

Estudo da Influência do Biodiesel no Funcionamento de um Motor Diesel

Daniel José Teixeira Pimenta

Relatório do Projecto Final

Orientador na FEUP: Prof. José Ferreira Duarte



FEUP

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Julho 2008

*Quero dedicar este momento
à minha mãe, ao meu pai,
aos meus irmãos e cunhados,
pois todos contribuíram imenso para a chegada deste momento.*

Este momento também é vosso... Parabéns!

Resumo

O Biodiesel é um combustível considerado renovável, com a capacidade de substituir o Diesel fóssil na sua utilização em motores de ignição por compressão. Visto como uma das fontes de energia que ajudará a alcançar a independência dos combustíveis fósseis e como solução para a diminuição das emissões poluentes.

Como parte da investigação desta nova e desconhecida fonte de energia, o presente projecto tem como objectivo o estudo da influência do Biodiesel no funcionamento de um motor diesel.

A investigação encontra-se dividida em três áreas de estudo. O primeiro objectivo é a determinação das propriedades físico-químicas do biodiesel que poderão interferir directamente com o funcionamento e prestações de um motor diesel. O segundo ponto é o estudo da influência do biodiesel nos resultados do motor – Potência e Binário, por ensaio de dois automóveis de tecnologias de injeções diferentes. O terceiro ponto de investigação respeita às emissões gasosas e influência do biodiesel.

Como conclusão é possível afirmar que a utilização de biodiesel em motores com common-rail conduz a perdas de potência que chegam numa faixa de rotação a atingir valores de 30%. Nos motores com bomba de injeção as perdas verificadas para a potência e binário são inferiores aos motores common-rail.

De forma a melhorar as prestações de um motor diesel em funcionamento a biodiesel, será necessário um estudo da injeção de combustível, associado às propriedades de poder calorífico e viscosidade do Biodiesel. Adaptar o sistema de injeção ao biodiesel.

Study the influence of Biodiesel in the operation of a Diesel Engine

Abstract

The Biodiesel is a renewable fuel considered able to replace Diesel in compression-ignition engines. One of the energy sources that will help to achieve the independence of fossil fuels and one solution to a reduction of air pollutants.

As part of the investigation of this new and unknown source of energy, this work purpose is the study of the influence of biodiesel in the operation of a diesel engine.

The research is divided into three areas of study. The first objective is determining the physical and chemical properties of biodiesel that can directly interfere with the functioning of a diesel engine. The second point is the study of the influence of biodiesel in the diesel engine performance – power and torque, by testing two cars with different technologies for injections. The third point of research concerning gas emissions and influence of biodiesel.

In conclusion it can be said that the use of biodiesel in engines with common-rail leads to loss of power, that in a range of rotation achieve values of 30%. In engines with fuel injection pump the losses for the power and torque are less than common-rail engines.

In order to improve the benefits of a diesel engine running on biodiesel, will require a study of the injection of fuel, coupled with properties of caloric and viscosity of Biodiesel, adapting the injection system to biodiesel.

Agradecimentos

Ao meu orientador de projecto, Professor José Ferreira Duarte, o meu sincero obrigado por todo o conhecimento que partilhou comigo e disponibilidade durante todo o projecto.

Ao Eng.º Fonseca Almeida e Eng.ª Joana Dias pela colaboração no presente projecto na produção dos biocombustíveis e partilha de conhecimentos.

À FEUP pelas condições logísticas criadas para a realização deste projecto e a todos os Professores que durante o curso contribuíram para a minha formação.

Ao Pedro Morais e Jorge Morais pela ajuda e disponibilidade na execução dos ensaios nos automóveis.

Ao Gustavo e João, pela óptima colaboração prestada no estudo dos combustíveis e ao Sérgio pela disponibilidade.

Aos meus amigos David Silva, José Costa e Samuel Ramos, que desde o início fizeram parte da fórmula de sucesso deste nosso grande grupo.

À minha família, pela grande equipa que formamos.

Índice de Conteúdos

Índice de figuras	ix
1. Introdução.....	1
2. Revisão Bibliográfica	2
2.1. <i>Motor Diesel</i>	2
2.1.1. <i>Sistemas de injeção</i>	3
2.1.2. <i>Combustão Motor Diesel – principais propriedades</i>	6
2.1.2.1. <i>Ciclo teórico</i>	6
2.1.2.2. <i>Rendimento global</i>	7
2.1.2.3. <i>Injeção de combustível</i>	8
2.1.2.3.1. <i>Ângulo do “spray” - θ</i>	9
2.1.2.3.2. <i>Atomização</i>	9
2.1.2.3.3. <i>Penetração do Spray</i>	10
2.1.2.4. <i>Poder Calorífico</i>	10
2.1.3. <i>Potência e Binário</i>	11
2.1.3.1. <i>Ensaio de potência e Binário</i>	12
2.2. <i>Combustíveis</i>	13
2.2.1. <i>Diesel Mineral - Gasóleo</i>	13
2.2.2. <i>Biodiesel</i>	13
2.2.2.1. <i>Fabricação</i>	14
2.2.2.2. <i>Vantagens do Biodiesel</i>	15
2.2.2.3. <i>Desvantagens do Biodiesel</i>	16
2.2.2.4. <i>Regulamentação</i>	19
2.2.3. <i>Comparativo das Propriedades do Diesel e Biodiesel</i>	19
3. Objectivos	20
3.1. <i>Propriedades físico-químicas dos combustíveis</i>	20
3.2. <i>Ensaio de Potência e Binário</i>	21
3.3. <i>Determinação das emissões gasosas em carga</i>	22
3.4. <i>Combustíveis em teste</i>	24
3.5. <i>Automóveis de testes</i>	25
4. Procedimento Experimental	27
4.1. <i>Propriedades dos Combustíveis</i>	27

4.1.1.	<i>Poder Calorífico</i>	27
4.1.2.	<i>Massa Volúmica</i>	29
4.1.3.	<i>Viscosidade Cinemática</i>	31
4.1.4.	<i>Viscosidade Dinâmica</i>	32
4.2.	<i>Ensaio de Potência e Binário</i>	33
4.3.	<i>Emissões gasosas do funcionamento de um motor Diesel</i>	33
5.	Resultados e sua análise	35
5.1.	<i>Poder Calorífico</i>	35
5.2.	<i>Massa Volúmica</i>	35
5.3.	<i>Viscosidade Cinemática</i>	36
5.4.	<i>Viscosidade Dinâmica</i>	37
5.5.	<i>Ensaio de Potência e Binário</i>	39
5.5.1.	<i>Peugeot 107</i>	39
5.5.2.	<i>Fiat Bravo</i>	41
5.5.3.	<i>Análise dos resultados de Potência e Binário</i>	43
5.6.	<i>Emissões gasosas no funcionamento de um motor diesel</i>	48
6.	Conclusões	49
7.	Referências	51
	ANEXO A: Procedimento detalhado para determinação do Poder Calorífico	52
	ANEXO B: Procedimento detalhado para determinação da Massa Volúmica	54
	ANEXO C: ENSAIOS DE POTÊNCIA E BINÁRIO	56
	ANEXO C1: Peugeot 107 – Diesel	57
	ANEXO C2: Peugeot 107 – Biodiesel FEUP – B25	58
	ANEXO C3: Peugeot 107 – Biodiesel FEUP – B50	59
	ANEXO C4: Peugeot 107 – Biodiesel FEUP – B75	60
	ANEXO C5: Peugeot 107 – Biodiesel FEUP – B100	61
	ANEXO C6: Peugeot 107 – Biodiesel 2	62
	ANEXO C7: Fiat Bravo – Diesel	63
	ANEXO C8: Fiat Bravo – Biodiesel FEUP	64
	ANEXO C9: Fiat Bravo – Biodiesel 2	65

ANEXO C10: Fiat Bravo – Biodiesel Gordura.....	66
ANEXO D: Propriedades Combustíveis Ensaiaados	67
ANEXO E: Norma EN 14214:2003	68

Índice de figuras

Figura 1 – Esquema de sistema biela-manivela e representação do PMS - Ponto morto superior e PMI - Ponto morto inferior [Jorge Martins, 2006].....	2
Figura 2 - Esquema Ciclo 4 tempos de um motor diesel [Encyclopedia Britannica, 2003] ...	3
Figura 3 - Bomba de Injecção em linha (para 8 injectores) [Jorge Martins,2006]	4
Figura 4 - Funcionamento da bomba de injecção em linha [Jorge Martins, 2006].....	4
Figura 5 - Bomba de Injecção rotativa [Jorge Martins,2006]	5
Figura 6 - Sistema de Injecção Common-rail.....	5
Figura 7 - Ciclo de Diesel [Máquinas Térmicas, 2005]	7
Figura 8 - Tipos de formação de mistura [Jorge Martins,2006]	8
Figura 9 - Curvas características de um motor diesel [Jorge Martins,2006]	11
Figura 10 - Emissões gasosas em função da percentagem de biodiesel do combustível [U.S.Department of Energy]	16
Figura 11 - Emissões de NOx em função da rotação do motor para os combustíveis ensaiados [Sérgio Moreira,2008].....	17
Figura 12- Emissões de CO em função da rotação do motor para os combustíveis ensaiados [Sérgio Moreira,2008]	17
Figura 13- Emissões de CO2 em função da rotação do motor para os combustíveis ensaiados [Sérgio Moreira,2008].....	18
Figura 14- Emissões de O2 em função da rotação do motor para os combustíveis ensaiados [Sérgio Moreira,2008]	18
Figura 15- Emissões de HC em função da rotação do motor para os combustíveis ensaiados [Sérgio Moreira,2008]	18
Figura 16 - Banco de Potência usado nos ensaios.....	22
Figura 17 - Combustíveis em estudo	25
Figura 18 - Automóvel ensaiado - Fiat Bravo.....	25
Figura 19 - Automóvel ensaiado - Peugeot 107	26
Figura 20 - Curvas de Potência e Binário do motor 1.4HDI [km77 , 2008]	26
Figura 21 - Calorímetro Parr 1341, usado na determinação do PCS.....	28
Figura 22 - Bomba de Oxigénio com amostra para ensaio	28
Figura 23 - Banho termostático utilizado nas determinações da Viscosidade Cinemática..	31
Figura 24 - Viscosímetros com amostra de Diesel e Biodiesel Feup no banho termostático	31
Figura 26 - Equipamento de Análise de gases- Tecnotes Reflex 4130	34
Figura 27 - Massa Volúmica dos combustíveis ensaiados em função da temperatura.....	36
Figura 28 - Viscosidade Cinemática dos combustíveis ensaiados em função da temperatura	37
Figura 29 - Viscosidade Dinâmica dos combustíveis ensaiados em função da temperatura	38
Figura 30 - Curvas de Potência e Binário do Peugeot 107 utilizando Biodiesel Feup (B25, B50, B75, B100) e Diesel.....	39
Figura 31 - Curvas de Potência e Binário do Peugeot 107 utilizando Diesel, Biodiesel Feup e Biodiesel 2.....	40
Figura 32 - Curvas de Potência e Binário utilizando Diesel, Biodiesel Feup à temperatura ambiente e a 50°C	41

Figura 33 - Curvas de Potência e Binário do Fiat Bravo utilizando Diesel, Biodiesel Feup, Biodiesel 2 e Biodiesel Gordura	42
Figura 34 - Curvas de potência do Peugeot 107 normalizadas ao Diesel.....	43
Figura 35 - Curvas de Binário do Peugeot 107 normalizadas ao Diesel	44
Figura 36 - Curvas de Potência do Fiat Bravo normalizadas ao Diesel	45
Figura 37 - Curvas de Binário do Fiat Bravo normalizadas ao Diesel.....	45
Figura 38 - Curvas de Potência normalizadas ao diesel do Fiat Bravo e peugeot 107.....	46

1. Introdução

A crescente necessidade de fontes de energia alternativas, de energias mais limpas, e de energias mais baratas, é notório por todo o mundo.

Por estas razões novas energias são estudadas, um lugar na frente neste desenvolvimento pode significar a independência energética e o sustento económico de qualquer país.

Neste contexto surge o Biodiesel, uma fonte de energia renovável de origem vegetal e animal, uma das fontes de energia actualmente mais promissoras, apesar de não ser considerado como a solução energética única do futuro, é seguramente uma solução de complemento importante a nível energético e económico.

O desenvolvimento de uma nova tecnologia é sempre um processo moroso de investigação de todas as propriedades técnicas e suas consequências. O presente projecto insere-se nesta investigação e desenvolvimento do combustível Biodiesel.

O mercado automóvel é sem dúvida o maior potencial mercado do Biodiesel, tendo no mesmo o seu maior aliado, a sua compatibilidade com uma rede energética a nível mundial já implementada. Ao contrário do que se verifica noutras soluções, como por exemplo as pilhas de combustível – hidrogénio.

Neste projecto a investigação feita visa aumentar o conhecimento da influência do biodiesel no funcionamento de motores diesel, mais especificamente da escala automóvel, em situações reais de funcionamento.

Algumas das questões mais importantes, para justificar a aposta neste combustível, são estudadas, são elas, as emissões poluentes – questão ambiental; rendimento energético – questão energética; e a compatibilidade com os automóveis de motor diesel – questão da compatibilidade.

O estudo das propriedades físico-químicas juntamente com os ensaios de potência e binário de automóveis, permite perceber a funcionalidade e comportamento do biodiesel.

2. Revisão Bibliográfica

2.1. Motor Diesel

O *motor diesel* é uma máquina térmica capaz de transformar a energia térmica, libertada durante a combustão de uma mistura ar-combustível, em energia mecânica.

Invenção patenteada por Rudolf Diesel a 23 Fevereiro de 1897, o motor diesel ou *motor de ignição por compressão* é constituído por um sistema mecânico capaz de transformar um movimento alternativo linear num movimento de rotação de um veio. Ou seja, o aumento de pressão originada pela combustão, da mistura ar-combustível, no interior de um cilindro provoca o movimento linear de um pistão que ligado a um sistema biela-manivela, permite obter o movimento de rotação desejado. Na Figura 1 apresenta-se uma representação de um pistão e sistema biela-manivela.

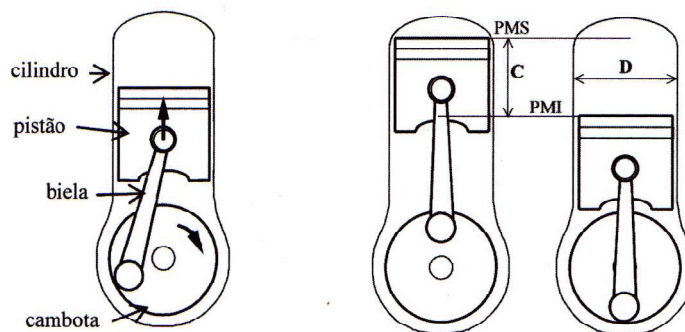


Figura 1 - Esquema de sistema biela-manivela e representação do PMS - Ponto morto superior e PMI - Ponto morto inferior [Martins, 2006]

Num motor de ignição por compressão, tal como o nome indica, a ignição do combustível é conseguida com o aumento de temperatura do ar, resultante da sua compressão.

O funcionamento de um motor diesel convencional é um ciclo a quatro tempos (Figura 2), os quais são caracterizados por:

- **Admissão** – movimento do pistão entre o PMS e o PMI em que ocorre a entrada de ar para o interior do cilindro, através da válvula de admissão aberta;

- **Compressão** – com as válvulas de admissão e escape fechadas, regresso do pistão ao PMS comprimindo o ar, provocando o seu aquecimento;
- **Explosão-Expansão** – injeção do combustível no ar comprimido provocando a ignição da mistura e aumento de pressão, obrigando a descida do pistão até PMI;
- **Escape** – movimento de subida do pistão até ao PMS expulsando os gases de combustão pela válvula de escape aberta. [Martins, 2006]

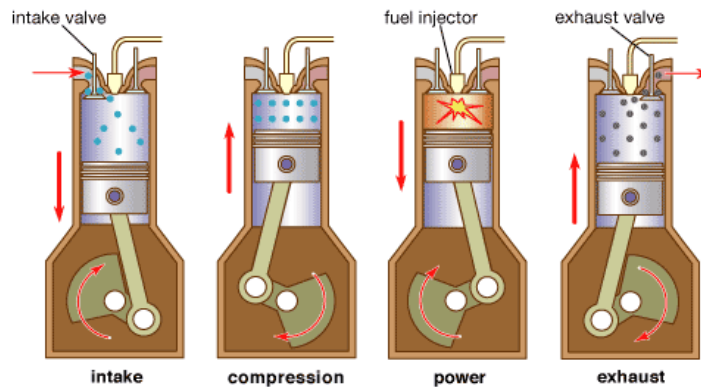


Figura 2 - Esquema Ciclo 4 tempos de um motor diesel [Britannica, 2003]

2.1.1. Sistemas de injeção

Como já se viu, aquando da injeção do combustível, a pressão existente no cilindro é muito elevada, de forma a permitir o aquecimento suficiente para a ignição da combustão. Para vencer esta pressão e permitir um melhor controlo da injeção, a pressão de injeção terá de ser elevadíssima. Assim, as actuais soluções de injeção de combustível nos motores diesel, permitem pressões próximas dos 2000MPa.

Novas dificuldades na injeção de um motor diesel surgem no desenvolvimento da mistura ar-combustível e conseqüente optimização da combustão. Uma injeção optimizada implica: uma pulverização do combustível em gotas de menor dimensão possível, para maximizar a superfície de contacto com o ar; uma mistura homogénea em toda a câmara de combustão, conseguida através de gotas de diferentes tamanhos que alcançam diferentes penetrações (as mais leves

ficam no topo da câmara e as maiores no fundo); e também, uma injeção faseada para optimização da combustão, ruído e emissões poluentes. [Jorge Martins, 2006]

Actualmente existem três equipamentos capazes de conseguir as elevadas pressões, são eles: Bomba de injeção; Bomba-injector; Common-rail.

Bomba de Injeção

Sistema convencional totalmente mecânico, simples, económico, composto por uma bomba (em linha ou rotativa) com ligações individuais a cada injector. Este sistema não permite o preciso e sofisticado controlo da combustão com pré-injecções e pós-injecções.

No sistema com bomba em linha (Figura 3), esta é composta por vários conjuntos camisa-pistão, cada um deles ligado por tubos metálicos a um injector. O accionamento dos pistões é feito por uma árvore de cames ligada á cambota do motor.

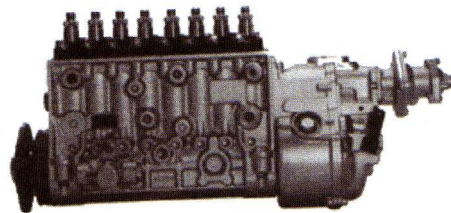


Figura 3 - Bomba de Injeção em linha (para 8 injectores) [Martins,2006]

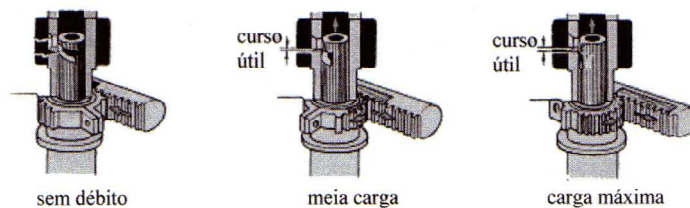


Figura 4 - Funcionamento da bomba de injeção em linha [Martins, 2006]

No caso da Bomba Rotativa (Figura 5), também denominada de Bomba de distribuição, esta contém somente um pistão, mas o princípio de funcionamento é equivalente, pelo accionamento de um prato rotativo a bomba fornece individualmente o combustível a cada injector.

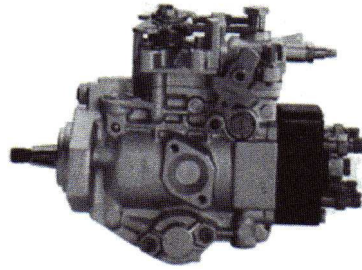


Figura 5 - Bomba de Injeção rotativa [Martins, 2006]

Bomba-injector

Solução global de bomba e injetor, ou seja, cada injetor possui uma bomba acoplada. Sistema com accionamento feito por árvore de cames ou por sistema de balanceiros e hastes. Permite elevadas pressões, superiores a 2000bar, e um melhor controlo da injeção, mas perde na complexidade e preço.

Common-rail

Este sistema é composto por uma bomba de alta pressão que fornece o combustível, de forma constante, a uma rampa comum a todos os injectores. (Figura 6) Os injectores são controlados através de um sistema electromagnético, um dos sistemas mais eficientes.

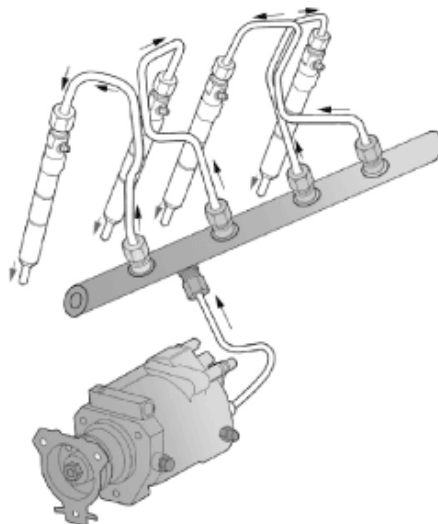


Figura 6 - Sistema de Injeção Common-rail

2.1.2. Combustão Motor Diesel – principais propriedades

A combustão num motor diesel é do tipo detonante, a ignição do combustível ocorre aquando da sua injeção no meio do ar por este se encontrar em condições de temperatura e pressão superiores ao ponto de inflamação do combustível.

Para garantir uma combustão ótima é necessário controlar a velocidade de combustão – oxidação do combustível. Assim, uma boa pulverização e turbulência elevada resultam numa combustão muito violenta. E uma velocidade de combustão demasiado lenta leva à formação de gomas dentro do cilindro, por combustão incompleta. Logo, é necessário uma situação intermédia que garanta combustões rápidas e simultaneamente suaves.

2.1.2.1. Ciclo teórico

Num ciclo os estados final e inicial são o mesmo, independentemente das transformações sofridas pelo sistema fechado. Segundo a Primeira Lei da Termodinâmica: $W_{ciclo} + Q_{ciclo} = \Delta U = 0$, ou seja, o balanço energético de um ciclo é nulo.

Para calcular o trabalho do ciclo é necessário precisar as evoluções sofridas pelo sistema, isto é, conhecer as etapas percorridas pelo fluido, e para cada uma delas calcular as trocas de calor e de trabalho.

O ciclo diesel ou ciclo de pressão constante modificada (Figura 7), apresenta as seguintes fases:

- 1-2 – Compressão adiabática do ar à custa de trabalho fornecido ao sistema, $W_{1-2} = \Delta U_{1-2}$.
- 2-3 – O sistema recebe calor da fonte quente, Q_1 , a pressão constante. O sistema realiza simultaneamente trabalho sobre o exterior, $Q_1 = c_p(T_3 - T_2)$, $W_{2-3} = p_2(V_3 - V_2)$.
- 3-4 – Expansão adiabática do ar. O sistema realiza trabalho à custa da diminuição da sua energia interna, $W_{3-4} = \Delta U_{3-4}$.
- O sistema cede valor, Q_2 , à fonte fria, a volume constante, $Q_2 = c_v(T_4 - T_1)$.

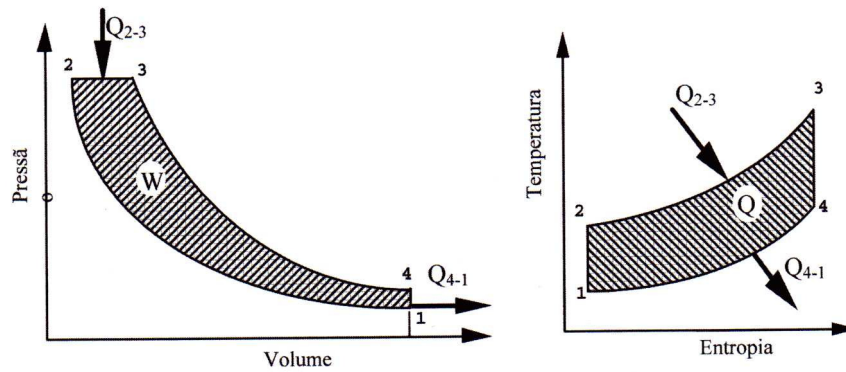


Figura 7 - Ciclo de Diesel [Máquinas Térmicas, 2005]

O cálculo do rendimento térmico é dado por:

$\eta_{diesel} = 1 - \frac{1}{\epsilon^{\gamma-1}} \times \frac{\delta^\gamma - 1}{\gamma(\delta - 1)}$	$\epsilon = \frac{V_1}{V_2}$
	$\delta = \frac{V_3}{V_2}$
	$\gamma = \frac{C_p}{C_v}$

Por interpretação do ciclo, conclui-se que o rendimento do ciclo é função da relação de compressão, da quantidade de calor fornecido pela fonte quente, e da temperatura inicial, T_1 .

2.1.2.2. Rendimento global

$\eta_{total} = \frac{\dot{W}}{\dot{Q}}$	η_{total}	Rendimento motor total
	\dot{W} [J]	Potência de trabalho fornecida pelo motor
$\dot{Q} = \dot{m}_{comb} \times PCI_{comb}$	\dot{Q} [J/g]	Potência calorífica fornecida ao motor
	\dot{m}_{comb} [g]	Caudal mássico de combustível
	PCI_{comb} [g/s]	Poder Calorífico Inferior do combustível

A Capacidade de um motor depende fortemente do combustível, pela quantidade injectada e também pelo seu poder calorífico. Ou seja, a potência calorífica fornecida ao motor, para este produzir trabalho, é dado pelo produto do caudal mássico de combustível e o PCI do combustível.

Assim, percebe-se a razão da tecnologia e atenção envolta da optimização do combustível e sua injeção.

2.1.2.3. Injecção de combustível

Uma combustão óptima pressupõe uma mistura perfeitamente homogénea, logo é importante garantir o máximo de homogeneidade da mistura na câmara de combustão.

O mecanismo de mistura do combustível com o ar, pode tomar duas soluções:

- *O combustível procura o ar* – o injector fornece o combustível de forma a cobrir toda a câmara de combustão, para isso o injector tem vários orifícios em diferentes posições e necessita de uma óptima afinação para garantir a penetração e atomizações ideais. Solução com vantagens no rendimento térmico e consumos, mas de combustão mais dura;
- *O ar procura o combustível* – A atomização e penetração não são importantes pois o ar é acelerado na câmara de mistura garantindo a mistura (Figura 8). O combustível é injectado progressivamente, logo a combustão será mais suave, e o sistema de injeção é mais simples e económico. As desvantagens desta solução são o rendimento, consumo e emissões poluentes. [Martins, 2006]

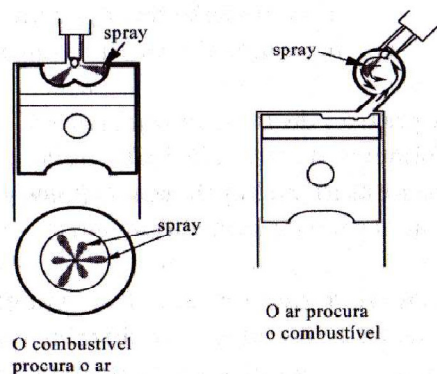


Figura 8 - Tipos de formação de mistura [Martins ,2006]

O “spray” formado na injeção pode tomar diferentes formatos, dependendo de inúmeras variáveis. Apresentam-se agora as diferentes propriedades do “spray”. [Chalen, 1999]

2.1.2.3.1. Ângulo do “spray” - θ

O ângulo formado pelo spray à saída do injetor, condiciona a mistura de combustível por toda a câmara de combustível.

$\theta = 0,05 \left[\frac{D^2 \rho_{ar} (\Delta p)}{\mu_{ar}} \right]$	D [m]	Diâmetro do orifício de injeção
	ρ_{ar} [kg/m ³]	Massa volúmica do ar
	μ_{ar} [Pa.s]	Viscosidade do ar
	p_{inj} [Pa]	Pressão de injeção
	p_{cc} [Pa]	Pressão na câmara de combustão

2.1.2.3.2. Atomização

A atomização depende principalmente da pressão de injeção – quanto maior for menores serão os diâmetros das gotas; do diâmetro dos orifícios do injetor e do volume de combustível injectado.

O diâmetro médio das gotas, no caso de gasóleo, pode ser determinado segundo a seguinte equação:

$d = A(p_{inj} - p_{cc})^{-0,135} \rho_{ar}^{0,121} V_f^{0,131}$	d [m]	Diâmetro médio (SDM)
	A	Constante do orifício:
	$2,33 \cdot 10^{-3}$	Injetor de orifícios
	$2,45 \cdot 10^{-3}$	Injetor de bico saliente
	ρ [kg/m ³]	Massa volúmica do ar
	p_{inj} [Pa]	Pressão de injeção
p_{cc} [Pa]	Pressão na câmara de combustão	

2.1.2.3.3. Penetração do Spray

A penetração do combustível, factor importante para garantir uma boa mistura em toda a câmara, é influenciada pela velocidade e massas originais das gotas, pois altera a energia cinética do “spray”, e também a massa volúmica do ar presente no cilindro.

A penetração do “spray” pode ser calculada:

$s = 0,39 \sqrt{2 \frac{p_{inf} - p_{cc}}{\rho_f} t} \quad , \quad 0 < t < t_{romp}$	ρ_f [kg/m ³] ρ_{ar} [kg/m ³] D [m]	Massa volúmica combustível Massa volúmica do ar Diâmetro do orifício
$s = 2,95 \left(\frac{p_{inf} - p_{cc}}{\rho_f} \right)^{0,25} \sqrt{Dt} \quad , \quad t \geq t_{romp}$	t_{romp} [s]	Tempo de rompimento das gotas
$t_{romp} = 28,65 \frac{\rho_f \cdot D}{\sqrt{\rho_{ar} (p_{inj} - p_{cc})}}$		

Os diâmetros dos orifícios não podem ser demasiado pequenos pois impedem a formação de gotas grandes, aquelas que permitem maior penetração.

2.1.2.4. Poder Calorífico

O poder calorífico do combustível é um importante factor 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 – $\dot{Q} = \dot{m}_{comb} \times PCI_{comb}$, é fácil 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.

$\eta_{total} = \frac{\dot{W}}{\dot{Q}}$ $\dot{Q} = \dot{m}_{comb} \times PCI_{comb}$	η_{total}	Rendimento motor total
	\dot{W} [J]	Potência de trabalho fornecida pelo motor
	\dot{Q} [J/g]	Potência calorífica fornecida ao motor
	\dot{m}_{comb} [g]	Caudal mássico de combustível
	PCI_{comb} [g/s]	Poder Calorífico Inferior do combustível

2.1.3. Potência e Binário

A mais simples caracterização da capacidade de um motor, é feita através das Curvas de Potência e Binário (Figura 9), onde se consegue ler para cada valor de rotação do motor a potência e binário produzidos pelo motor. O binário de um motor é a quantificação de trabalho produzido pelo mesmo, e a potência é a taxa de produção desse trabalho, ou seja o produto do binário pela velocidade.

$\dot{W} = B \times \Omega = 2\pi.N.B$	\dot{W} [J]	Potência do motor
	B [N.m]	Binário do motor
	Ω [rad/s]	Velocidade Angular
	N [rot/s]	Rotações do motor

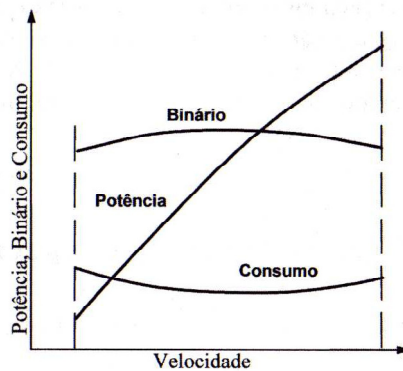


Figura 9 - Curvas características de um motor diesel [Martins, 2006]

Num motor diesel lento, tanto os efeitos dinâmicos como as restrições nas condutas que afectam a eficiência volumétrica, são praticamente nulos. Assim, justifica-se a horizontalidade da curva de binário destes motores.

Sendo a potência, como já apresentado, o produto da velocidade pelo binário, uma curva de binário horizontal levaria a uma potência crescente até ao limite do motor e sua danificação. De forma a evitar esta situação, estes motores têm a injeção limitada a partir de determinada rotação.

Nos motores diesel semi-rápidos, as curvas aproximam-se às curvas de um motor a gasolina por apresentar uma curva de binário menos horizontal [Martins, 2006].

2.1.3.1. 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 na roda 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.

2.2. Combustíveis

2.2.1. Diesel Mineral - Gasóleo

O petróleo, uma das maiores fontes de energia, é composto por imensos hidrocarbonetos e do seu fraccionamento é possível obter vários combustíveis, por exemplo: o gás propano e butano, gasolina, e o principal combustível utilizado nos motores diesel, o gasóleo.

O gasóleo, deve a sua utilização nos motores de ignição por compressão, ao facto de ser facilmente auto-inflamável, essa propriedade é quantificada pelo IC – Índice de Cetano.

Um Índice de Cetano elevado favorece a auto-inflamabilidade do gasóleo, mas significa igualmente uma diminuição do poder calorífico, pelo que é necessário encontrar um valor que não comprometa a capacidade calorífica do combustível.

2.2.2. Biodiesel

O biodiesel é um combustível renovável, alternativo ao gasóleo mineral, fabricado a partir de óleos vegetais, gorduras animais e óleos alimentares reciclados.

É considerado um recurso renovável porque as suas origens são renováveis. Os óleos vegetais são produzidos de plantas que consomem luz solar e podem ser replantadas todos os anos agrícolas. Os óleos alimentares usados, provêm de óleos vegetais, logo é um recurso também considerado renovável.

O biodiesel pode ser usado como combustível na sua forma pura – B100, e também em mistura com o gasóleo (ou outro combustível fóssil), por exemplo B20 – 20% de Biodiesel com 80% de gasóleo. Outra aplicação é como aditivo lubrificante, pela mistura de 2% de biodiesel.

Misturas de baixa percentagem de biodiesel, como o B20, podem ser usadas em equipamentos concebidos para funcionamento a gasóleo, como os motores de combustão interna de ignição comandada, turbinas e caldeiras. Misturas mais elevadas, podem exigir atenções especiais, na programação da combustão e a nível construtivo. [U.S.Department of Energy, 2006]

2.2.2.1. Fabricação

A produção de biodiesel baseia-se num processo de transesterificação de óleos e gorduras com álcoois primários (normalmente metanol ou etanol) na presença de um catalisador (geralmente hidróxido de sódio ou potássio). Desta reacção resulta a produção de alquilésteres de ácidos gordos – biodiesel, e um co-produto glicerina.

A produção de biodiesel de segunda geração, ou seja, a partir de óleos reciclados, tem a vantagem do duplo benefício ambiental, pois anula um grande problema da sociedade actual, a eliminação indevida e poluição da água por óleos alimentares. [Cheng Wing, 2003][Felizardo,2003][Martinez,2004]

A utilização dos óleos e gorduras, sem serem transformados em biodiesel, como combustíveis é desaconselhada mesmo em misturas de 10%. As diferentes propriedades em comparação com os combustíveis, leva à deterioração de materiais, depósitos e problemas funcionais, por exemplo em motores de ignição comandada os injectores são concebidos para combustíveis de viscosidade cinemática até $4.1\text{mm}^2/\text{s}$ quando alguns óleos apresentam valores de $40\text{mm}^2/\text{s}$. [U.S.Department of energy, 2006]

2.2.2.2. Vantagens do Biodiesel

O Biodiesel oferece muitas vantagens como combustível, por ser um recurso renovável, eficiente a nível energético, permitir a redução de emissões poluentes face ao gasóleo, pela sua não toxicidade e a compatibilidade com a estrutura diesel.

Eficiência energética

Segundo publicação do U.S. Department of Energy, com 1 unidade de energia fóssil é possível produzir 3.2 unidades de energia de biodiesel. Incluindo 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.

Redução de emissões poluentes

Pela sua composição com cerca de 11% de oxigénio, o Biodiesel proporciona uma combustão mais completa, diminuindo as emissões de HC e CO comparativamente ao gasóleo em utilização de motores de ignição por compressão.

As emissões de CO₂ são também reduzidas com a utilização de biodiesel por vez do diesel, isto porque as plantações para produção do biodiesel consomem o CO₂ produzido na queima do biodiesel. Ou seja, existiria um equilíbrio ao contrário da situação do diesel fóssil.

Aumento de lubricidade

A adição de 1% a 2% de biodiesel nos combustíveis fósseis, nomeadamente no ULSD – Ultra low sulfur diesel, irá aumentar a sua lubricidade beneficiando equipamentos como a Bomba de combustível em que a sua lubrificação é feita pelo próprio combustível.

Compatibilidade

A fácil utilização do biodiesel nos equipamentos projectados para gasóleo. Os motores, e também a rede mundial de distribuição de gasóleo mineral. Ao contrário de qualquer outra nova fonte de energia, o Biodiesel tem já uma estrutura e uma sociedade pronta para o receber, uma grande vantagem.

2.2.2.3. Desvantagens do Biodiesel

De acordo com os conhecimentos actuais do Biodiesel, este apresenta um balanço positivo entre vantagens e desvantagens, no entanto algumas das desvantagens merecem a atenção dos investigadores de forma a ultrapassá-los devido á sua gravidade.

Menor poder calorífico

O biodiesel comparativamente com o diesel possui um poder calorífico inferior, esta diferença é essencialmente notória com a utilização de B100, pois em misturas como B20 e B50 a diferença é mínima. A diferença situa-se normalmente próxima dos 10%.

Utilização a baixas temperaturas

Outro inconveniente prende-se com a sua utilização a baixas temperaturas, em que o Biodiesel tende a coagular, dificultando o seu transporte pelo sistema de admissão, bomba e filtros.

Aumento das emissões de NOx

Segundo alguns estudos e ensaios, a utilização de Biodiesel favorece o aumento das emissões de NOx comparativamente com o diesel, nos motores de ignição por compressão [Cheng Wing, 2003]

Apesar de ser ainda um fenómeno desconhecido, o U.S. Department of Energy, avança uma curva de variação de produção de NOx comparativamente com o diesel, com base em ensaios efectuados em camiões de longo curso. (Figura 10)

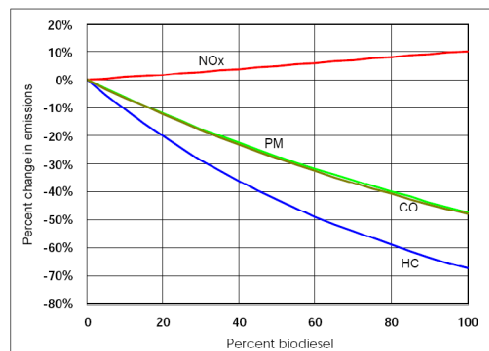


Figura 10 - Emissões gasosas em função da percentagem de biodiesel do combustível [U.S.Department of Energy]

Por todas as dúvidas sobre a emissão de NOx, o estudo das emissões gasosas ganha a maior importância, para esclarecer a maior dúvida sobre o benefício desta nova energia – Biodiesel.

O estudo desta questão foi já iniciado na investigação da Faculdade, por Sérgio Moreira, em que 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 NOx, CO, CO2, O2 e HC; nas figuras seguintes (Figura 11 - Figura 15), apresenta-se os valores das emissões para sete pontos de rotação do motor (desde o ralenti até às 4000 rpm).

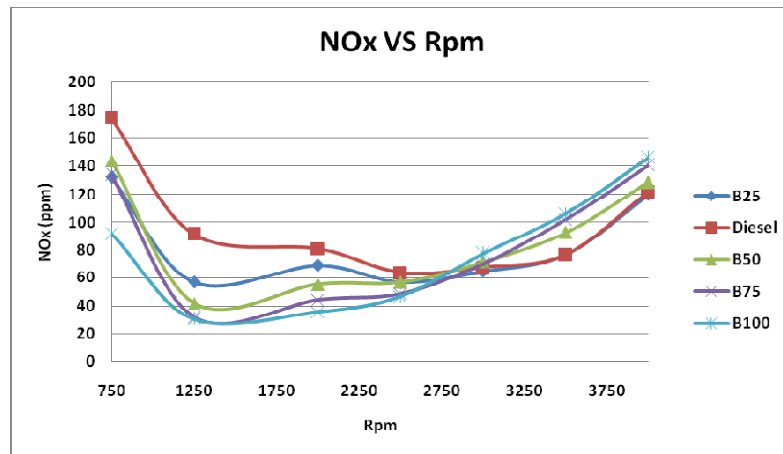


Figura 11 - Emissões de NOx em função da rotação do motor para os combustíveis ensaiados [Moreira,2008]

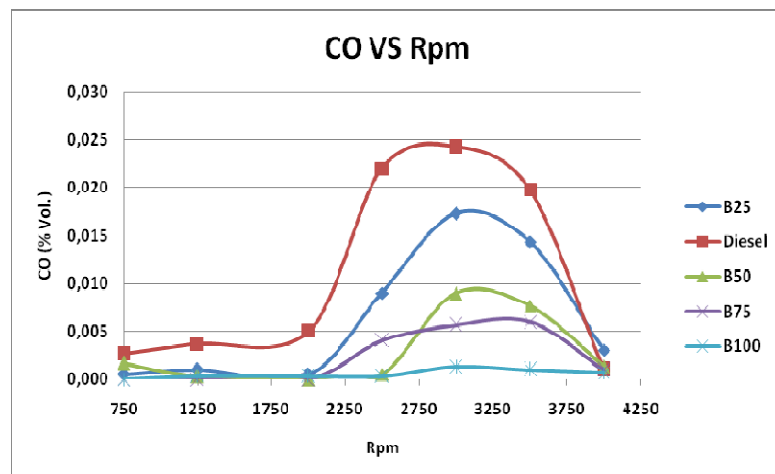


Figura 12- Emissões de CO em função da rotação do motor para os combustíveis ensaiados [Moreira,2008]

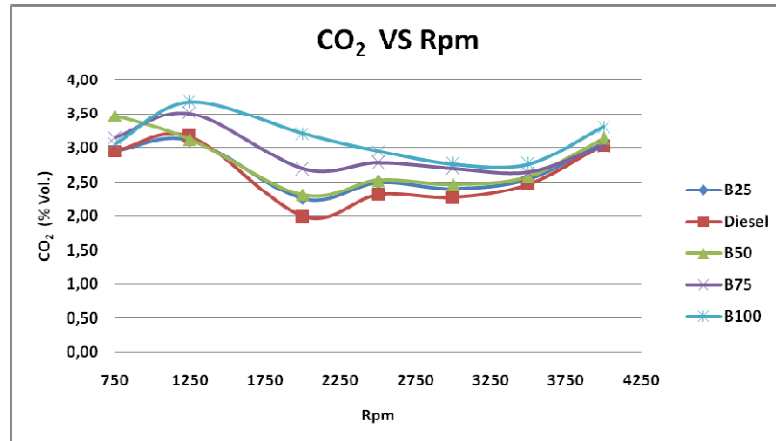


Figura 13- Emissões de CO₂ em função da rotação do motor para os combustíveis ensaiados [Moreira,2008]

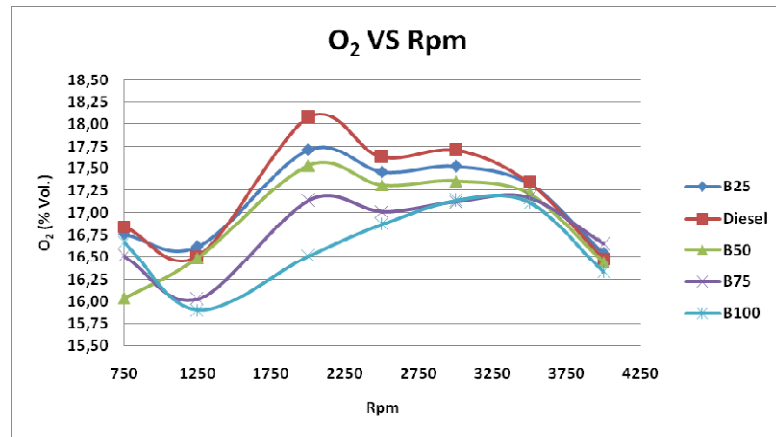


Figura 14- Emissões de O₂ em função da rotação do motor para os combustíveis ensaiados [Moreira,2008]

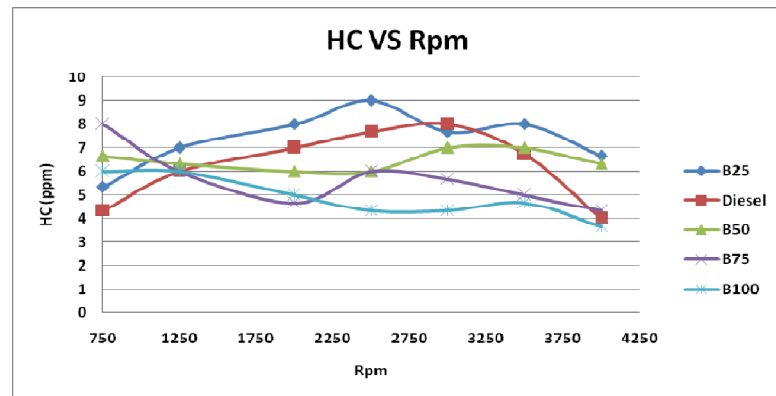


Figura 15- Emissões de HC em função da rotação do motor para os combustíveis ensaiados [Moreira,2008]

Segundo o autor do estudo, as emissões de NO_x apresentam um comportamento diferente do apresentado pelo U.S.Department, pois até as 3000rpm

o valor de NO_x diminui com o aumento da percentagem de biodiesel no combustível.

Neste ponto das 3000rpm existe um ponto de inversão das curvas, a partir do qual as misturas de biodiesel apresentam valores de emissões de NO_x, ligeiramente superiores ao Diesel.

Para as emissões de CO, HC e O₂, verifica-se uma diminuição das mesmas em utilização de biodiesel face ao diesel. Ao contrário das emissões de CO₂ para as quais é apresentado valores superiores com a utilização de biodiesel.

2.2.2.4. Regulamentação

A ASTM Internacional, consensual organização de entre produtores de combustíveis e fabricantes automóvel, e cujas normas são reconhecidas pelas organizações do Governo Norte-Americano, define pela norma ASTM D6751-03 a especificação do B100.

A norma ASTM D6751, define Biodiesel como: ésteres de ácidos gordos de cadeia longa, provenientes de fontes renováveis como o óleo vegetal ou gordura animal, que contém apenas uma molécula de álcool por ligação éster.

Na Europa, o biodiesel encontra-se normalizado segundo DIN V 51506 de 1994. [EMA, 2005]

2.2.3. Comparativo das Propriedades do Diesel e Biodiesel

Apresenta-se na Tabela 1 as normas reguladores das propriedades dos combustíveis Diesel e Biodiesel, e as propriedades de maior relevo para o presente relatório. Em anexo encontra-se as normas completas.

Tabela 1 – Propriedades do biodiesel e diesel normalizadas

Norma reguladora	ASTM D975	ASTM D 6751
Propriedade Combustível	Diesel	Biodiesel
Viscosidade Cinemática – 40°C	1.3-4.1	4.0 -6.0
Massa Volúmica – 15°C	7.079	7.328

3. Objectivos

O objectivo do presente projecto é o estudo da influência dos biocombustíveis no funcionamento e performance de motores diesel. Ou seja, as variações que possam ocorrer no desenvolvimento da combustão derivadas das diferentes propriedades dos combustíveis.

Assim, será dada especial atenção a factores de natureza mecânica – sistemas de injeção; e factores de natureza físico-química do combustível.

A investigação encontra-se organizada em dois campos, são eles:

- Determinação e comparação das propriedades físico-químicas dos combustíveis.
 - Massa Volúmica,
 - Viscosidade Cinemática e Dinâmica,
 - Poder Calorífico;
- Realização de ensaios de Potência e Binário a veículos alimentados com diferentes combustíveis.
- Determinação das emissões gasosas, com simulação do motor em carga.

3.1. Propriedades físico-químicas dos combustíveis

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 fluido, as propriedades físicas do combustível condicionam a forma de escoamento do mesmo. Na Tabela 2 estão identificados as propriedades determinadas laboratorialmente no presente trabalho.

Tabela 2 – Propriedades Físicas a determinar

<i>Propriedades Físicas:</i>	
Ensaio	Combustíveis
→ Massa Volúmica	→ Diesel
→ Viscosidade Cinemática	→ Biodiesel Feup
→ Viscosidade Dinâmica	

As propriedades físicas do combustível influenciam também a combustão, nomeadamente na mistura ar-combustível, pela sua maior ou menor homogeneidade.

Quanto á reacção química da combustão, esta é afectada pela propriedade química do combustível – capacidade calorífica. Logo é também importante a determinação do Poder Calorífico dos Combustíveis.

Tabela 3 – Propriedade Química a ensaiar

<i>Propriedade Química:</i>	
Ensaio	Combustíveis
→ Poder Calorífico Superior – PCS	→ Diesel → Biodiesel Feup

3.2. Ensaio de Potência e Binário

A funcionalidade e capacidade do Biodiesel em substituir o diesel fóssil na actual tecnologia e estrutura montada Diesel, faz com que a investigação e desenvolvimento nesta área assumam o maior relevo. Neste sentido torna-se fundamental perceber a resposta dos actuais equipamentos ao Biodiesel ao nível da potência e binário, sem se proceder a alterações nos motores.

Sendo o maior mercado do biodiesel o sistema mundial de Transportes Rodoviários equipados com motores de ignição por compressão, é importante conhecer os resultados do funcionamento destes operando com biodiesel.

Na Tabela 4 apresenta-se os ensaios a realizar neste ponto do projecto.

Tabela 4 – Ensaio de Potência e Binário

Ensaio	Combustíveis
→ Potência → Binário	→ Diesel → Biodiesel Feup → Biodiesel 2 → Biodiesel Gordura

Os ensaios de Potência e Binário foram executados num Banco de Potência – MAHA LPS2000 (Figura 16), equipado com freios magnéticos que impõem ao automóvel uma carga crescente ao longo do ensaio.



Figura 16 - Banco de Potência usado nos ensaios

3.3. Determinação das emissões gasosas em carga

O estudo das emissões de escape de um motor de ignição por compressão funcionando a biodiesel, como já referido, requer grande atenção e investigação. De forma a compreender a dimensão da variação das emissões comparativamente ao gasóleo, no funcionamento normal de um automóvel, ou seja, em andamento com diferentes cargas a vencer, e numa primeira fase do estudo, este deve estruturar-se segundo os seguintes pontos:

- Combustíveis “totais”, não utilizar misturas;
- Ensaios num banco de potência de automóveis, capaz de simular cargas constantes aplicadas ao automóvel em diferentes rotações e acelerações do motor;
- Ensaios simulando as situações mais representativas da circulação de um automóvel, ou seja, nas mudanças e rpm que detêm maior utilização no trânsito rodoviário.

Numa simulação em carga deste género, será necessário um plano alargado de estudo, o qual mesmo cobrindo apenas as variáveis directamente relacionadas com a condução, ou seja, todas as combinações de caixa, rotações do motor e acelerações do motor, já obrigaria a um número de ensaios muito elevado (aproximadamente 700 ensaios sem a utilização de técnicas como o método Taguchi).

Assim, e no seguimento do estudo já realizado por Sérgio Moreira sobre as emissões gasosas com o motor em vazio (cap.2.2.2.3), era também objectivo deste projecto, o estudo das emissões poluentes em carga.

Os ensaios a realizar no mesmo automóvel, mas desta vez em situações de carga, aproximando do funcionamento real de um automóvel, complementando assim um ponto de estudo já iniciado.

Na Tabela 5, apresenta-se os combustíveis a ensaiar, o automóvel de ensaio e emissões gasosas a determinar.

Tabela 5 – Determinações de emissões a realizar

Emissões	Combustíveis	Automóvel
→ NO _x	→ Diesel	→ Peugeot 107
→ CO	→ Biodiesel Feup	
→ CO ₂		
→ O ₂		
→ HC		

O estudo será feito em dois pontos distantes do ponto de inversão da curva das emissões de NO_x, avançada por Sérgio Moreira, ou seja ás 1500 e 4500 rpm, de forma a permitir uma primeira compreensão das emissões gasosas para facilitar um estudo futuro mais intensivo.

Plano de ensaios:

Combustível		Diesel				Biodiesel FEUP			
Mudança		4 ^a				4 ^a			
RPM		1500		4500		1500		4500	
Carga		100%	50%	100%	50%	100%	50%	100%	50%
Emissões Gasosas	NOx [ppm]				-	-	-	-	-
	CO [%]				-	-	-	-	-
	CO ₂ [%]				-	-	-	-	-
	HC [ppm]				-	-	-	-	-
	O ₂ [%]				-	-	-	-	-

3.4. Combustíveis em teste

Descrevem-se, agora, os combustíveis disponíveis:

→ **Diesel**

- Gasóleo da rede de gasoleiras
- Origem: Mineral

→ **Biodiesel Feup**

- Fabricado em laboratório na FEUP por processo de transesterificação
- Origem: Óleo de colza

→ **Biodiesel 2**

- Fabricado por processo industrial por empresa privada presente no mercado
- Origem: Óleo vegetal
- Combustível utilizado apenas nos ensaios de Potência e Binário

→ **Biodiesel Gordura**

- Fabricado em laboratório na FEUP, segundo processo de transesterificação
- Origem: Gordura Animal.

O Biodiesel 2 como produto de comercialização pública, cumprirá seguramente a norma reguladora dos biocombustíveis para motores de ignição por compressão EN 14214(2003).

Quanto aos combustíveis produzidos em laboratório na FEUP, a sua caracterização, apresentada em anexo, revela alguns parâmetros fora da norma.

Na Figura 17, apresenta-se uma amostra de cada combustível utilizado na investigação. Da esquerda para a direita: Diesel, Biodiesel Feup, Biodiesel 2, Biodiesel Gordura.



Figura 17 - Combustíveis em estudo: Diesel, Biodiesel Feup, Biodiesel 2 e Biodiesel Gordura

3.5. Automóveis de testes

Ensaio de dois automóveis do mercado, de tecnologias e gerações diferentes mas ambos representativos de grandes grupos do parque automóvel. Apresenta-se de seguida os automóveis e a descrição de algumas características relativas à motorização, anunciadas pelos respectivos construtores.

Fiat Bravo



Figura 18 - Automóvel ensaiado - Fiat Bravo

- Cilindrada: 1900 cm³
- N° cilindros: 4
- Sistema de Injecção: Bomba de Injecção
- Potência máxima: 100cv – 4000rpm (anuncia
- Binário máximo: 130Nm – 1750rpm

Peugeot 107 1.4HDI



Figura 19 - Automóvel ensaiado - Peugeot 107

- Cilindrada: 1398 cm³
- N° cilindros: 4
- Sistema de Injecção: Common-rail
- Potência máxima: 54cv – 4000rpm
- Binário máximo: 130Nm – 1750rpm
- Curvas de Potência e Binário:

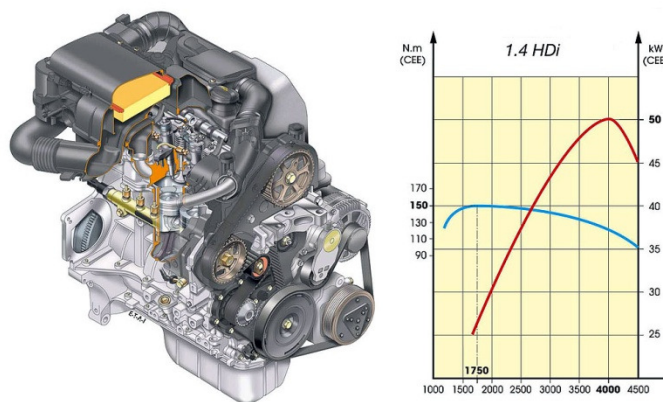


Figura 20 - Curvas de Potência e Binário do motor 1.4HDi [km77 , 2008]

4. Procedimento Experimental

4.1. Propriedades dos Combustíveis

4.1.1. Poder Calorífico

Para a determinação do poder calorífico dos combustíveis, utiliza-se um calorímetro, equipamento que através da combustão de uma amostra consegue determinar o poder calorífico superior da mesma.

Material:

- Balança Analítica
- 2l de Água Desionizada;
- Ácido Benzóico – elemento padrão;
- Fio fusível;
- Amostras dos combustíveis a ensaiar.

Equipamento:

- Calorímetro de Bomba de Oxigénio – Parr 1341 (Figura 21)

Equipamento, capaz da determinação do Poder Calorífico Superior, através da combustão de um elemento no interior de uma Bomba de Oxigénio (Figura 22). A bomba encontra-se submersa num recipiente de água, e aquando da combustão da amostra, a água irá sofrer um aquecimento, o qual é registado por um termopar.

Como a combustão se dá numa bomba de oxigénio estanque, após a combustão ocorre a condensação da água libertada, o que implica uma nova libertação de energia. Por isso a propriedade determinada é o PCS.



Figura 21 - Calorímetro Parr 1341, usado na determinação do PCS



Figura 22 - Bomba de Oxigênio com amostra para ensaio

Procedimento:

- A. Preparação do Calorímetro e verificação de funcionamento por ensaio de elemento padrão
- B. Produção das peletas com as amostras a analisar, com 0,5g de Ácido benzóico e 0,25g de combustível a ensaiar.
- C. Realização do ensaio no calorímetro.
Ensaio de várias amostras de cada combustível (pelo menos três) até se obter resultados suficientemente próximos.

Procedimento detalhado descrito no AnexoA.

Como os combustíveis se encontram na forma líquida, é necessária a adição de uma pastilha de Ácido Benzóico – elemento padrão – de forma a permitir a ignição da amostra. Logo, o valor de PCS apresentado pelo calorímetro diz respeito ao total da amostra e não ao combustível.

Assim, para o cálculo do PCS do combustível, recorre-se á seguinte relação:

$Q_{amostra} = Q_{ácido_benzóico} + Q_{combustível}$			
$Q_i = m_i \times PCS_i$	Q_i	[cal]	Calor libertado pela combustão
	m_i	[g]	Massa
	PCS_i	[cal/g]	Poder Calorífico Superior

$$m_{amostra} \times PCS_{amostra} = m_{ácido_benzóico} \times PCS_{ácido_benzóico} + m_{combustível} \times PCS_{combustível}$$

4.1.2. Massa Volúmica

A determinação da massa volúmica dos combustíveis seguiu o seguinte procedimento.

Material:

- Picnómetros de 5ml
- Banho termoestático à temperatura de ensaio
- Balança analítica
- Goblés: colocação dos picnómetros, solução padrão (água destilada) e amostras dos combustíveis
- Papel absorvente

Procedimento:

- A. Preparação do banho de aquecimento com os goblés.
- B. Calibração dos picnómetros, após aquecimento na bancada.
- C. Medição da massa de combustível
- D. Repetição do procedimento para cada combustível e temperatura a ensaiar.

Cálculo da massa volúmica do combustível

É necessário, a utilização do elemento padrão para a determinação do volume do picnómetro a cada temperatura de ensaio. Ou seja, sendo conhecida a massa volúmica do elemento padrão para cada temperatura de ensaio, é possível determinar o volume do picnómetro.

Apresenta-se agora as relações para determinação das massas volúmicas dos combustíveis a cada temperatura:

$\rho_{combustível} = \frac{m_{combustível}}{Volume_{picnómetro}}$ $m_{combustível} = m_{picnómetro + combustível} - m_{picnómetro}$ $Volume_{picnómetro} = \frac{m_{elemento_padrão}}{\rho_{elemento_padrão}}$ $m_{elemento_padrão} = m_{picnómetro + elemento_padrão} - m_{picnómetro}$	$\rho_{combustível}$ $m_{combustível}$ $Volume_{picnómetro}$ $m_{elemento_padrão}$ $\rho_{elemento_padrão}$	Massa volúmica combustível calculada Massa combustível medida Volume calculado picnómetro Massa do elemento padrão medida Valor tabelado da massa volúmica para temperatura de ensaio
---	---	---

4.1.3. Viscosidade Cinemática

A determinação da viscosidade cinemática dos combustíveis seguiu o seguinte procedimento:

Equipamento:

- Banho termoestático



Figura 23 - Banho termoestático utilizado nas determinações da Viscosidade Cinemática

- Viscosímetros



Figura 24 - Viscosímetros com amostra de Diesel e Biodiesel Feup no banho termoestático

Material:

- Cronómetro
- Pêra

Procedimento:

- A. Montagem dos viscosímetros nos suportes e montagem no banho termoestático.
- B. Introdução de aproximadamente 10ml da amostra no viscosímetro, pelo tubo L
- C. Aspirar a amostra contida no viscosímetro com a ajuda de uma pêra até que este esteja 5mm acima da marca E, retirar pêra.
- D. Cronometragem do tempo de escoamento da amostra desde a marca E até á F.
- F. Repetir e registar valores, até aproximação óptima dos resultados.
- E. Eliminação da amostra contida no viscosímetro para recipiente de resíduos. Lavagem do viscosímetro com água destilada e acetona, secar na estufa.
- F. Repetição do procedimento para cada combustível e temperatura a ensaiar.
- G. Cálculo da viscosidade cinemática segundo a norma ISO 3104.

Cálculo da Viscosidade Cinemática

$v = C \times t$	v [mm ² /s]	Viscosidade Cinemática
$\eta = v \times \rho \times 10^{-3}$	C [mm ² /s ²]	Constante de calibração do viscosímetro
	t [s]	Tempo de ensaio
	η [mPa/s]	Viscosidade Dinâmica
	ρ [kg/m ³]	Massa Volúmica

4.1.4. Viscosidade Dinâmica

O cálculo da viscosidade dinâmica, segue igualmente a norma ISO 3104 e apresenta-se a seguir.

$\eta = v \times \rho \times 10^{-3}$	η [Pa/s]	Viscosidade Dinâmica
	v [mm ² /s]	Viscosidade Cinemática
	ρ [kg/m ³]	Massa Volúmica

O cálculo é feito com os valores da viscosidade cinemática e massa volúmica à mesma temperatura.

4.2. Ensaio de Potência e Binário

A determinação das curvas de Binário e Potência, seguiram o seguinte procedimento:

Equipamento:

- Banco de Potência – MAHA LPS2000

Material:

- Depósitos externos com combustíveis a ensaiar;
- Derivações das ligações de admissão e retorno.

Procedimento:

- A. Montagem do automóvel no Banco de Potência
 - a. Colocar o carro nos rolos, alinhar e prende-lo.
 - b. Ligar exaustor do escape e ventilador frontal de arrefecimento.
- B. Ligação do depósito externo com o combustível a ensaiar
 - a. Ligar a admissão ao depósito externo.
 - b. Após 1 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 depósito externo.
- C. Realização de ensaio segundo norma DIN70020.

4.3. Emissões gasosas do funcionamento de um motor Diesel

A determinação das emissões gasosas, é feita segundo o seguinte procedimento:

Equipamento:

- Banco de Potência de automóveis – MAHA LPS2000
- Analisador de Gases – Tecnotest Reflex 4130 com Módulo de Análise de Gases

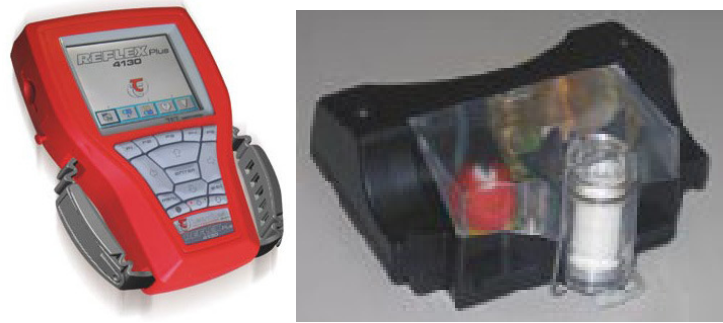


Figura 25 - Equipamento de Análise de gases Tecnotes Reflex 4130

Material:

- Sistemas de derivação das ligações da admissão e retorno para ligação ao depósito externo.
- Depósitos externos com os combustíveis a analisar.

Procedimento:

- A. Montagem do automóvel no Banco de Potência
 - a. Colocar o carro nos rolos, alinhar e prende-lo com as cintas de segurança.
 - b. Ligar exaustor do escape e ventilador frontal de arrefecimento. O exaustor não deve ser colocado muito próximo do tubo de escape de forma a não alterar os resultados da análise de gases.
- B. Ligação do depósito externo com o combustível a ensaiar
 - a. Ligar a admissão ao depósito externo.
 - b. Após 1 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 depósito externo.
- C. Realização dos ensaios para cada ponto de análise em regime estável, para rotação do motor e carga aplicada constantes (consequentemente a aceleração também é constante).
- D. Leitura e registo dos valores do equipamento de análise de gases.

5. Resultados e sua análise

5.1. Poder Calorífico

Na Tabela 6, apresentam-se os resultados obtidos nos ensaios de determinação do Poder Calorífico Superior, do Diesel e Biodiesel Feup.

Tabela 6 – Resultados das determinações do PCS

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

O Biodiesel FEUP, de acordo com o referenciado na bibliografia (cap.2.2.2.3), apresenta um valor de PCS inferior ao valor do Diesel.

5.2. Massa Volúmica

Na Tabela 7, apresentam-se os resultados obtidos nos ensaios de determinação da massa volúmica, do Diesel e Biodiesel Feup. Na Figura 26 é representado valor da massa volúmica em função da temperatura.

Tabela 7 – Resultados das determinações de Massa Volúmica [Kg/m³]

Temperatura [°C]	30	40	45	50
Diesel	0,8187	0,8137	0,8118	0,8094
Biodiesel Feup	0,8906	0,8883	0,8816	0,8816

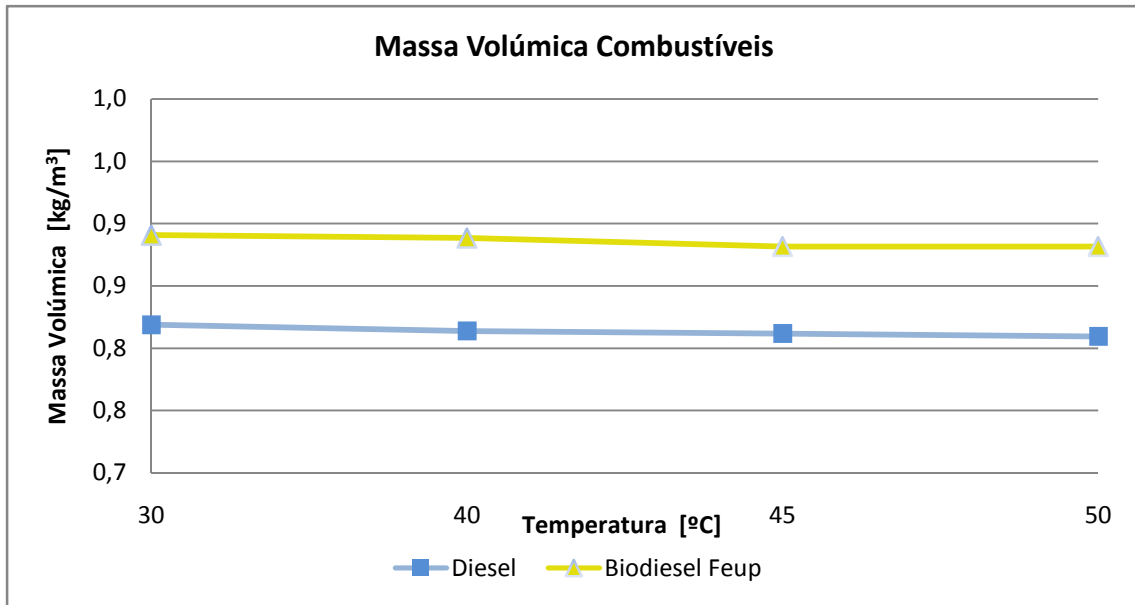


Figura 26 - Massa Volúmica dos combustíveis ensaiados em função da temperatura

De acordo com o referenciado na bibliografia, a massa volúmica do Biodiesel Feup apresenta valores inferiores aos do Diesel. A variação da massa volúmica de ambos os combustíveis com a temperatura é semelhante.

5.3. Viscosidade Cinemática

Na Tabela 8, apresentam-se os resultados obtidos nos ensaios de determinação da Viscosidade Cinemática, do Diesel e Biodiesel Feup. Na Figura 27 são representados os valores da viscosidade cinemática em função da temperatura.

Tabela 8 – Resultados das determinações de Viscosidade Cinemática [mm²/s]

Temperatura [°C]	30	40	45	50
Biodiesel	10,223	7,964	7,072	6,374
Diesel	3,059	2,536	2,317	2,130

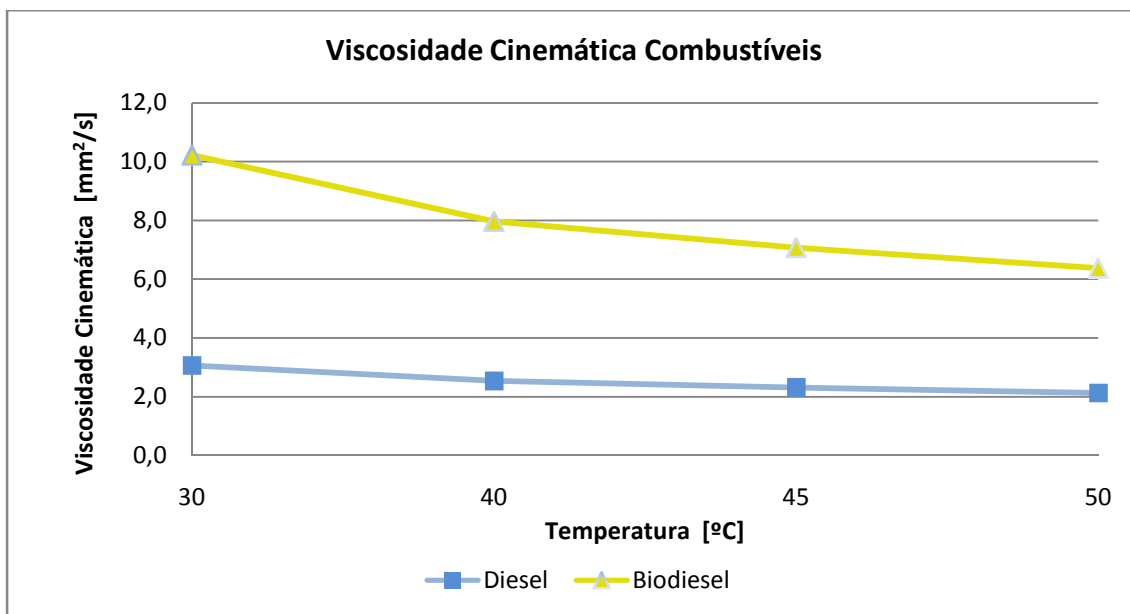


Figura 27 - Viscosidade Cinemática dos combustíveis ensaiados em função da temperatura

No caso da viscosidade cinemática, o Biodiesel FEUP apresenta, para todas as temperaturas analisadas, valores mais elevados quando comparado com os valores do Diesel. 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).

5.4. Viscosidade Dinâmica

Os valores da viscosidade dinâmica, calculados para o Biodiesel Feup e Diesel, são apresentados na Tabela 9. Na Figura 28 é representada a viscosidade dinâmica em função da temperatura.

Tabela 9 – Resultados das determinações de Viscosidade Dinâmica

Temperatura [°C]	30	40	45	50
Diesel	2,5	2,1	1,9	1,7
Biodiesel	9,1	7,1	6,2	5,6

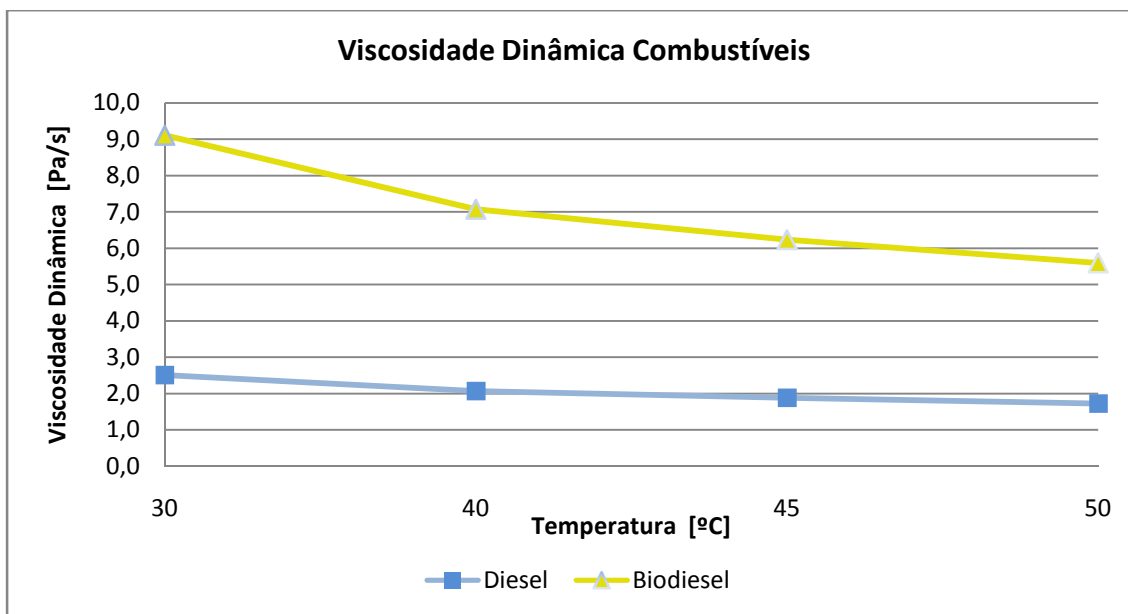


Figura 28 - Viscosidade Dinâmica dos combustíveis ensaiados em função da temperatura

Situação idêntica à viscosidade cinemática, para as temperaturas analisadas o Biodiesel Feup apresenta valores de viscosidade dinâmica superiores aos do Diesel.

5.5. Ensaio de Potência e Binário

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

Neste capítulo apresentam-se as curvas de potência e binário dos ensaios realizados e a análise destes resultados.

5.5.1. Peugeot 107

Na Figura 29 apresentam-se as curvas de potência e binário relativas aos ensaios do Diesel e misturas B25, B50, B75 e B100 de Biodiesel FEUP.

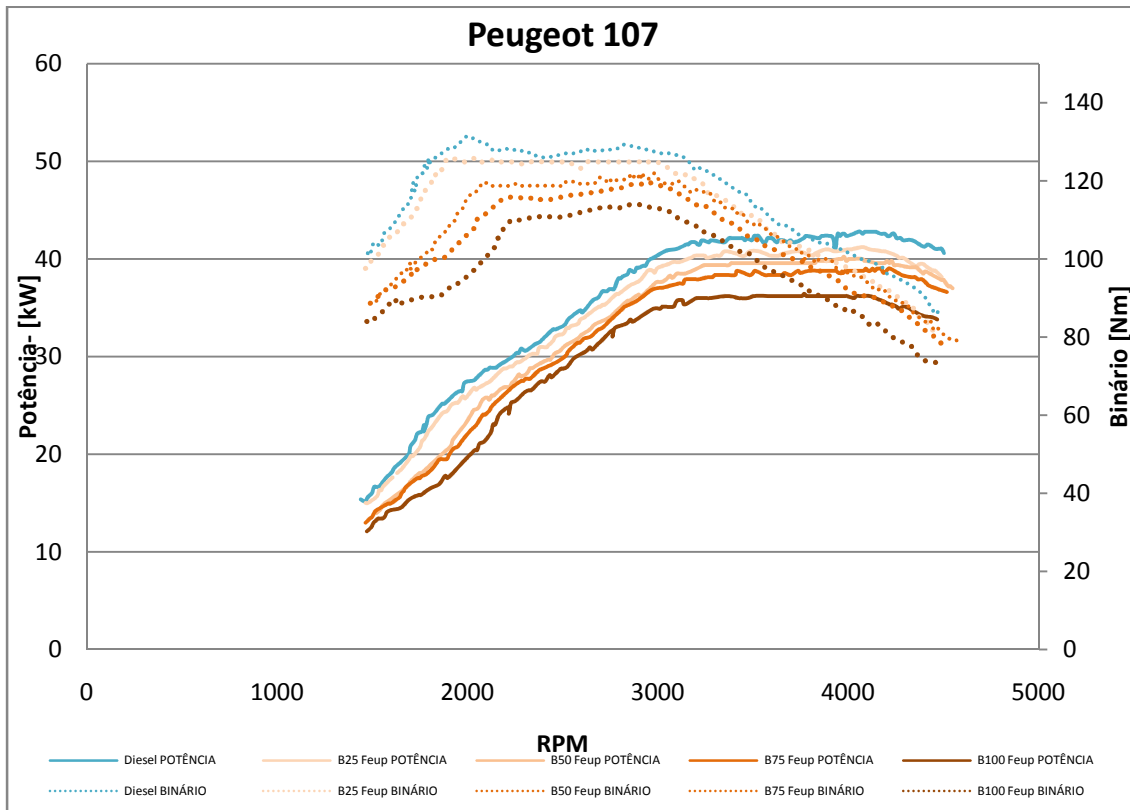


Figura 29 - Curvas de Potência e Binário do Peugeot 107 utilizando Biodiesel Feup (B25, B50, B75, B100) e Diesel

A análise das curvas permite concluir que a utilização de percentagens crescentes de biodiesel resulta numa diminuição da potência e binário tanto mais elevada quanto mais elevada é a percentagem de biodiesel no combustível.

Sendo essa redução gradual por cada aumento de 25% de biodiesel na mistura, os ensaios dos restantes biocombustíveis terão por base apenas o B100. Situação em que a perda de potência e binário são máximas.

As curvas de potência e binário do ensaio utilizando o Biodiesel 2 – em situação de B100, são apresentadas em comparação com o Biodiesel Feup – B100, e sob referência das curvas dos ensaios com Diesel, na Figura 30.

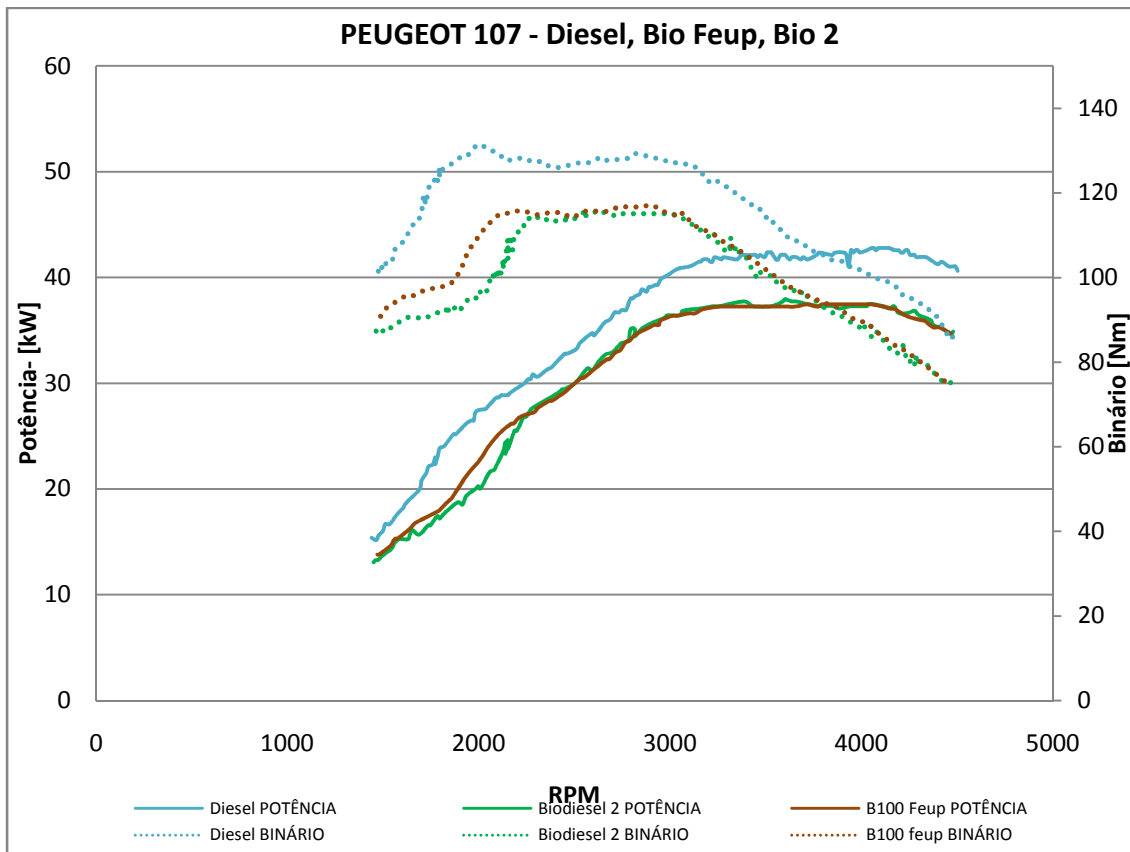


Figura 30 - Curvas de Potência e Binário do Peugeot 107 utilizando Diesel, Biodiesel Feup e Biodiesel 2

A análise da figura permite verificar que os resultados obtidos para os dois biodiesel, Feup e Comercial, são semelhantes.

Durante a utilização de um automóvel diesel verifica-se um aumento de temperatura do combustível armazenado no depósito, devido ao combustível de retorno estar a uma temperatura elevada. O que levanta a questão de se saber se a mudança das propriedades do combustível com o aumento da temperatura influenciariam o desempenho do motor. Por esta razão efectuou-se um ensaio com o Biodiesel Feup em que a temperatura no depósito era de 50°C.

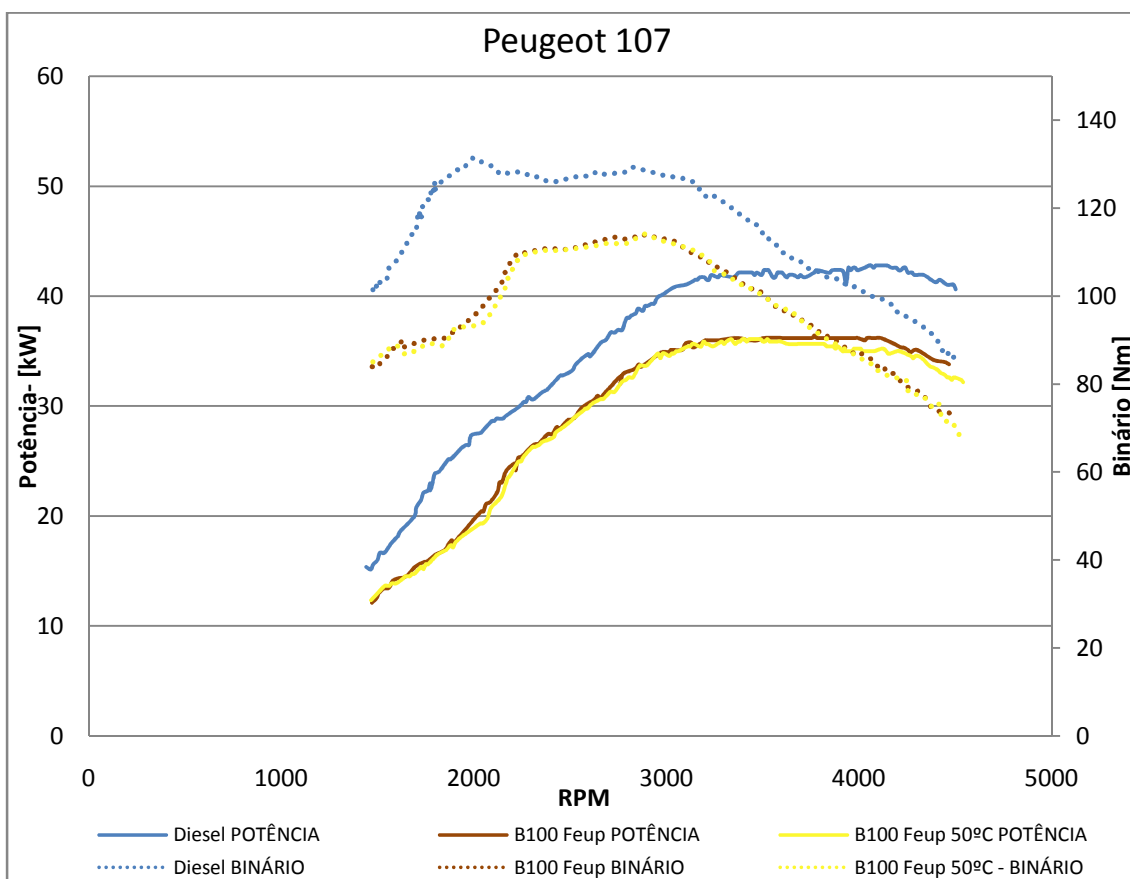


Figura 31 - Curvas de Potência e Binário utilizando Diesel, Biodiesel Feup à temperatura ambiente e a 50°C

Como se pode observar na Figura 31, não se verifica grande alteração das curvas para esta temperatura – 50°C.

O ensaio com o Biodiesel Gordura não foi possível devido a avaria do automóvel (problema electrónico) durante os ensaios de emissões.

5.5.2. Fiat Bravo

Como identificado no ponto 3.5 o Fiat Bravo tem um sistema de alimentação de combustível diferente do Peugeot 107, dado que utiliza um sistema de Bomba de Injecção. Devido a esta diferença no equipamento de injeção que equipa este automóvel era previsível diferentes comportamentos dos biodieseis em comparação com o diesel fóssil. Apresenta-se na Figura 32 a representação das curvas dos

ensaios de potência e binário de todos os combustíveis ensaiados – Diesel, Biodiesel Feup – B100, Biodiesel Gordura – B100 e Biodiesel 2 – B100.

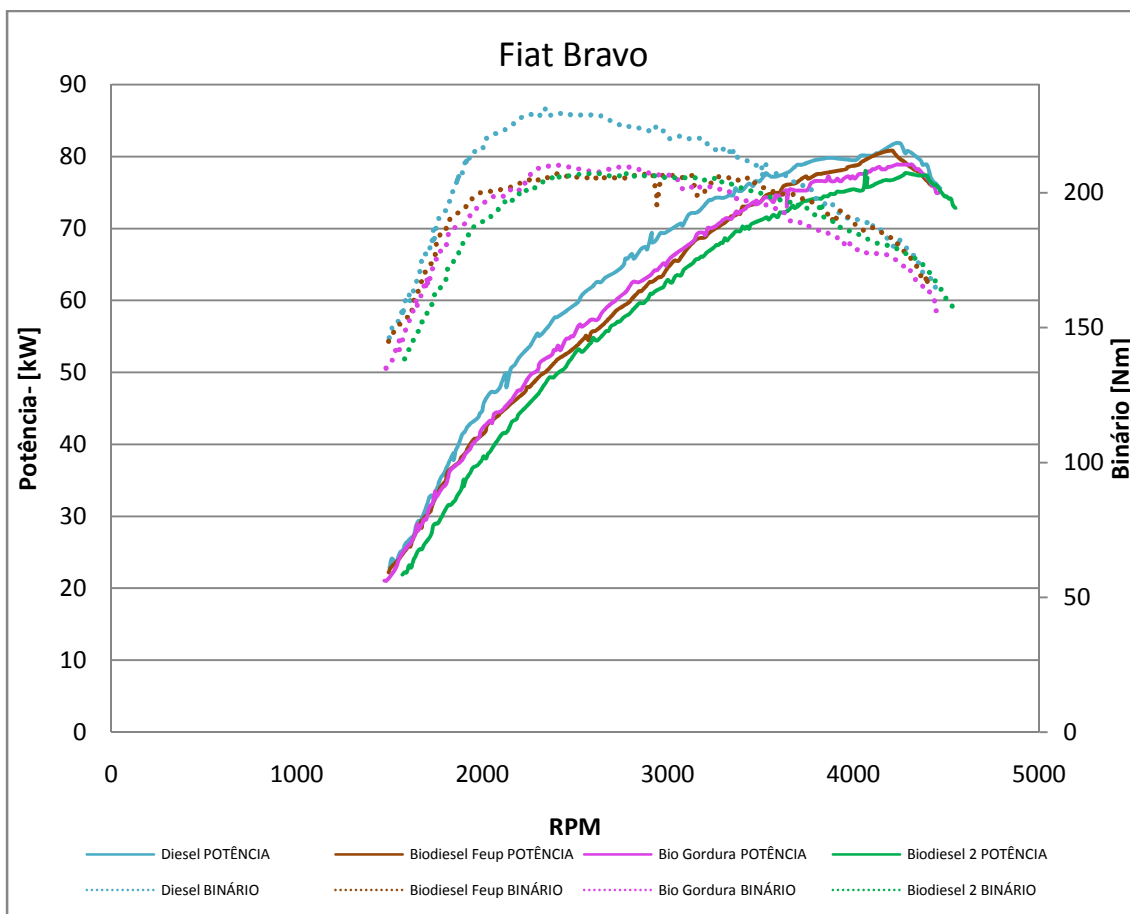


Figura 32 - Curvas de Potência e Binário do Fiat Bravo utilizando Diesel, Biodiesel Feup, Biodiesel 2 e Biodiesel Gordura

Como se pode observar nestas curvas verifica-se perda de potência e binário na utilização de diferentes biodieseis comparativamente ao Diesel.

5.5.3. Análise dos resultados de Potência e Binário

Um dos principais objectivos deste ponto da investigação – Ensaio de Potência e Binário, é a comparação dos resultados obtidos, para misturas de diferentes percentagens de biodiesel e diferentes biodieseis, com o Diesel fóssil. Assim, de forma a garantir uma análise lógica e compreensível, as curvas dos biocombustíveis serão analisadas por normalização à curva de Diesel.

A análise separada das curvas de binário e das curvas de potência, sempre normalizadas à respectiva curva obtida por utilização de Diesel, facilita a leitura das perdas registadas com a utilização dos biodieseis.

Nas figuras Figura 33 e Figura 34 representam-se as curvas de potência normalizadas às curvas de Diesel, do Peugeot 107.

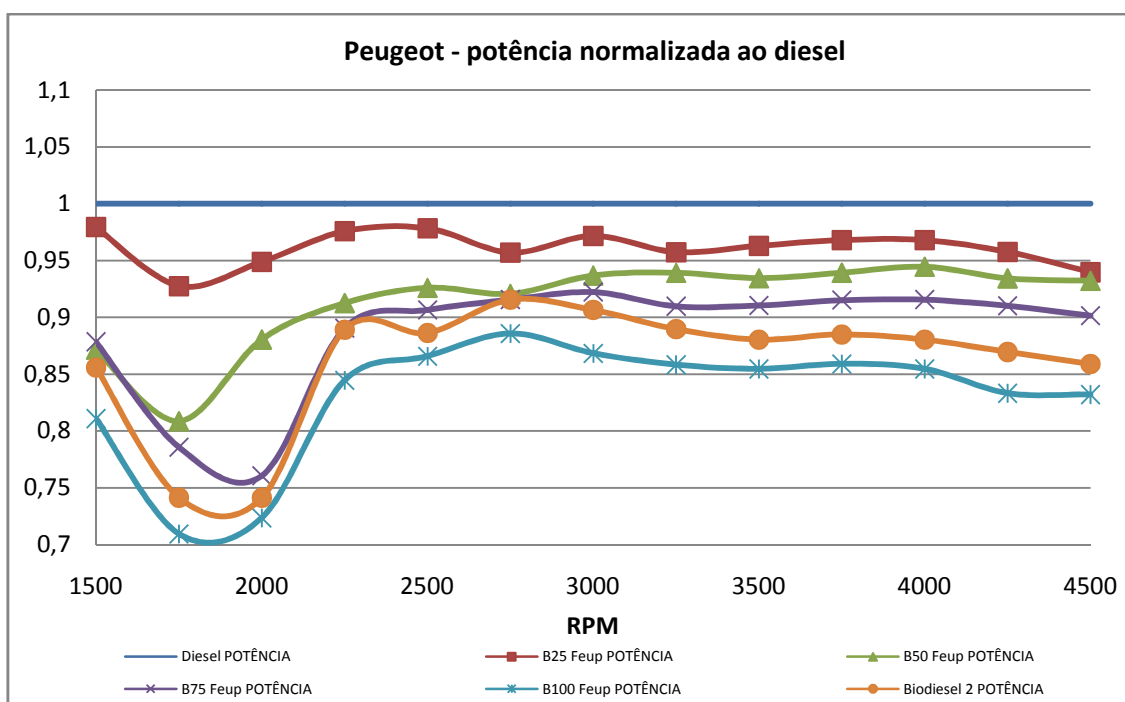


Figura 33 - Curvas de potência do Peugeot 107 normalizadas ao Diesel

A análise da figura permite identificar que até às 2500rpm a perda de potência é mais significativa e atinge valores aproximados de 30% para o B100. Para rotações superiores a 2500rpm a perda de potência é também tanto mais elevada quanto mais elevada é a percentagem de Biodiesel no combustível mas a perda de potência é inferior a 15% para o B100.

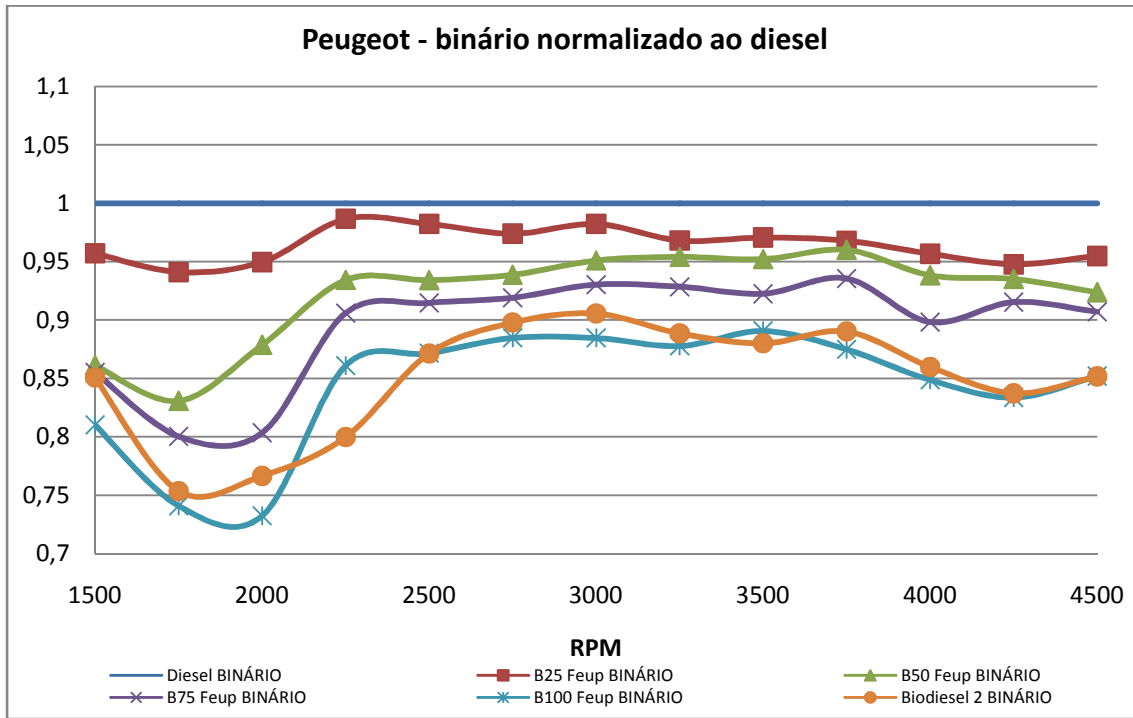


Figura 34 - Curvas de Binário do Peugeot 107 normalizadas ao Diesel

A análise da figura permite identificar um comportamento das curvas de binário normalizado semelhante ao verificado nas curvas de potência. As maiores perdas situam-se no período inicial (1500rpm – 2500rpm) e nas rotações superiores entre as 3750 e 4500rpm. Entre as 2500 e as 3750rpm as curvas das perdas apresentam-se mais horizontais.

Com uma análise idêntica, mas agora para o Fiat Bravo, as perdas de potência e binário são apresentadas nas Figuras Figura 35 e Figura 36, respectivamente.

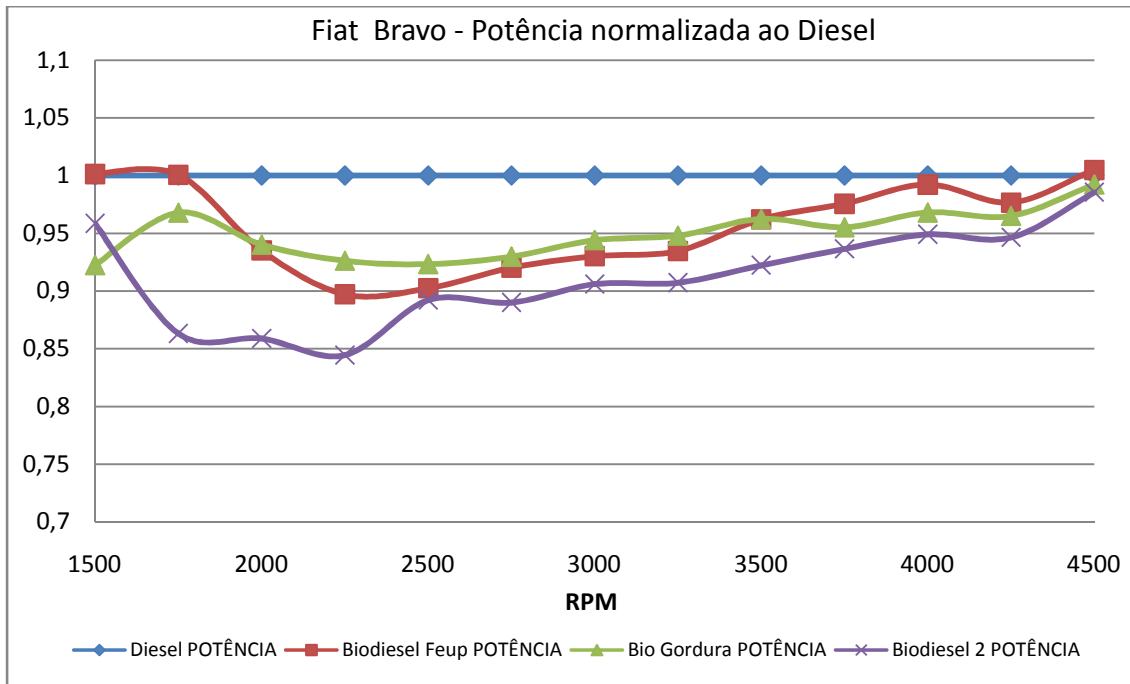


Figura 35 - Curvas de Potência do Fiat Bravo normalizadas ao Diesel

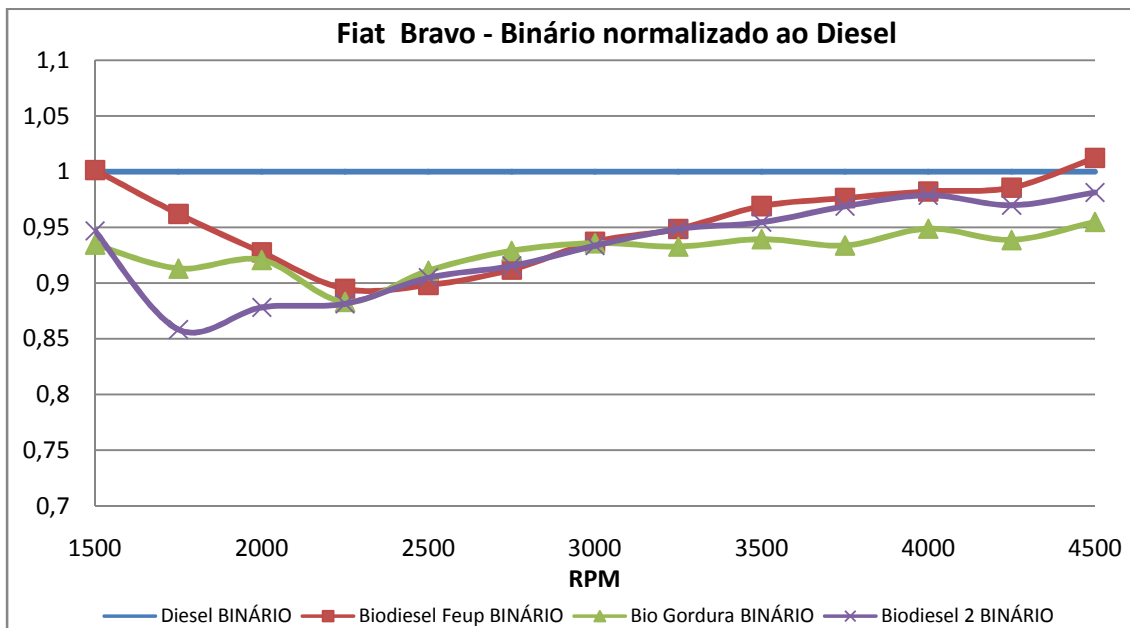


Figura 36 - Curvas de Binário do Fiat Bravo normalizadas ao Diesel

Pela análise das figuras, apercebemo-nos que o início das curvas apresenta variações de difícil compreensão, e que podem estar relacionadas com a instabilidade de funcionamento do automóvel no início do ensaio.

A partir das 2000rpm até ao limite das 4500rpm existe uma clara aproximação das curvas de biodiesel á curva do diesel, este comportamento é comum aos três biodieseis ensaiados. A partir das 3500rpm a perda de potência apresenta valores inferiores a 5%. Valores os quais não comprometem a opção pelo biodiesel para alimentação de motores de ignição por compressão.

A forma de complementar a análise das perdas de potência e binário já apresentada neste ponto, é uma análise conjunta das curvas de ambos os automóveis – o Fiat Bravo e o Peugeot 107. Na Figura 37, apresenta-se as curvas de potência normalizadas dos dois automóveis em funcionamento com Biodiesel Feup – B100 e Biodiesel 2.

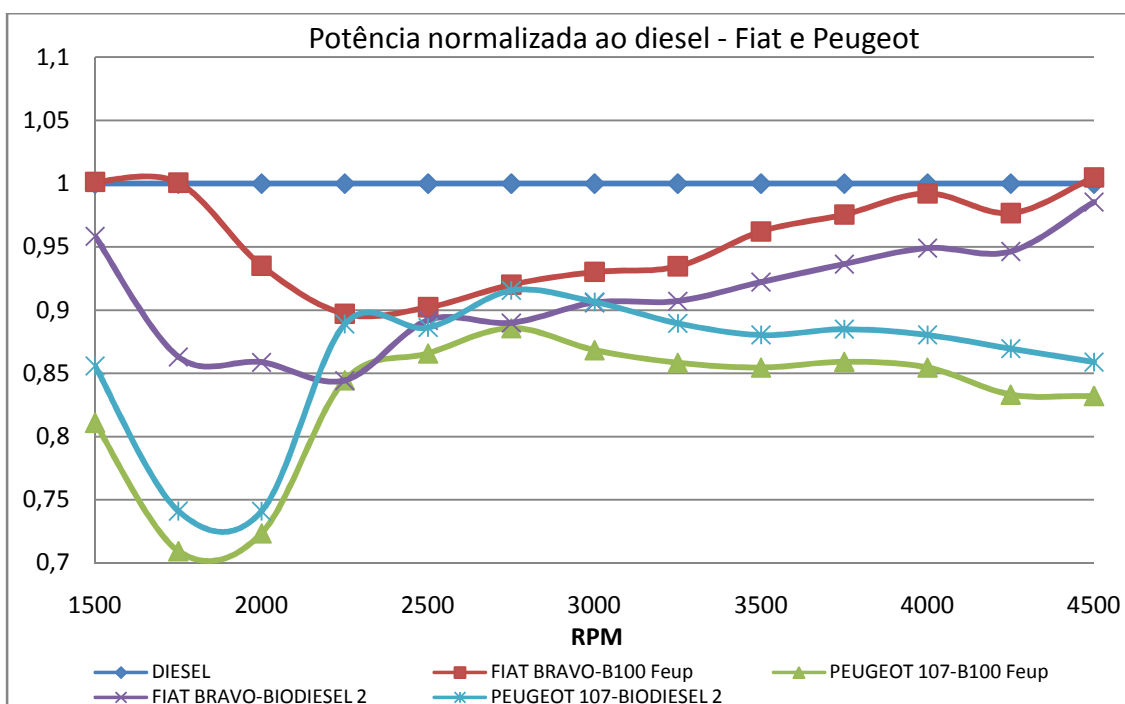


Figura 37 - Curvas de Potência normalizadas ao diesel do Fiat Bravo e Peugeot 107

Como se pode observar pela análise das curvas a perda global de potência é mais significativa para o sistema common-rail.

Nesta análise é de referir a sobreposição das curvas dos dois automóveis entre as 2250rpm e as 3000rpm, neste período as perdas nos dois carros por utilização

dos biocombustíveis aproximam-se dos 10%. No período inicial, até às 2250rpm, as perdas registadas são muito diferentes, e no final para rotações superiores às 3000rpm estas voltam a afastar-se.

O comportamento das curvas de potência do Biodiesel Feup e Biodiesel 2, nos ensaios do Peugeot, é idêntico, mantendo constante para todas as rotações o intervalo entre elas. O que sugere que o aumento de viscosidade e a diminuição do poder calorífico verificado para o biodiesel, origina o desfasamento das curvas de potência para o motor com common-rail.

As diversas curvas de potência do Fiat Bravo, apresentam até às 2500rpm comportamentos diferentes, os quais poderão estar relacionados com o poder calorífico de cada combustível.

5.6. Emissões gasosas no funcionamento de um motor diesel

Os ensaios das emissões gasosas do Peugeot 107 em carga, foram interrompidos por uma avaria electrónica do automóvel, numa altura em que ainda só se tinha determinado as emissões de três dos oito pontos de ensaio pretendidos inicialmente.

Os resultados obtidos apresentam-se na Tabela 10.

Tabela 10 – Resultados das determinações das emissões gasosas

Combustível		Diesel				Biodiesel FEUP			
Mudança		4 ^a				4 ^a			
RPM		1500		4500		1500		4500	
Carga		100%	50%	100%	50%	100%	50%	100%	50%
Emissões Gasosas	NOx [ppm]	980	76	630	-	-	-	-	-
	CO [%]	0,008	0,003	0,009	-	-	-	-	-
	CO ₂ [%]	12,87	11,08	8,70	-	-	-	-	-
	HC [ppm]	13	9	13	-	-	-	-	-
	O ₂ [%]	2,98	5,36	9,06	-	-	-	-	-

Dos valores obtidos, deve-se registar para os pontos determinados às 1500rpm o aumento das emissões de CO, CO₂ e NOx, com o aumento de carga aplicada de 50% para 100%. No caso particular das emissões de NOx, às 1500rpm, a variação das emissões é muito elevada.

De referir também a redução do valor das emissões de NOx em 100% de carga, às 4500rpm comparativamente com o valor obtido às 1500rpm.

6. Conclusões

Pela análise dos resultados de toda a investigação realizada neste trabalho é possível retirar algumas conclusões a nível da prestação de motores diesel, com a utilização de biodiesel como combustível.

Convém salientar que os motores dos automóveis ensaiados são o resultado de uma evolução e optimização, superior a um século de desenvolvimento, para a utilização do Diesel fóssil.

Apresentam-se de seguida, as conclusões da investigação do presente projecto:

- 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.

- É possível concluir 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 otimizada 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 injeção de combustível. Este permitirá também o estudo da solução para a injeção deficiente de biodiesel pelos sistemas common-rail, pois aparentemente se garantida a injeção de igual quantidade de combustível as perdas de potência e binário seriam reduzidas.
- No entanto, é preciso não esquecer o outro factor que uma injeção por common-rail introduz face ao sistema de bomba de injeção, a injeção gradual com diversas pré e pós-injeções. Esta mudança no tipo de combustão poderá ser afectada pelas propriedades detonantes e físicas do biodiesel.
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 injeção de maior quantidade de combustível para os mesmos intervalos de tempo de abertura dos injectores.
- Sobre o ponto de investigação das emissões gasosas, seria arriscado avançar com alguma conclusão, devido á interrupção forçada dos ensaios. De realçar apenas, a diferença do valor das emissões de NOx a 100% de carga e a 50% de carga, sendo que neste último o valor de 76 ppm encontra-se muito próximo dos valores obtidos por Sérgio Moreira para a mesma rotação e sem carga.

7. Referências

- BRITANNICA**, Encyclopedia [Online], consultada em 15 Junho 2008
- CarFolio [Online]**. www.carfolio.com , consultada 9 Julho 2008
- CHALEN, Bernardo e BARANESCU, Rodica. 1999.** *Diesel Engine Reference Book - 2ª edição.* Oxford: Elsevier.
- EMA-Engine manufacturers Association.** *Technical Statement on the use of biodiesel fuel in compression ignition engines.*2005.
- FELIZARDO, PEDRO. 2003.** *Produção de Biodiesel a partir de óleos usados de fritura.* Lisboa: Instituto Superior Técnico.
- CHENG, Wing-kuen. 2003.** *The performance of Biodiesel in In-service Motor Vehicles in Hong Kong.* University of Hong Kong.
- GIACOSA, Dante . 1986.** *Motores Endotérmicos – 3ª edição.* Editorial Dossat, D.L.
- LOPEZ, Antonio. 1967.** *Potência Binário Motor E Rendimento De Motores.* Sintra: Ediciones Ceac.
- MÁQUINAS TÉRMICAS, Apontamentos, 2005.** Porto: DEMEGI
- MARTINS, Jorge. 2006.** *Motores de Combustão Interna.* Porto: Publindustria, Edições Técnicas.
- MARTINEZ, Vicente e ARACIL.J. 2004.** *Integrated Biodiesel production: a comparison of different homogeneous catalysts systems.* Bioresour.technology
- MOREIRA, Sérgio. 2008.** *Influência do Biodiesel nas emissões de um motor turbo diesel.* Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
- U.S.Department of Energy – Energy Efficiency and Renewable Energy, 2006.** *Biodiesel Handling and Use Guidelines – third edition*
- Km77 [Online]**. www.km77.com, consultada a 8 Julho 2008

ANEXO A: Procedimento detalhado para determinação do Poder Calorífico

A determinação do poder calorífico dos combustíveis seguiu o seguinte procedimento:

Equipamento e Material:

- Calorímetro
- 2l de Água Desionizada
- Ácido Benzóico – elemento padrão
- Fio fusível

Procedimento detalhado:

- D. Preparação do Calorímetro e verificação de funcionamento por ensaio de elemento padrão
 - a. Amostra de aproximadamente 1,000g de Ácido Benzóico – elemento padrão;
 - b. Ensaio e comparação com o valor predefinido do Ácido Benzóico do fabricante.
- E. Produção das peletes com as amostras a analisar
 - a. Medição de aproximadamente 0,5g de Ácido Benzóico.
 - b. Fazer pastilha de ácido benzóico e colocar na pelete.
 - c. Com a pelete na balança analítica, adicionar 0,25g do combustível a ensaiar.
 - d. Registo de todas as repetições das medições.
- F. Realização do ensaio no calorímetro.
Ensaio de várias amostras de cada combustível (pelo menos três) até se obter resultados suficientemente próximos.

Ensaio no Calorímetro segundo o seguinte procedimento:

- A. Medir exactamente 2 litros de água desionizada e colocá-la em repouso para atingir temperatura constante. Deitá-lo no balde do calorímetro.

- B. Medir e cortar exactamente 10cm de fio de fusão. Colocá-lo no suporte de modo que as pontas fiquem bem presas no suporte.
- C. 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 efectuara a combustão da amostra.
- D. Fechar a bomba pressionando o suporte. Durante esta operação a válvula de saída do gás deve permanecer aberta. Colocar a rosca até ao máximo fechar a válvula de saída do gás.
- E. Encher a bomba com oxigénio até a pressão de 30 atm, muito lentamente. Este procedimento deve demorar cerca de 1 minuto.
- F. 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 pelete não se desloque no seu interior. A bomba deve ficar colocada no local exacto para evitar que se desloque durante a combustão.
- G. 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.
- H. Para proceder ao ensaio, fazer:
 - a. *15 [enter] (para dar inicio ao ensaio)
 - b. [enter] (numeração automática do ensaio)
 - c. Massa de amostra [enter] (introduzir valor da massa da amostra)
- I. A partir deste momento o programa está a decorrer, no pré-periodo. 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-period. 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.

ANEXO B: Procedimento detalhado para determinação da Massa Volúmica

A determinação da massa volúmica dos combustíveis seguiu o seguinte procedimento.

Material:

- Picnómetros de 5ml
- Banho termostático à temperatura de ensaio
- Balança analítica
- Goblés: colocação dos picnómetros, solução padrão (água destilada) e amostras dos combustíveis
- Papel absorvente

Procedimento detalhado:

- E. Preparação de equipamento
 - a. Preparação do banho com os goblés e termómetro.
- F. Calibração dos picnómetros, após aquecimento na bancada, pelo menos durante 15 minutos, procedimento para cada picnómetro a realizar no mínimo tempo possível de forma a evitar erros decorrentes da variação de temperatura.
 - a. Retirar picnómetro do banho à temperatura de ensaio.
 - b. Enxaguar muito bem com papel absorvente.
 - c. Medir a massa do picnómetro na balança analítica, repetindo e registando os valores suficientemente próximos.
 - d. Encher o picnómetro com a água destilada à temperatura de ensaio, contida num goblé na bancada. Enxaguar e proceder á medição da massa.
 - e. Retirar a água do picnómetro, lavá-lo com acetona, secar e colocar novamente no banho.

G. Medição da massa de combustível

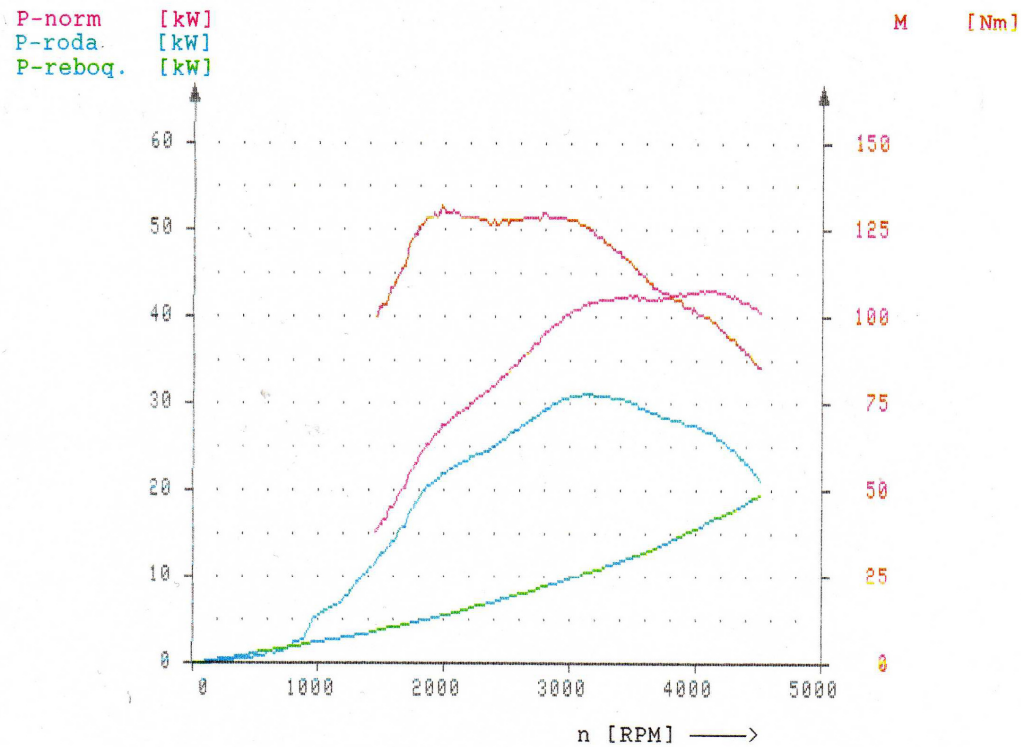
- a. Encher picnómetro, já calibrado e aquecido á temperatura de ensaio, com o combustível a analisar (contido num goblé no banho)
- b. Medição da massa do picnómetro com a amostra, repetir e registar os valores
- c. Eliminação da amostra contida no picnómetro para recipiente de resíduos. Lavar picnómetro com água destilada e acetona e por fim secá-lo.
- d. Colocar novamente o picnómetro no banho para aquecimento à temperatura de ensaio.

H. Repetição do procedimento para cada combustível e temperatura a ensaiar.

ANEXO C: ENSAIOS DE POTÊNCIA E BINÁRIO

Apresentam-se, nas páginas seguintes, as impressões dos ensaios realizados no Banco de Potência, para possível análise do comportamento das curvas, inclusive a curva de potência na roda e a curva de potência de perdas.

ANEXO C1: Peugeot 107 – Diesel



DADOS DA POTÊNCIA:

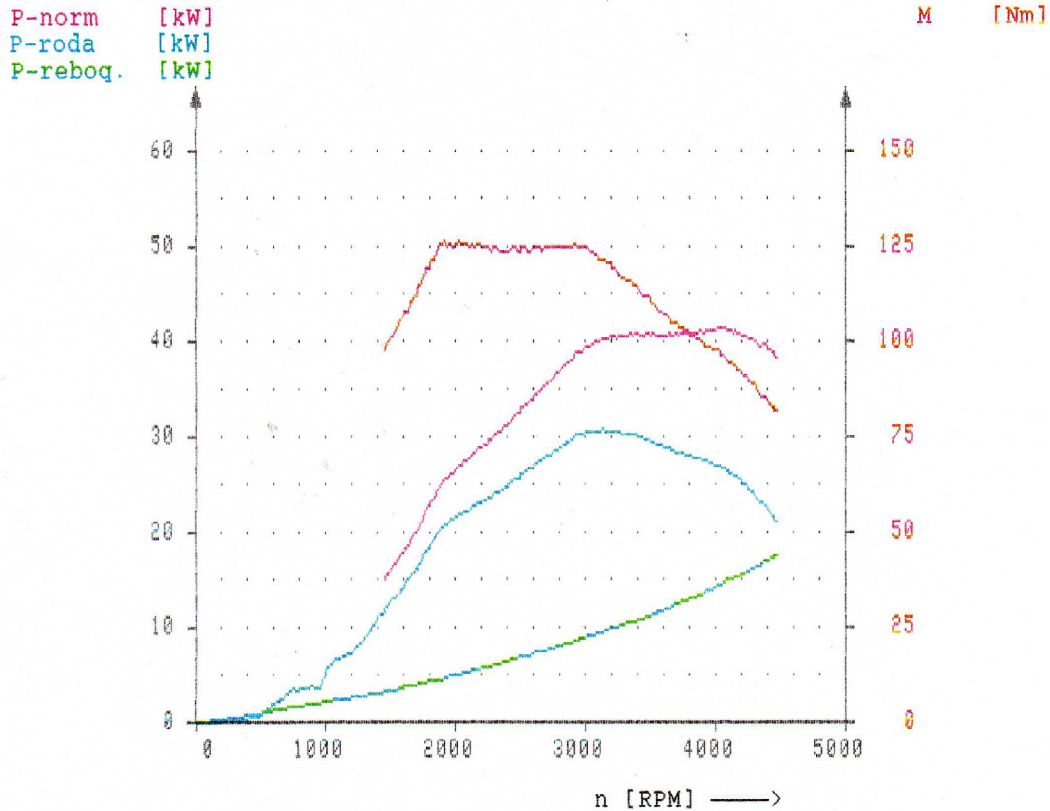
Potência normal	P-norm	: 43,5 kW (59,1 PS)	De acordo DIN 70020
Potência do motor	P-Mot	: 43,5 kW (59,1 PS)	
Potência da roda	P-roda	: 27,0 kW (36,7 PS)	
Potência de reboque	P-reboque	: 16,5 kW (22,4 PS)	
Potência máxima em	141 km/h	4120 RPM	

Torque	M	: 132 Nm
Torque máx. com	68 km/h	: 1990 RPM

Velocidade máxima	: 156 km/h
RPM máxima	: 4560 RPM

Pres. atmosférica	: 1007 mbar	Temp. do ar	: 17 °C
Pressão 1	: --- mbar	Temper. do óleo	: 16 °C
Pressão 2	: --- mbar	Temp.gás de esc.	: --- °C

ANEXO C2: Peugeot 107 – Biodiesel FEUP – B25



DADOS DA POTÊNCIA:

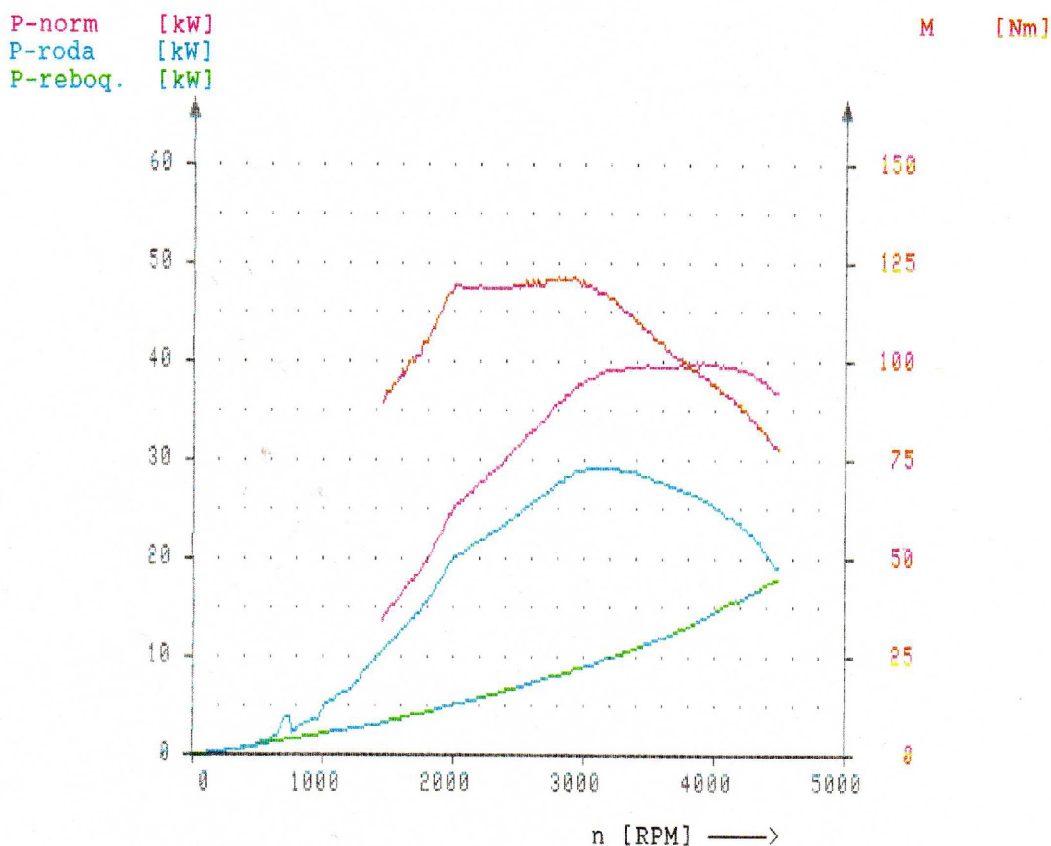
Potência normal P-norm : 42,0 kW (57,1 PS) De acordo DIN 70020
 Potência do motor P-Mot : 42,0 kW (57,1 PS)
 Potência da roda P-roda : 27,0 kW (36,7 PS)
 Potência de reboque P-reboque : 15,0 kW (20,4 PS)
 Potência máxima em 140 km/h 4070 RPM

Torque M : 127 Nm
 Torque máx. com 66 km/h : 1920 RPM

Velocidade máxima : 155 km/h
 RPM máxima : 4510 RPM

Pres. atmosfér. : 1007 mbar Temp. do ar : 18 °C
 Pressão 1 : --- mbar Temper. do óleo : 17 °C
 Pressão 2 : --- mbar Temp.gás de esc.: --- °C

ANEXO C3: Peugeot 107 – Biodiesel FEUP – B50



DADOS DA POTÊNCIA:

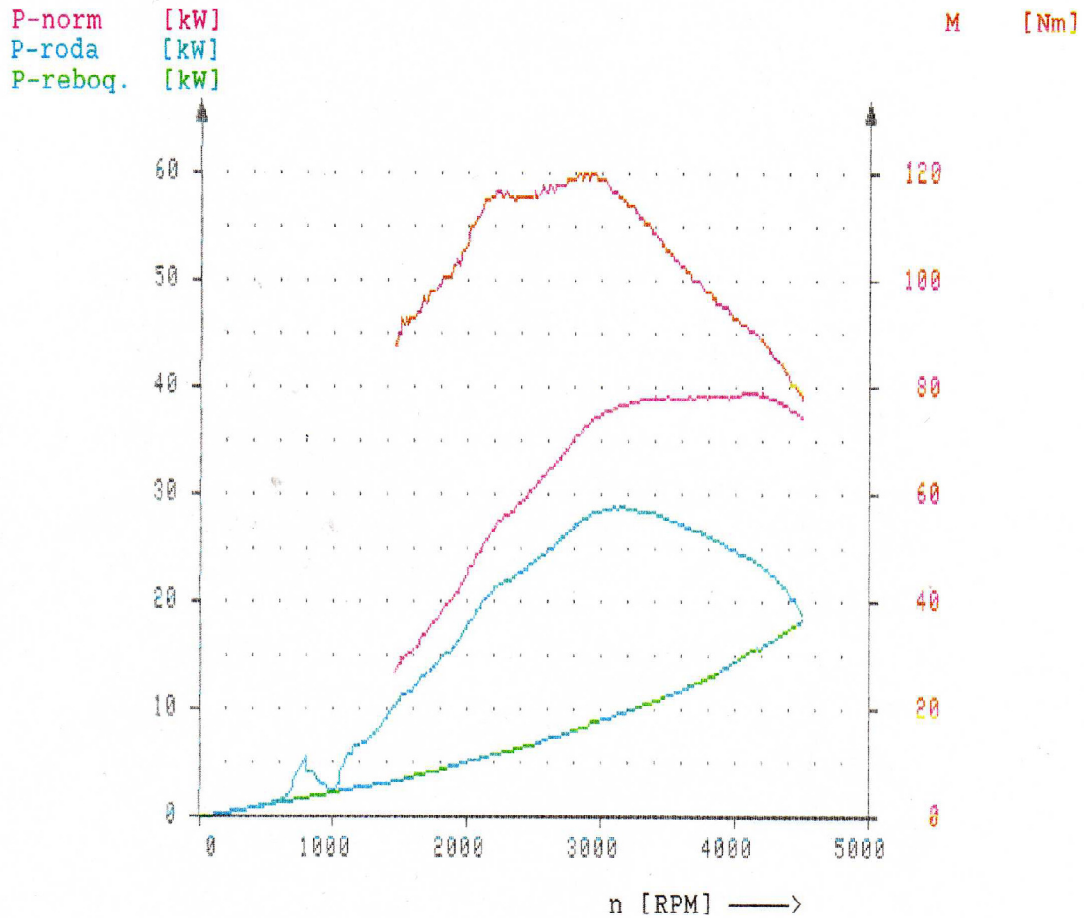
Potência normal	P-norm	: 40,0 kW (54,4 PS)	De acordo DIN 70020
Potência do motor	P-Mot	: 40,0 kW (54,4 PS)	
Potência da roda	P-roda	: 26,5 kW (36,0 PS)	
Potência de reboque	P-reboque	: 13,5 kW (18,3 PS)	
Potência máxima em	133 km/h	3870 RPM	

Torque	M	: 122 Nm
Torque máx. com	97 km/h	: 2820 RPM

Velocidade máxima	: 155 km/h
RPM máxima	: 4510 RPM

Pres. atmosfér. :	1007 mbar	Temp. do ar :	18 °C
Pressão 1 :	--- mbar	Temper. do óleo :	16 °C
Pressão 2 :	--- mbar	Temp.gás de esc.:	--- °C

ANEXO C4: Peugeot 107 – Biodiesel FEUP – B75



DADOS DA POTÊNCIA:

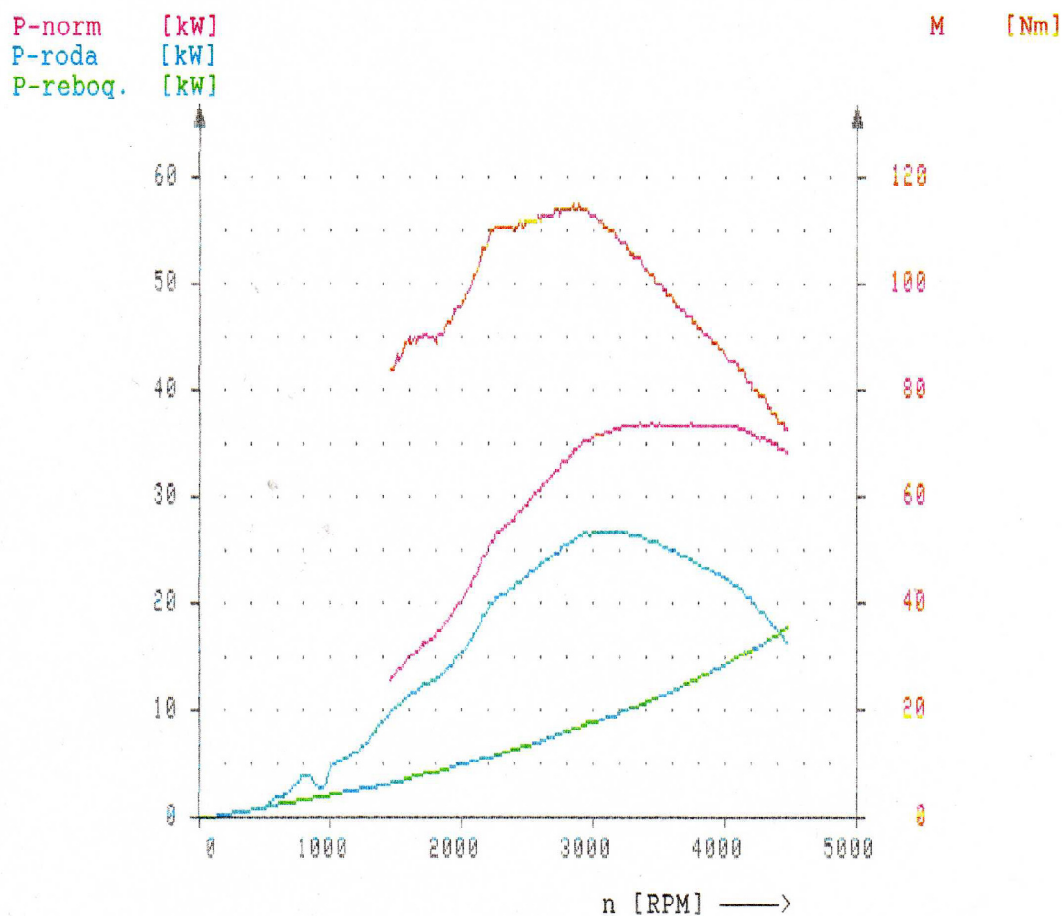
Potência normal	P-norm	: 39,5 kW (53,7 PS)	De acordo DIN 70020
Potência do motor	P-Mot	: 39,5 kW (53,7 PS)	
Potência da roda	P-roda	: 24,0 kW (32,6 PS)	
Potência de reboque	P-reboque	: 15,5 kW (21,0 PS)	
Potência máxima em	142 km/h	4150 RPM	

Torque	M	: 120 Nm
Torque máx. com	97 km/h	: 2830 RPM

Velocidade máxima	: 155 km/h
RPM máxima	: 4530 RPM

Pres. atmosfér. :	1007 mbar	Temp. do ar :	18 °C
Pressão 1 :	--- mbar	Temper. do óleo :	16 °C
Pressão 2 :	--- mbar	Temp.gás de esc.:	--- °C

ANEXO C5: Peugeot 107 – Biodiesel FEUP – B100



DADOS DA POTÊNCIA:

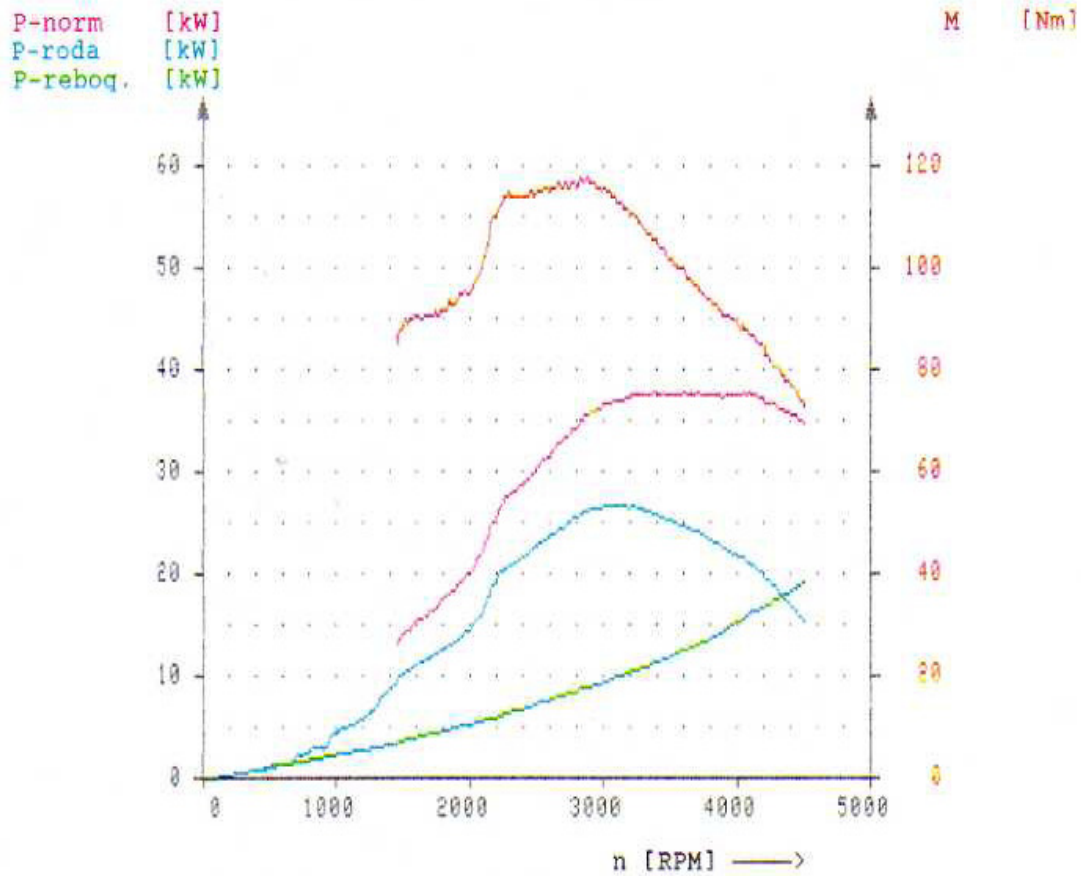
Potência normal	P-norm	: 37,0 kW (50,3 PS)	De acordo DIN 70020
Potência do motor	P-Mot	: 37,0 kW (50,3 PS)	
Potência da roda	P-roda	: 26,5 kW (36,0 PS)	
Potência de reboque	P-reboque	: 10,5 kW (14,2 PS)	
Potência máxima em	116 km/h	3380 RPM	

Torque	M	: 115 Nm
Torque máx. com	98 km/h	: 2850 RPM

Velocidade máxima	: 155 km/h
RPM máxima	: 4510 RPM

Pres. atmosfér. :	1006 mbar	Temp. do ar :	18 °C
Pressão 1 :	--- mbar	Temper. do óleo :	16 °C
Pressão 2 :	--- mbar	Temp.gás de esc.:	--- °C

ANEXO C6: Peugeot 107 – Biodiesel 2



DADOS DA POTÊNCIA:

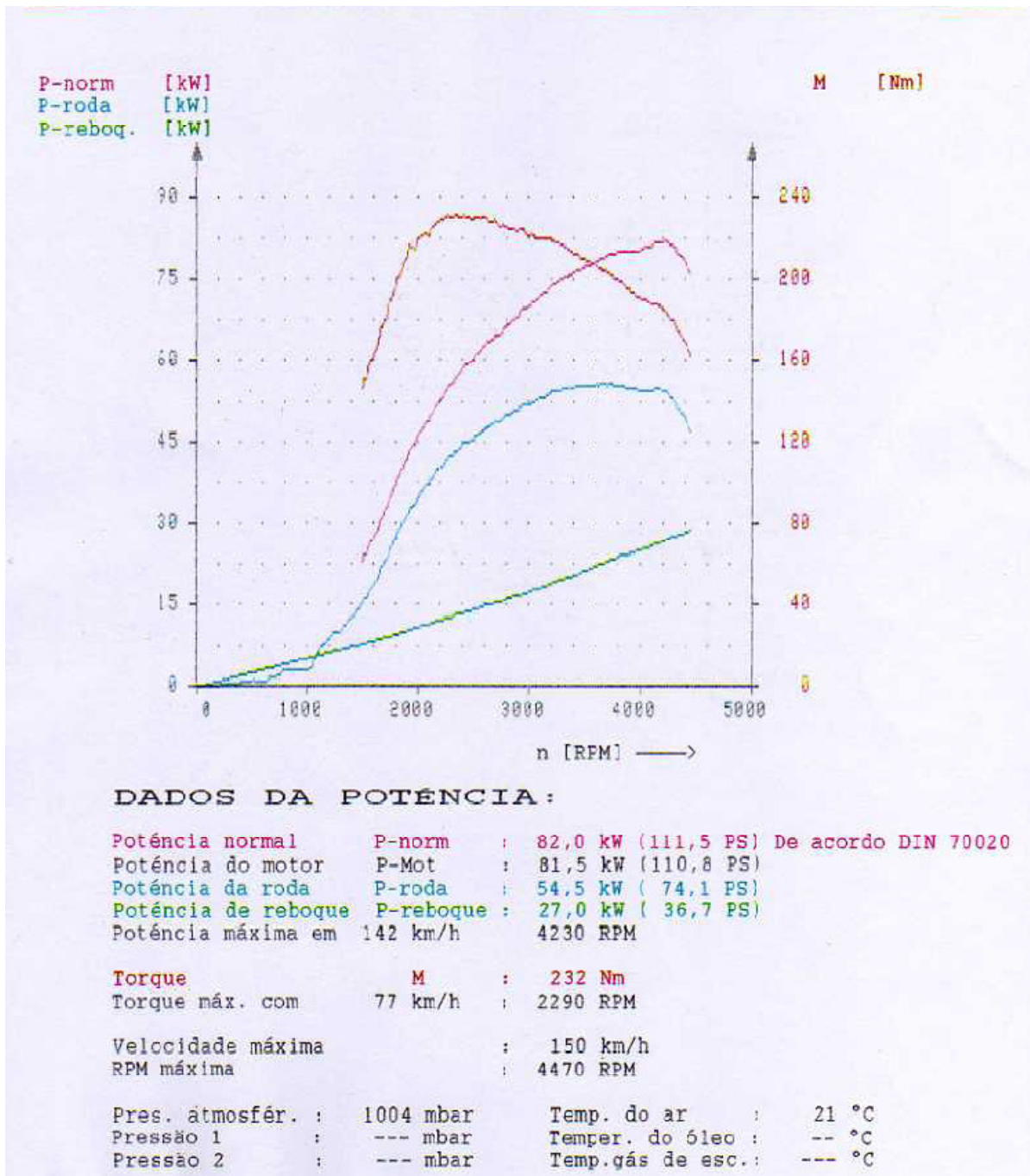
Potência normal	P-norm	: 38,0 kW (51,6 PS)	De acordo DIN 70020
Potência do motor	P-Mot	: 37,5 kW (51,0 PS)	
Potência da roda	P-roda	: 26,0 kW (35,3 PS)	
Potência de reboque	P-reboque	: 11,5 kW (15,6 PS)	
Potência máxima em	117 km/h	3400 RPM	

Torque	M	: 118 Nm
Torque máx. com	98 km/h	: 2850 RPM

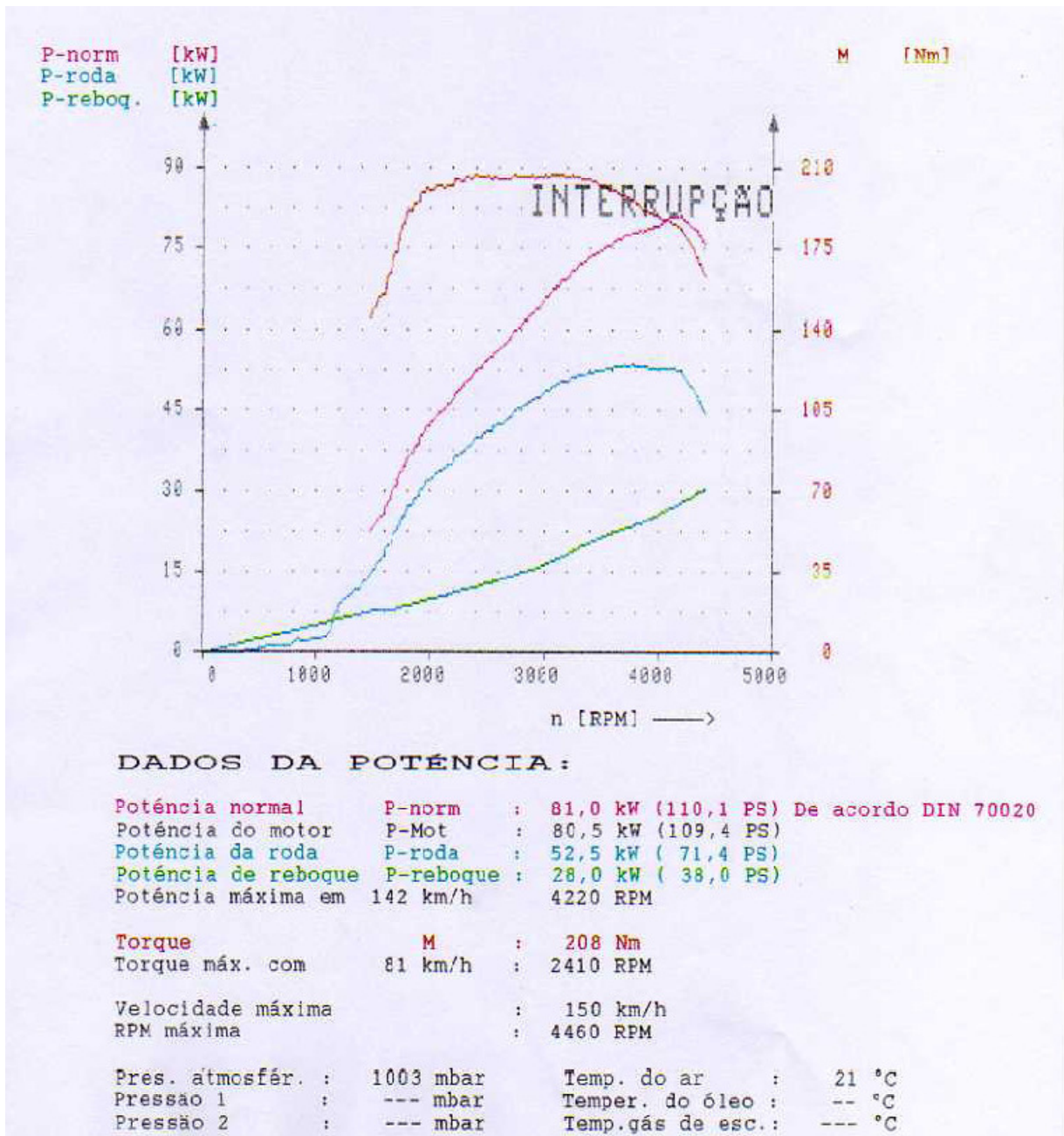
Velocidade máxima	: 156 km/h
RPM máxima	: 4540 RPM

Pres. atmosfér. :	978 mbar	Temp. do ar :	14 °C
Pressão 1 :	--- mbar	Temper. do óleo :	14 °C
Pressão 2 :	--- mbar	Temp.gás de esc.:	--- °C

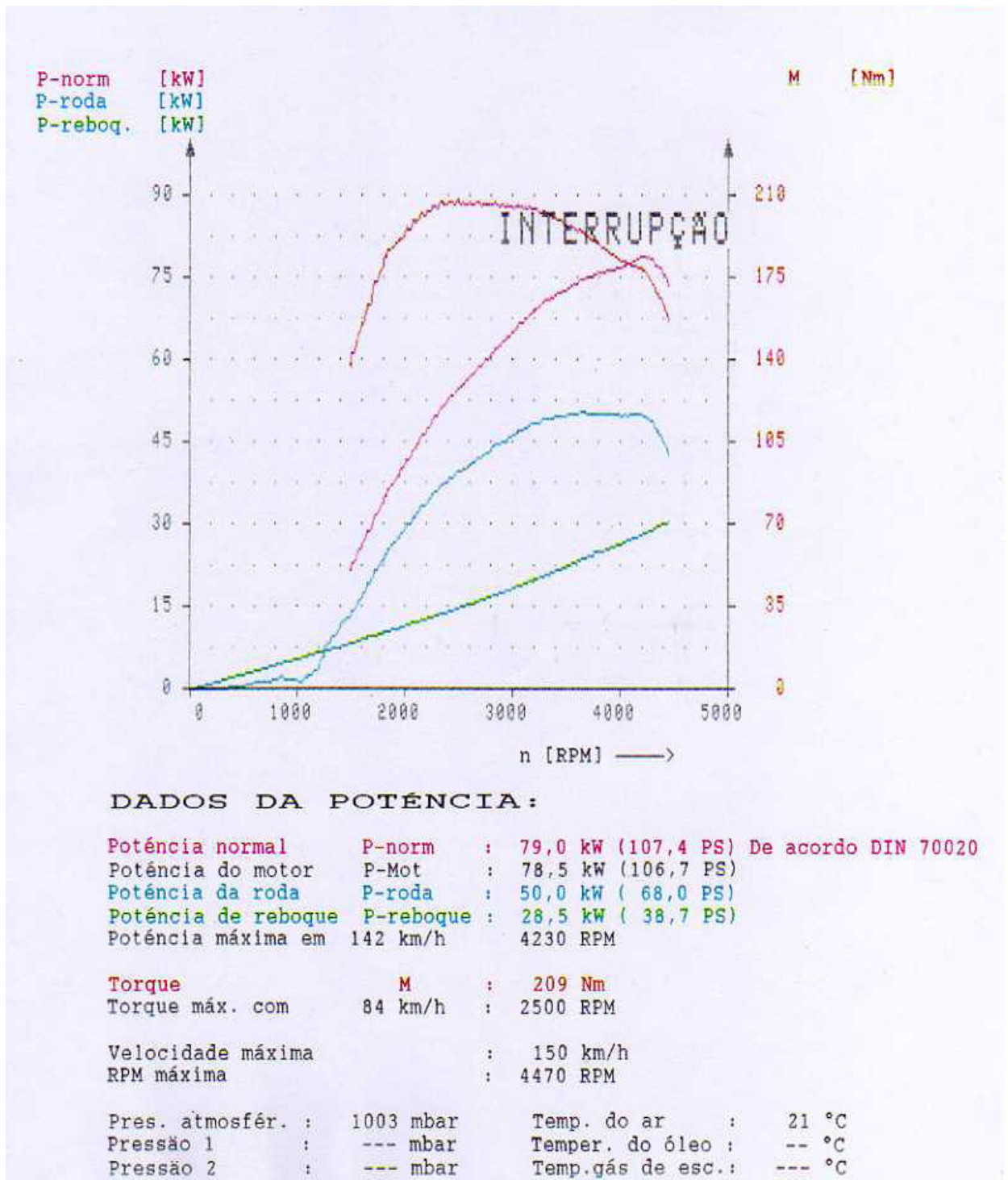
ANEXO C7: Fiat Bravo – Diesel



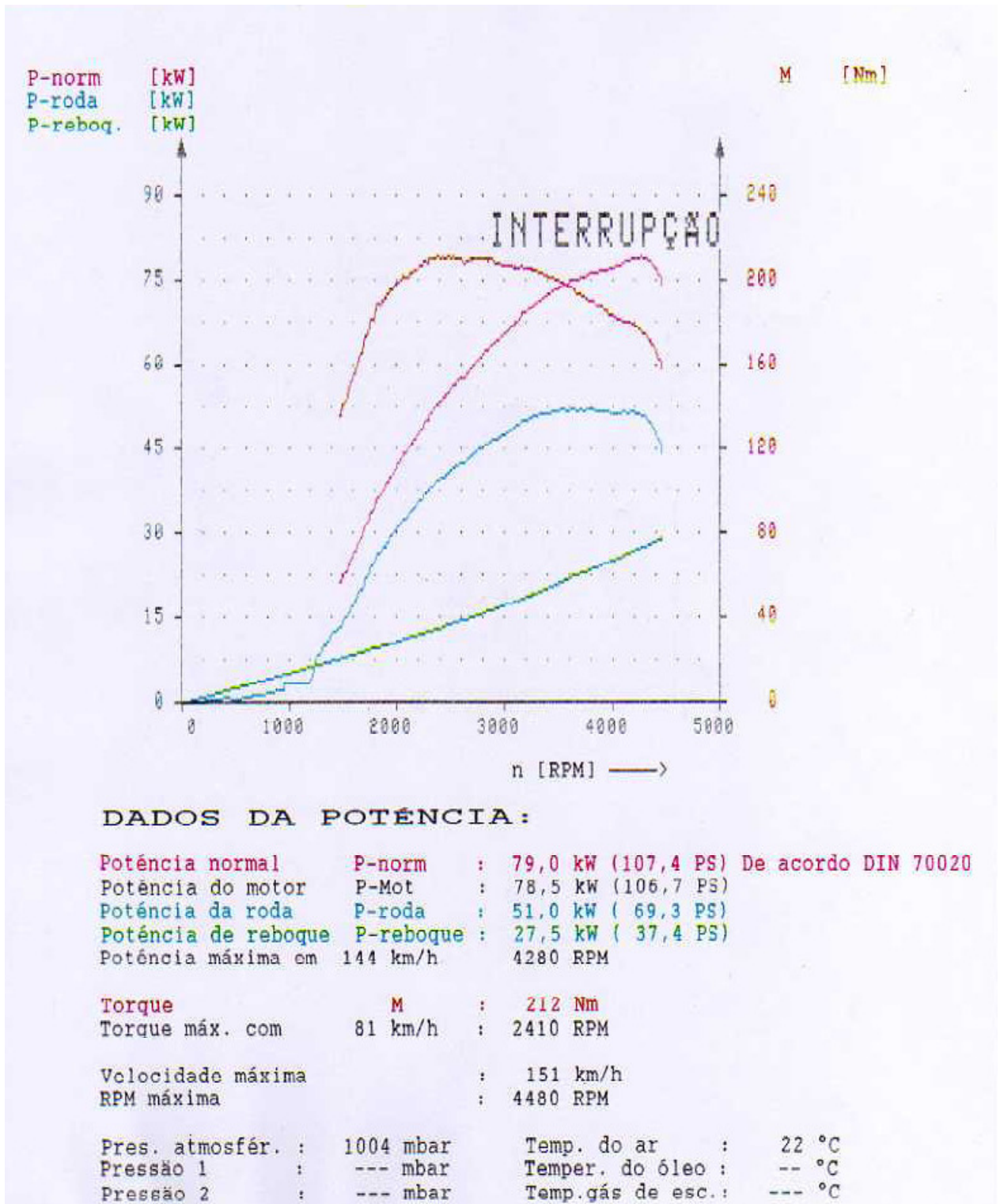
ANEXO C8: Fiat Bravo – Biodiesel FEUP



ANEXO C9: Fiat Bravo – Biodiesel 2



ANEXO C10: Fiat Bravo – Biodiesel Gordura



ANEXO D: Propriedades Combustíveis Ensaçados

Apresentação da caracterização parcial dos combustíveis Biodiesel Feup e Biodiesel Gordura, segundo Norma EN 14214(2003).

A caracterização foi realizada pelo Grupo do Biodiesel do LEPAE – Laboratório de Engenharia de Processos, Ambiente e Energia, Departamento de Engenharia Química, FEUP.

Propriedades	Norma EN 14214 (2003)		Biodiesel Feup	Biodiesel Gordura
	Limite mínimo	Limite máximo		
Ester content (wt%)	97		65,8	
Linolenic Ester content (wt%)		12	1,3	
Iodine Value (g iodine/100 g)		120	135	
Viscosity at 40°C (mm ² /s)	3,50	5,00	*	4,71
Density at 15°C (kg/m ³)	860	900	*	875,7
Water Content (mg/kg)		500	1411	
Acid Value (mg KOH/g)		0,50	0,47	0,04
Flash Point (°C)	120		170	175
Copper strip corrosion (3h at 50°C)	Class 1		Class 1	Class 1

ANEXO E: Norma EN 14214:2003

Apresentação da Norma e resumo das propriedades do biodiesel reguladas pela mesma.



Table 1 - Generally applicable requirements and test methods

Property	Unit	Limits		Test method ^a
		minimum	maximum	
Ester content ^a	% (m/m)	96,5 ^b		EN 14103
Density at 15 °C ^c	kg/m ³	860	900	EN ISO 3675 EN ISO 12185
Viscosity at 40 °C ^d	mm ² /s	3,50	5,00	EN ISO 3104
Flash point	°C	120	-	prEN ISO 3579 ^e
Sulfur content	mg/kg	-	10,0	prEN ISO 20846 prEN ISO 20884
Carbon residue (on 10 % distillation residue) ^f	% (m/m)	-	0,30	EN ISO 10370
Cetane number ^g		51,0		EN ISO 5165
Sulfated ash content	% (m/m)	-	0,02	ISO 3987
Water content	mg/kg	-	500	EN ISO 12937
Total contamination ^h	mg/kg	-	24	EN 12662
Copper strip corrosion (3 h at 50 °C)	rating	class 1		EN ISO 2160
Oxidation stability, 110 °C	hours	6,0	-	EN 14112
Acid value	mg KOH/g		0,50	EN 14104
Iodine value	g iodine/100 g		120	EN 14111
Linolenic acid methyl ester	% (m/m)		12,0	EN 14103
Polyunsaturated (>= 4 double bonds) methyl esters ⁱ	% (m/m)		1	
Methanol content	% (m/m)		0,20	EN 14110
Monoglyceride content	% (m/m)		0,80	EN 14105
Diglyceride content	% (m/m)		0,20	EN 14105
Triglyceride content ^j	% (m/m)		0,20	EN 14105
Free glycerol ^k	% (m/m)		0,02	EN 14105
Total glycerol	% (m/m)		0,25	EN 14106
Group I metals (Na+K) ^l	mg/kg		5,0	EN 14108 EN 14109
Group II metals (Ca+Mg) ^l	mg/kg		5,0	prEN 14538
Phosphorus content	mg/kg		10,0	EN 14107

^a See 5.5.1
^b The addition of non-FAME components other than additives is not allowed, see 5.2.
^c Density may be measured by EN ISO 3675 over a range of temperatures from 20 °C to 80 °C. Temperature correction shall be made according to the formula given in Annex C. See also 5.5.2
^d If CFPP is -20 °C or lower, the viscosity measured at -20 °C shall not exceed 48 mm²/s. In this case, EN ISO 3104 is applicable without the precision data owing to non-Newtonian behaviour in a two-phase system.
^e A 2 ml sample and apparatus equipped with a thermal detection device shall be used
^f ASTM D 1160 shall be used to obtain the 10% distillation residue.
^g See 5.5.3.
^h Pending development of a suitable method by CEN/TC 19, EN 12662 shall be used. The precision of EN 12662 is however poor for FAME products
ⁱ Suitable test method to be developed
^j See also 5.5.1.
^k See 5.5.1. Method under development. See Annex A for precision data for sum of Na + K
^l Method under development. See Annex A for precision data for sum of Ca + Mg.