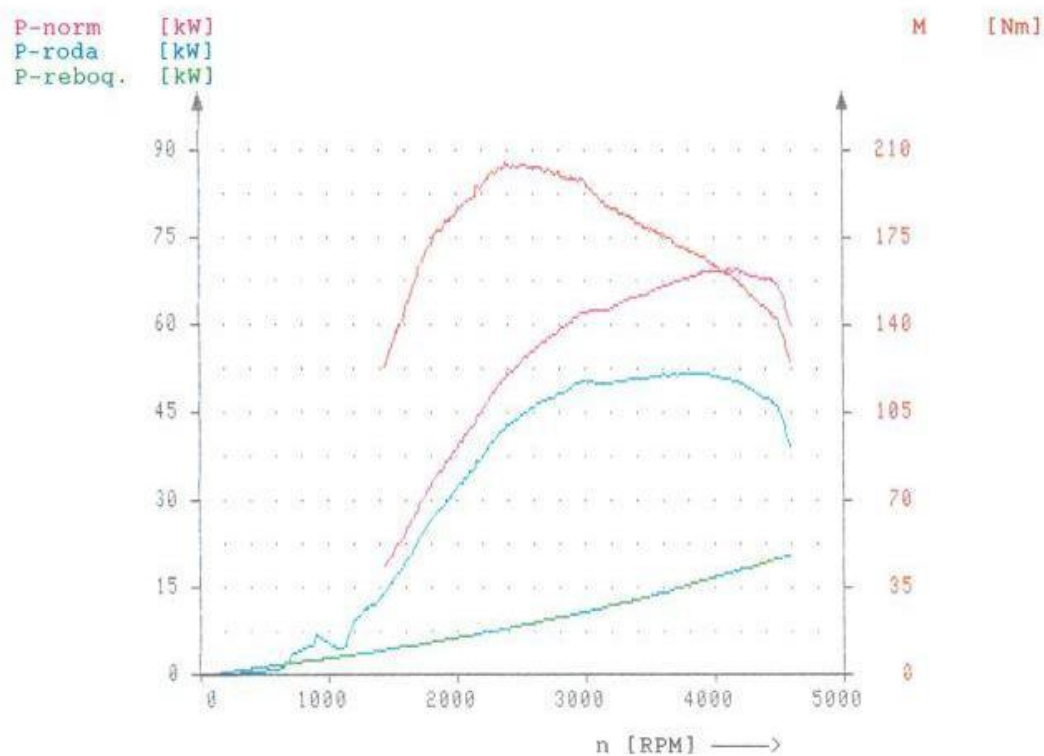
Torque	M	: 204 Nm
Torque máx. com	86 km/h	: 2490 RPM

Velocidade máxima	: 159 km/h
RPM máxima	: 4600 RPM

Pres. atmosférica	: 995 mbar	Temp. do ar	: 21 °C
Pressão 1	: --- mbar	Temper. do óleo	: --- °C
Pressão 2	: --- mbar	Temp. gás de esc.	: --- °C

Anexo F9

Ensaio de potência e binário - 25% Biodiesel Sebo de bovino



DADOS DA POTÊNCIA:

Potência normal	P-norm	: 70,0 kW (95,2 PS)	De acordo DIN 70020
Potência do motor	P-Mot	: 69,0 kW (93,8 PS)	
Potência da roda	P-roda	: 51,0 kW (69,3 PS)	
Potência de reboque	P-reboque	: 18,0 kW (24,4 PS)	
Potência máxima em	143 km/h	4130 RPM	
Torque			
Torque máx. com	M	: 206 Nm	
	83 km/h	: 2400 RPM	
Velocidade máxima		: 160 km/h	
RPM máxima		: 4620 RPM	
Pres. atmosfér. :	994 mbar	Temp. do ar :	21 °C
Pressão 1 :	--- mbar	Temper. do óleo :	-- °C
Pressão 2 :	--- mbar	Temp.gás de esc.:	--- °C