

Optimização da Gestão Electrónica de um Motor a Gasóleo para o Biodiesel

Filipe Manuel Rodrigues Azevedo Lavandeira

Relatório do Projecto Final

Orientador na FEUP: Prof. José Ferreira Duarte



FEUP

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

Fevereiro 2010

<Aos meus pais>

Resumo

O petróleo é o combustível fóssil mais utilizado por todo o Mundo sendo a diminuição da sua abundância cada vez maior e devido a isso o recurso a combustíveis de origem alternativa é necessária e bem-vinda. Surgiu assim o biodiesel como resposta ao cada vez mais caro e raro gasóleo de origem petrolífera.

O projecto em questão tem como finalidade a análise das propriedades do biodiesel e posteriormente intervier em vários parâmetros da gestão electrónica do motor com o objectivo de recuperar/melhorar as prestações deste relativamente ao gasóleo convencional.

Os parâmetros alvo desta optimização são essencialmente o tempo, a pressão, o caudal e o avanço de injeção. Parâmetros como a pressão de sobrealimentação e regulação do turbocompressor também poderão ser optimizados mas este com menos importância pois os parâmetros relacionados com o comburente serem de certa forma independentes dos relativos ao combustível.

A conclusão extraída desde trabalho vai-se resumir ao facto de ser útil ou não uma gestão electrónica conveniente para o biodiesel no intuito de recuperação das perdas de potência face ao gasóleo.

Agradecimentos

Ao meu orientador de projecto, Professor José Ferreira Duarte, pela disponibilidade, orientação e boa disposição que demonstrou ao longo deste projecto.

Ao Eng. Diogo Ramos pela disponibilidade e conhecimento que partilhou comigo ao longo do projeto.

Ao Eng. Jorge Morais e Pedro Morais pela disponibilidade e colaboração ao longo da parte dos testes práticos.

Índice de Conteúdos

1	Introdução	1
2	Revisão Bibliográfica.....	2
2.1	Motor a Gasóleo.....	2
2.1.1	Características da Combustão	2
2.1.2	Preparação da mistura.....	3
2.1.3	Tipo de combustão.....	3
2.1.4	Fases da combustão no motor a Gasóleo.....	3
2.1.5	Sistema de injeção	7
2.1.6	Atomização	27
2.1.7	Penetração do Spray.....	27
2.1.8	Avanço da Injecção	28
2.1.9	Carga ou quantidade Injectada	29
2.1.10	Turbulência	29
2.1.11	Taxa de compressão.....	30
2.1.12	Sobrealimentação	30
2.1.13	EGR (Recirculação dos Gases de Escape)	32
2.2	Combustíveis	32
2.2.1	Emissões gasosas	32
2.2.2	Poder Calorífico.....	37
2.2.3	Gasóleo.....	38
2.2.4	Biodiesel.....	39
2.2.4.1	Produção	40
2.2.4.2	Vantagens Gerais do Biodiesel.....	41
2.2.4.3	Desvantagens Gerais do Biodiesel.....	42
2.2.4.4	Causas da falha do equipamento de injeção derivado ao uso de Biodiesel	43
2.2.5.5	O Biodiesel e o Futuro	47
2.2.5.6	Regulamentação.....	50
3	Objectivos.....	51
3.1	Combustíveis testados.....	51
4	Procedimento Experimental	52
4.1	Influência do Biodiesel no funcionamento dos motores a gasóleo.....	52
4.2	Propriedades do Biodiesel	54
4.2.1	Poder Calorífico de vários combústveis	54
4.2.2	Viscosidade Cinemática	55
4.2.3	Massa Volúmica.....	59
4.3	Quantidade de combústvel injectada	59
4.4	Calor fornecido pela combustão	63
4.5	Parâmetros Optimizáveis	66
4.5.1	Sistema de Injecção Bomba Injectora	66
4.5.2	Sistema de Injecção Injector - Bomba.....	68
4.5.3	Sistema de Injecção Common Rail	69
4.5.4	Parâmetros objecto de estudo	70
4.5.4.1	Tempo de Injecção	70
4.5.4.2	Pressão de Injecção	71
4.5.4.3	Avanço de Injecção.....	72

4.6	Máquina de programação	73
4.7	Banco de potência.....	75
4.8	Veículo	76
4.8.1	Dados do Fabricante.....	77
4.8.2	E.C.U. (Centralina).....	78
5	Resultados e sua discussão	80
5.1	Mapeamento inicial	80
5.2	Resultados dos vários mapeamentos	81
5.2.1	Teste com gasóleo.....	81
5.2.2	Teste com biodiesel	82
5.2.3	1º Mapeamento.....	84
5.2.4	2º Mapeamento.....	86
5.2.5	3º Mapeamento	88
5.2.6	4º Mapeamento	91
5.2.7	5º Mapeamento	93
5.2.8	6º Mapeamento	93
5.2.9	7º Mapeamento	95
5.2.9	8º Mapeamento	97
5.3	Comparação de Resultados	98
6	Conclusões.....	101
7	Referências	103
8	Anexos	104

Índice de Figuras

Figura 1: Combustão no motor a Gasóleo [Martins, 2006]	4.
Figura 2: Pontos mortos do motor [Martins, 2006]	5.
Figura 3: Injecção Directa [Martins, 2006]	8.
Figura 4: Injecção Indirecta [Martins, 2006]	8.
Figura 5: Esquema da bomba de injecção em linha [http://www.joseclaudio.eng.br/Imagens/image018.jpg]	9.
Figura 6: Funcionamento da bomba de injecção em linha [Martins, 2006]	9.
Figura 7: Pistão-camisa da bomba de injecção em linha [Martins, 2006]	9.
Figura 8: Bomba de injecção em linha [Martins, 2006]	10.
Figura 9: Bomba de injecção rotativa [Martins, 2006]	11.
Figura 10: Prato da bomba rotativa (6 cilindros) [Martins, 2006]	11.
Figura 11: Esquema de funcionamento do veio distribuidor (OT=PMS; UT=PMI)	11.
Figura 12: Esquema da bomba de injecção rotativa ["Diesel Fuel Injection" first edition published June 1994. ISBN 1-56091-542-0.]	12.
Figura 13: Esquema de um sistema bomba-injector [http://jcwinnie.biz/wordpress/imageSnag/pom1.jpg]	13.
Figura 14: Bomba de alta pressão na fase de abastecimento [Silva, 2006]	13.
Figura 15: Bomba de alta pressão na fase de transbordo [Silva, 2006]	14.
Figura 16: Bomba de alta pressão no momento da injecção [Silva, 2006]	14.
Figura 17: Bomba de alta pressão no fim da injecção de combustível [Silva, 2006]	15.
Figura 18: Comando do injecto "Common-rail" [Martins, 2006]	15.
Figura 19: Sistema common rail geral	16.
Figura 20: Bomba CP1 em corte [Cairrão, 2004]	17.
Figura 21: Admissão e compressão do gasóleo [Cairrão, 2004]	18.
Figura 22: Esquema da bomba de alta pressão DELPHI [Cairrão, 2004]	19.
Figura 23: a) Admissão do combustível.....b) Compressão do combustível [Cairrão, 2004]	20.
Figura 24: Esquema da bomba de alta pressão DENSO	21.
Figura 25: Bomba de alta pressão SIEMENS [Cairrão, 2004]	22.
Figura 26: Vista em corte do injecto indutivo [Cairrão, 2004]	24.
Figura 27: Bicos das agulhas dos injectores (a – injecção indirecta; b – injecção directa) [Martins, 2006]	26.
Figura 28: Distribuição de gotas de "sprays" a diferentes pressões [Martins, 2006]	27.
Figura 29: a) Câmaras para promover turbulência [Martins, 2006] b) Criação de turbulência pelo o uso de colectores de admissão curvos [Martins, 2006]	29.

Figura 30: Esquema do motor sobrealimentado (com turbocompressor) com intercooler [Marques, Ramos, 2008]	31.
Figura 31: Princípio de funcionamento de um turbocompressor [Marques, Ramos, 2008]	31.
Figura 32: Esquema da EGR [Martins, 2006]	32.
Figura 33: Produção de poluentes função da riqueza da mistura	33.
Figura 34: Variação de produção de NOx e HC com a variação do avanço da injeção [Martins, 2006].....	36.
Figura 35: PCI dos combustíveis e da sua mistura estequiométrica [Martins, 2006]	38.
Figura 36: Produção de CO2 função da relação entre átomos de hidrogénio e carbono [Martins, 2006].....	39.
Figura 37: Potencial de produção de CO2 de alguns combustíveis [Martins, 2006]	39.
Figura 38: Esquema da reacção de transesterificação.....	40.
Figura 39: Reacção de transesterificação.....	41.
Figura 40: Representação esquemática das fases de produção de Biodiesel	41.
Figura 41: a – Bomba rotativa de alta pressão; b – Bomba rotativa após o uso de B100 de baixa qualidade (fora dos parâmetros regulamentados) [Leandro H. Benvenuti – Ford Motor Company – Combustíveis e Lubrificantes]	43.
Figura 42: a e b – Durabilidade de um corpo de injector ao fim de 97.000 km (fortes marcas de corrosão) [Leandro H. Benvenuti – Ford Motor Company – Combustíveis e Lubrificantes].....	44.
Figura 43: a e b – Veio de accionamento de bomba rotativa de alta pressão com desgaste [Leandro H. Benvenuti – Ford Motor Company – Combustíveis e Lubrificantes].....	44.
Figura 44: a – (esquerda) Biodiesel má qualidade; b – (direita) Biodiesel boa qualidade [Leandro H. Benvenuti – Ford Motor Company – Combustíveis e Lubrificantes].....	45.
Figura 45: Formação de sabão	45.
Figura 46: a-b) coqueamento do bico causado por Biodiesel c-d) coqueamento do bico causado pelo gasóleo	46.
Figura 47: a – (esquerda) veio de accionamento; b – (direita) Garras do veio de accionamento [Leandro H. Benvenuti – Ford Motor Company – Combustíveis e Lubrificantes]	46.
Figura 48: Corpo da bomba da unidade injectora.....	47.
Figura 49: Esquema de reprodução de algas [US Department of Energy's Aquatic Species].....	48.
Figura 50: Quantidade de óleo vegetal produzida para matérias-primas diferentes (galões/acre/ano) [Global Green Solutions, 2007].....	49.
Figura 51: Área de produção de Micro-algas [Global Green Solutions, 2007]	50.
Figura 52: Curvas de potência e binário do Peugeot 107 utilizando Gasóleo, Biodiesel e Biodiesel 2 [Pimenta, 2008].....	52.
Figura 53: Curvas de potência e binário do Fiat Bravo utilizando Gasóleo, Biodiesel e Biodiesel 2 [Pimenta, 2008].....	53.
Figura 54: Viscosidade Cinemática dos combustíveis em função da temperatura [Ramos, 2009].....	56.

Figura 55: Viscosidade Cinemática dos combustíveis em função da temperatura [Ramos, 2009].....	56.
Figura 56: Viscosidade Cinemática dos combustíveis normalizada ao Gasóleo em função da temperatura [Ramos, 2009].....	57.
Figura 57: Viscosidade Cinemática do óleo vegetal normalizado ao Biodiesel em função da temperatura [Ramos, 2009].....	58.
Figura 58: Quantidade injectada de combustível por ciclo (mm ³ /ciclo) para todas as temporizações [Ramos, 2009].....	60.
Figura 59: Quantidade injectada de combustível por ciclo normalizado ao Gasóleo com uma temporização de 3 e 10 ms em função da pressão de injeção [Ramos, 2009]	60.
Figura 60: Quantidade injectada de combustível por ciclo em função da temporização [Ramos, 2009]	61.
Figura 61: Quantidade injectada de combustível por ciclo normalizado ao Gasóleo com uma pressão de injeção de 420 e 590 bar em função do tempo de injeção [Ramos, 2009] ...	61.
Figura 62: Quantidade injectada de combustível por ciclo (mg/ciclo) para todas as temporizações [Ramos, 2009].....	62.
Figura 63: Calor fornecido por ciclo (cal/ciclo) para todas as temporizações [Ramos, 2009].....	64.
Figura 64: Calor fornecido por ciclo normalizado ao Gasóleo com uma temporização de 3 e 10 ms em função da pressão de injeção [Ramos, 2009]	64.
Figura 65: Calor fornecido para cada combustível para cada pressão em função da temporização [Ramos, 2009]	65.
Figura 66: Calor fornecido por ciclo normalizado ao Gasóleo com uma pressão de injeção de 420 e 590 bar em função da temporização [Ramos, 2009].....	65.
Figura 67: Centralina Bosch EDC15V.....	67.
Figura 68: Centralina Delphi Ford	67.
Figura 69: Mapa da voltagem de bomba de injeção de um motor 1.9 TDI 110cv VAG	67.
Figura 70: Centralina Siemens PPD	68.
Figura 71: Mapa pressão relativa de sobrealimentação do motor 1.4 TDI PD 75cv VAG.....	68.
Figura 72: Centralina Delphi do Jaguar X-Type 2.0d.....	69.
Figura 73: Mapa Avanço de injeção do BMW X5 3.5d 286cv	70.
Figura 74: Mapa do tempo de injeção Fiat Bravo 1.6 MJet 105cv.....	71.
Figura 75: Mapa da pressão de injeção Fiat Bravo 1.6 MJet 105cv	72.
Figura 76: Mapa avanço de injeção Fiat Bravo 1.6 MJet 105cv	72.
Figura 77: Hardware CMD flash.....	73.
Figura 78: Software CMD flash	74.
Figura 79: Método de programação por BDM.....	75.
Figura 80: Banco de potência Maha LPS2000 [http://www.tat-rd.com/dyno_htm_e/mahadyno_page2.htm]	76.
Figura 81: Fiat Bravo 1.6 JTD MJet 105cv.....	77.

Figura 82: Centralina do Fiat Bravo 1.6 JTD MJet 105cv	79.
Figura 83: Mapa de incrementos de 5% no Tempo de Injecção	80.
Figura 84: Mapa de incrementos de 50 bar na Pressão de Injecção	81.
Figura 85: Comparação gráfica de potências entre gasóleo e biodiesel	82.
Figura 86: Comparação gráfica de potências entre gasóleo e biodiesel Prog 1	84.
Figura 87: Comparação gráfica de potências entre gasóleo e biodiesel Prog 2	87.
Figura 88: Comparação gráfica de potências entre gasóleo e biodiesel Prog 3	89.
Figura 89: Comparação gráfica de potências entre gasóleo e biodiesel Original 3	90.
Figura 90: Comparação gráfica de potências entre gasóleo e biodiesel Prog 4	92.
Figura 91: Comparação gráfica de potências entre gasóleo e biodiesel Prog 6	94.
Figura 92: Comparação gráfica de potências entre gasóleo e biodiesel Prog 7	96.
Figura 93: Biodiesel normalizado em relação ao gasóleo	99.

Índice de Tabelas

Tabela 1: Limites de emissão depoluentes para automoveis da união europeia	33.
Tabela 2: Propriedades de alguns combustíveis	37.
Tabela 3: Quantidade de óleo vegetal produzida para materias primas diferentes	49.
Tabela 4: Propriedades do Gasóleo e do Biodiesel normalizados	50.
Tabela 5: Resultados das determinações do PCS	54.
Tabela 6: Resultados das determinações da viscosidade cinemática.....	55.
Tabela 7: Resultados das determinações da massa volúmica para a temperatura ambiente	59.
Tabela 8: Resultados da determinação do caudal injectado	59.
Tabela 9: Resultados das determinações do caudal massico injectado	62.
Tabela 10: Resultados das determinações do calor fornecido pela combustão	63.
Tabela 11: Tabela de Conversão	63.
Tabela 12: Percentagem de diminuição de calor fornecido em função do Gasóleo e do Biodiesel.....	66.
Tabela 13: Dados técnicos Fiat Bravo 1.6 JTD MJet 105cv	77.
Tabela 14: Dados técnicos da centralina Fiat Bravo 1.6 JTD MJet 105cv	79.
Tabela 15: Comparação numérica de potências entre gasóleo e biodiesel	83.
Tabela 16: Comparação numérica de potências entre gasóleo e biodiesel Prog1	85.
Tabela 17: Comparação numérica de potências entre gasóleo e biodiesel Prog2	87.
Tabela 18: Comparação numérica de potências entre gasóleo e biodiesel Prog3	89.
Tabela 19: Comparação numérica de potências entre gasóleo e biodiesel Original 3.....	91.
Tabela 20: Comparação numérica de potências entre gasóleo e biodiesel Prog4	92.
Tabela 21: Comparação numérica de potências entre gasóleo e biodiesel Prog6	95.
Tabela 22: Comparação numérica de potências entre gasóleo e biodiesel Prog7	97.

1- Introdução

As indústrias mundiais utilizam os seus recursos primários praticamente sem limite com o objectivo da produção dos seus produtos seja a mais competitiva possível no mercado onde estão inseridos.

O petróleo é massivamente a matéria-prima mais utilizada nas mesmas economias e como tal a sua escassez era previsível e actualmente uma fonte natural em vias de esgotamento e para além desta evidência, factores ambientais também contribuíram para a procura de matérias-primas alternativas mais rentáveis e limpas para o ambiente.

O Biodiesel surge então como resposta ao gasóleo fóssil sendo possuidor de várias vantagens: menos poluidor para o ambiente, renovável e a sua matéria-prima ser variada e muito abundante. As principais fontes desta Biomassa são as gorduras animais e os óleos vegetais que posteriormente tratados se obtêm o Biodiesel.

O Biodiesel surge assim como uma alternativa promissora face ao gasóleo de origem petrolífera o que implica inúmeros testes e estudos sobre as potencialidades deste novo combustível. O mercado alvo deste combustível alternativo é essencialmente o automóvel embora mercados que envolvam motores de combustão interna diesel também podem ser afectados. Ao alongar este ponto de vista o biodiesel pode ser útil ainda em indústrias que utilizem geradores industriais diesel, indústria naval, construção civil, têxtil, etc.

Actualmente já existem várias identidades produtoras de biodiesel e até produção particular (caseira) pode ser executada. Porém muitos “mitos” e muitas dúvidas pairam sobre este combustível destacando-se afirmações do tipo que pode danificar o motor, cria perdas de potência, têm poucos cuidados na sua produção, quantidades de produção aquém das necessidades, entre outras.

Dois pontos pertinentes são o facto de que para a produção do mesmo implica maior poluição pois é necessário combustível fóssil para a sua concretização e a necessidade de a utilização de uma extensão imensa de campos agrícolas para que haja matéria-prima suficiente.

Vários estudos estão a ser feitos para contornar estes dois factores e outros mais que condicionam a utilização em pleno desde combustível e só com mais tempo de dedicação e estudo ao mesmo se poderá chegar à implementação em massa do biodiesel nas indústrias mundiais.

2- Revisão Bibliográfica

2.1- Motor a Gasóleo

2.1.1- Características da Combustão

A característica principal do motor de ignição por compressão consiste na inflamação espontânea da mistura, ou auto-inflamação, que pode ser também referida como combustão tipo detonante. Porém, no desenvolvimento normal da combustão destes motores, não se dão as variações de pressão de elevada frequência próprias da combustão tipo detonante (“knock”) do motor a gasolina. Porém o “knock” pode também ocorrer no motor Diesel, se o atraso de inflamação for extenso. Nos motores a gasolina a combustão detonante destrutiva aparece no final da combustão, enquanto que nos motores Diesel este tipo de combustão aparece no seu início, quando a taxa de aumento de pressão é muito elevada.

Durante o tempo de compressão, ar fresco é comprimido, elevando a sua pressão (30-55 bar) e temperatura (700-900°C). Nestas condições é injectado combustível para a câmara de combustão, que se auto-inflama. A injeção continua durante a descida do pistão (tempo de expansão), de maneira a que a pressão se mantenha o mais constante possível.

Uma outra característica bastante importante deste tipo de motores é a não limitação do ar de admissão. Em virtude do tipo de combustão não necessitar duma mistura próxima da estequiométrica, a variação de carga faz-se somente pela injeção de mais ou menos combustível por ciclo. A quantidade de ar aspirado permanece, não havendo problemas de perdas por bombagem em carga parcial, como acontece no motor de ignição comandada. O pedal do acelerador está somente ligado à bomba de injeção e não à borboleta (válvula limitadora do ar), que geralmente não existe. Como consequência da combustão com mistura pobre, o quociente real entre os dois calores específicos () é superior ao do motor a gasolina, durante o processo de expansão, originando uma conversão de energia superior à daquele motor, para uma dada taxa de expansão (que no motor Diesel também é maior). [Martins, 2006]

2.1.2- Preparação da mistura

Nas misturas heterogéneas (caso do motor Diesel), a riqueza varia entre muito elevada ($\lambda=\infty$) no centro do “spray” de combustível e muito baixa ($\lambda=0$) longe do “spray”, no seio do ar puro. A preparação da mistura faz-se pulverizando intensamente o combustível e injectando-o com grande velocidade no seio do ar, preferencialmente dotado de elevada turbulência e alta temperatura. Procura-se fazer afectar o combustível a toda a massa de ar. Idealmente, o “spray” de combustível deveria misturar-se com a globalidade da massa de ar, o que implicaria haver gotas com diferente penetração e dirigidas para as diferentes zonas da câmara. Tais requisitos não são possíveis de preencher globalmente, sendo a combustão penalizada. Assim, não é possível utilizar a globalidade do ar, sendo a combustão realizada

sempre em excesso de ar. Uma outra particularidade deste tipo de combustão é a inexistência de variação (dispersão) cíclica, específica do motor a gasolina. Mesmo em cargas reduzidas (misturas excessivamente pobres), não há o problema da não combustão, pois todo o combustível injectado pode ser queimado. Na verdade, quanto mais pobre for a mistura (menor injeção de combustível), mais fácil se torna a sua total combustão. Tal acontece porque a energia para a inflamação é fornecida por transferência de calor entre o ar e o combustível e não a partir de uma fonte exterior de energia. A expansão da frente de chama é restringida pela existência (difusão) de oxigénio junto do combustível.

O maior problema na combustão no motor Diesel é conseguir-se suficiente mistura entre o “spray” de combustível e o ar, pois a taxa de mistura controla a taxa de combustão. Motores com cilindros muito largos (um motor de navio pode ter cilindros de diâmetro muito superior a um metro) rodam com velocidades muito lentas, pois o combustível tem de “viajar” desde o injector até aos cantos mais remotos da câmara de combustão à “procura” de ar. Este tipo de motores requer grandes penetrações do combustível, tendo a injeção de se realizar a pressões muito elevadas. [Martins, 2006]

2.1.3- Tipo de Combustão

Como já foi referido, a injeção de combustível num motor Diesel inicia-se antes do PMS e prossegue durante parte da descida do pistão. No início da injeção, como a temperatura e pressão do ar são superiores ao ponto de inflamação, dá-se a auto-ignição das porções de combustível que já estão misturados com o ar, após um certo atraso. Como consequência, a pressão e temperatura do cilindro elevam-se ainda mais, reduzindo o atraso da inflamação da restante massa de combustível já injectada, que arde mais rapidamente. A injeção prossegue até que a quantidade necessária de combustível tenha sido fornecida. Os processos de mistura do combustível com o ar e sua combustão continuam durante a expansão, até todo o combustível ter sido consumido.

Como a injeção começa imediatamente antes da combustão não há restrições quanto ao “Knock” e consequentemente a taxa de compressão não está limitada por ele. Desta maneira, os seus valores são bastante superiores aos dos motores a gasolina, sendo o seu rendimento aumentado. [Martins, 2006]

2.1.4- Fases da Combustão nos Motores a Gasóleo

A combustão nos motores de ignição por compressão desenrola-se durante várias fases, mercê do seu tipo de preparação de mistura e inflamação. Pode-se dividir em quatro fases, a primeira referente ao início da combustão, denominada atraso da inflamação, seguida por dois tipos de combustão, a explosiva e a progressiva. Após o término da injeção existe ainda combustão das últimas porções de combustível, no que se denomina combustão por difusão.

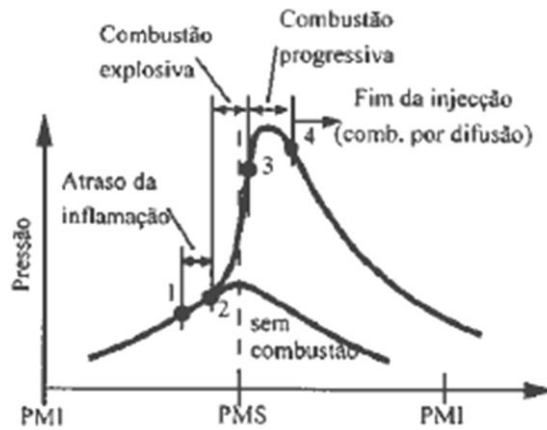


Figura 1: Combustão no motor a Gasóleo [Martins, 2006]

Atraso da inflamação - Quando se injecta o combustível, é necessário esperar que ele se evapore, misture como ar circundante e reaja. Todo este processo leva um certo tempo a decorrer e por esta razão se denomina atraso. Somente depois deste lapso de tempo é que se iniciará a verdadeira combustão da mistura. Este atraso (medido em graus da cambota, ou em tempo, que pode ir desde 0,0002 a 0,002 segundos) decompõe-se em atraso físico (transferência de calor, vaporização das gotas e mistura) e atraso químico (reações químicas de oxidação lenta). O atraso da inflamação é bastante superior ao dos motores a gasolina, pois nestes a mistura já está preparada na altura da faísca eléctrica (ignição).

O atraso físico é dependente da atomização do “spray” e da taxa de aquecimento e de vaporização das gotas, parâmetros que variam com a velocidade de injeção e com o diâmetro das gotas. As dimensões das gotas são dependentes da sua velocidade, pelo que injeções de elevada velocidade diminuem este atraso, pois reduzem o tamanho das gotas e melhoram as características de transferência de calor e massa. O atraso químico prende-se com a velocidade de reacção (quantidade de combustível consumido m na unidade de tempo t) e com o índice de cetano do combustível.

Uma correlação geralmente empregue para determinar o atraso da inflamação em motores, dá o atraso (θ) como função da temperatura absoluta e da pressão na altura da injeção [Chalen, Baranescu, 1999]:

$$\theta = (0.36 + 0.22v) \exp \left[E \left(\frac{1}{R \cdot T \cdot \epsilon^{\gamma-1}} - \frac{1}{17190} \right) + \left(\frac{21.2}{p \cdot \epsilon^{\gamma-1} - 12.4} \right)^{0.63} \right]$$

com

θ	Ângulos de cambota
p	Pressão em bar
T	Temperatura em K
v	Velocidade média do pistão (m/s)
R	Constante universal dos gases perfeitos (J/kmol.K)
E	Energia de activação aparente = $618.84/(IC+25)$

IC	Índice de cetano (-)
ε	Taxa de compressão (-)
γ	Expoente da politrónica para a compressão (-)

Os valores de T e p podem ser calculados a partir duma compressão politrónica de expoente 1.3 para o caso de motores quentes e de 1.2 para motores frios.

Se o atraso de inflamação for elevado, quando a combustão se iniciar, ela será violenta, pois já existirá muita massa de combustível que arderá simultaneamente. Essa combustão será muito dura, com elevada taxa de aumento de pressão (Fig. 2) e como consequência o motor entrará em vibração e tornar-se-á ruidoso, podendo-se dizer que está em “Knock”.

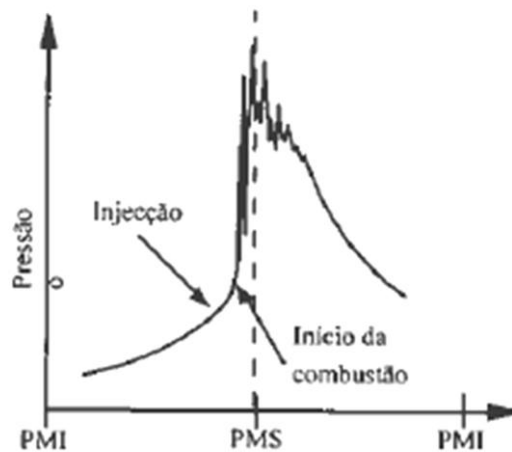


Figura 2: O “Knock” do motor Diesel [Martins, 2006]

“Knock” é um tipo de combustão que pode aparecer nos motores de ignição comandada (gasolina). Este tipo de combustão é uma forma de auto-ignição de uma parte da mistura, na qual as condições de temperatura são superiores às da ignição espontânea do combustível, e caracteriza-se por velocidades de propagação de chama excessivamente elevadas (superior à velocidade do som) e por um ruído metálico, vulgarmente conhecido por “grilar”.

Combustão explosiva (cinética) – A combustão inicia-se no ponto 2 da Fig. 1, e propaga-se rapidamente a toda a câmara. A pressão e temperatura sobem muito rapidamente, proporcionando a dureza da combustão deste tipo de motores. Nesta fase não é fácil controlar a combustão, pois o seu controlo é cinético. O controlo deve incidir sobre os parâmetros iniciais, ou seja, a taxa de aumento de pressão pode ser controlada através da lei da variação do caudal a injectar antes desta fase, do avanço à injeção e do tipo de injector e pressão de injeção. A forma da câmara de combustão tem também um efeito muito importante, como à frente se verá. As propriedades do combustível são também decisivas nesta fase, mas,

obviamente, não é possível modificá-las. Esta fase é também importante na produção de gases poluentes, pois é nela que se atingem as maiores temperaturas do ciclo, influenciando a produção dos NO_x e também das partículas. Os sistemas electrónicos de injeção Diesel actuam principalmente nesta fase, pois ela é a decisiva no respeitante a emissão de poluentes e funcionamento a frio. A lei de variação do caudal de combustível injectado é totalmente diferente com o motor frio ou com ele quente.

Combustão progressiva (difusiva) – A combustão prossegue a partir da “explosão” inicial, à medida que o combustível é injectado no seio do ar muito quente, pelo que o atraso de inflamação é muito pequeno. O controlo nesta fase é difusivo. É necessário que o combustível se espalhe por toda a câmara, ou que o ar (altamente turbulento) passe pelo “spray” de combustível.

No primeiro caso, específico dos motores de injeção directa, é necessário haver injeção em diferentes direcções e com gotas de tamanho diferenciado. Desta maneira, elas terão energia cinética diferente (mesma velocidade de injeção mas massa diferente), originando penetrações diferentes. As gotas maiores não perderão facilmente a sua velocidade e continuarão o seu trajecto durante mais tempo, pois possuem mais massa para vaporizar e arder. Deve-se projectar o sistema de injeção para que as gotas maiores acabem o seu trajecto perto das paredes do cilindro ou do pistão. As gotas de menores dimensões consumirão o ar perto do injector.

Nos motores de câmara auxiliar (os antigos, de injeção indirecta) a turbulência do ar é muito elevada, sendo este obrigado a passar a elevada velocidade em frente ao injector, que não necessitará de ter as características de atomização do anterior. A pressão de injeção poderá, assim, ser reduzida, pois a turbulência encarregar-se-á da preparação da mistura.

Os motores de câmara auxiliar (ou de turbulência) têm, geralmente, esta fase de combustão mais rápida, podendo rodar a maior velocidade. O ar tem mais facilidade em se misturar com o combustível, pois a sua velocidade e turbulência são muito elevadas. Os motores de injeção directa (sem câmara auxiliar) são de combustão mais lenta. Nos últimos anos, tem-se verificado um melhoramento significativo deste tipo de motores, sendo agora possível rodarem a velocidades elevadas, pois conseguiu-se aumentar a turbulência do ar (por “swirl” e “squish”) e o desempenho do sistema de injeção, que tem pressões muito mais elevadas. Este tipo de câmara apresenta também menores teores de emissão de poluentes e consumos específicos mais baixos (maior rendimento). O maior rendimento é derivado da maior capacidade da câmara, da maior taxa de compressão (nalguns casos) e da combustão mais lenta (aproximadamente ao ciclo teórico). A legislação actual de emissão de poluentes não é compatível com as câmaras de injeção indirecta, pelo que estas desapareceram do mercado.

Esta fase de combustão desenrola-se praticamente a pressão constante, para o que é necessário controlar a taxa de injeção de combustível e a forma, atomização e penetração do “spray”. Uma boa combustão exige que a maior quantidade possível de oxigénio disponível seja posto em contacto com o “spray” antes que o combustível seja arrefecido nas paredes ou sobreaquecido pelos gases da combustão.

Combustão por difusão – Este tipo de combustão aparece após a interrupção da injeção, e é fundamental para a emissão de partículas. É uma fase relativamente longa e a temperatura dos

gases não baixa muito, sendo queimadas as últimas porções de combustível e os resíduos sólidos da combustão anterior. Para que decorra idealmente, é necessário haver na câmara regiões de elevada temperatura e alguma turbulência, para que o ar ainda não usado possa chegar aonde é necessário. Se o rendimento da combustão não for elevado, o calor desenvolvido não é utilizado para a produção de trabalho e a temperatura dos gases elevar-se-á para valores em que se dará a produção de NO_x. Os novos sistemas de injeção electrónica fornecem as “pós injeções”, de modo a que as partículas sejam queimadas nesta fase. [Martins, 2006]

2.1.5- Sistema de Injecção

O sistema de injeção é o principal responsável pelo bom ou mau desempenho do motor Diesel. Tem como principal papel a formação de mistura ar-combustível, o mais homogeneamente possível e fornecer a quantidade requerida para uma certa carga.

O injector forma um “spray” de determinadas características, entre as quais é importante referir a atomização, a penetração, a distância a que se dá o rompimento das gotas e o ângulo do “spray” θ .

Ângulo do “spray” θ calculado através da seguinte equação:

$$\theta = 0.05 \left[\frac{D^2 \cdot \rho_{ar} \cdot (p_{inj} - p_{cc})}{\mu_{ar}} \right]$$

com

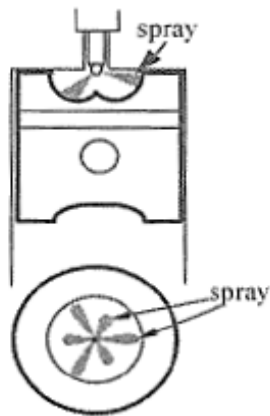
θ	Ângulo do “spray”
D	Diâmetro do orifício de injeção (m)
ρ_{ar}	Massa volúmica do ar (kg/m ³)
μ_{ar}	Viscosidade do ar (Pa·s)
p	Pressão (de injeção – inj e da câmara de combustão – cc)

Os sistemas de injeção podem-se dividir em injeção directa e injeção indirecta ou de câmara auxiliar.

Injecção directa – Estes sistemas utilizam maiores pressões de alimentação e injectores de vários orifícios. Apesar de haver turbulência nas câmaras de injeção directa, a mistura é formada com as boas características do “spray”, ou seja com a optimização da penetração das gotas (Fig. 3). Este tipo de motores trabalha com elevado excesso de ar, por este motivo estes motores são geralmente sobrealimentados a elevada pressão.

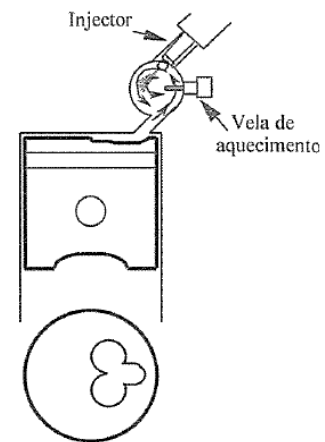
Injecção indirecta – Estes sistemas utilizam menores pressões de alimentação e injectores de orifício único com agulha. Produzem um “spray” mais grosseiro (de maior diâmetro médio), pois a mistura é principalmente realizada pela turbulência do ar na câmara auxiliar (Fig. 4).

Na Fig. 4 mostra-se uma vela de aquecimento que serve para permitir o arranque a frio. A taxa de compressão neste tipo de motores não é suficientemente para permitir que o combustível inicie a sua combustão, pois a atomização do “spray” é grosseira e existe uma grande área de paredes frias. As velas (de incandescência), que não são mais do que resistências eléctricas, usam-se para elevar a temperatura do ar dentro da câmara. Antes do motor ser posto a trabalhar, corrente eléctrica é passada pelas velas até que a temperatura da câmara seja suficiente para permitir uma combustão estável.



O combustível procura o ar

Figura 3: Injecção Directa
[Martins, 2006]



O ar procura o combustível

Figura 4: Injecção Indirecta
[Martins, 2006]

Os dois sistemas apresentados dividem-se em duas soluções diferentes para formação da mistura ar-combustível (Fig. 3 e 4):

O combustível procura o ar (Fig. 3) – o injetor fornece o combustível em várias direcções, a elevada pressão, com boa atomização e penetração ideal relativa à câmara. O ar pode permanecer parado ou ter uma certa turbulência, mas é o combustível que deverá ser lançado de maneira a cobrir a maior parte do volume da câmara. Tem um bom rendimento térmico e bons consumos, mas a combustão é mais dura e o sistema de injeção tem de estar sempre optimamente afinado.

O ar procura o combustível (Fig. 4) – sistema de injeção menos sofisticado, injectando a menor pressão, sem haver muito problema relativamente à atomização e penetração do “spray”. Utilizam-se câmaras de turbulência, nas quais o ar é fortemente acelerado num turbilhão, para o qual o combustível é injectado progressivamente. A taxa de aumento de pressão é relativamente baixa (o que proporciona um funcionamento suave), o sistema de injeção é menos sofisticado e mais barato que o anterior, mas o consumo e o rendimento são mais baixos, sendo a produção de poluentes muito superior. Permite grandes velocidades ao motor. [Martins, 2006]

Actualmente existem três maneiras de injectar o combustível às elevadas pressões necessárias para promover uma combustão relativamente limpa e suave.

Bomba de injeção – (em linha ou rotativa) constituída por vários conjuntos camisa-pistão (de igual número ao dos cilindros do motor), ligada por meio de tubos metálicos. Este sistema é o convencional, e tem sido usado há quase um século com as bombas em linha que mais tarde foram substituídas pelas bombas rotativas. É um sistema barato, e fácil de implementar, com liberdade total de colocação da bomba e dos injectores. Foi igualmente usado nos motores de câmara auxiliar (baixa pressão) e de injeção directa. Os longos tubos de ligação apresentam problemas de controlo da injeção, pois as ondas de pressão que dentro deles evoluem podem alterar o seu funcionamento, pelo que não conseguem chegar às elevadíssimas pressões actualmente (e no futuro) necessárias. Este sistema é incapaz do sofisticado controlo exigido nos motores actuais que usam pré e pós injeções e modulação da injeção principal, mesmo que se possa controlar electronicamente ambos, a bomba e os injectores. Por esta razão tem sido preterido pelos outros sistemas, nomeadamente pelo “common-rail”. O comando da bomba tem de ser efectuado a tempo e requer alguma potência. Geralmente está ligada à cambota por corrente ou correia. [Martins, 2006]

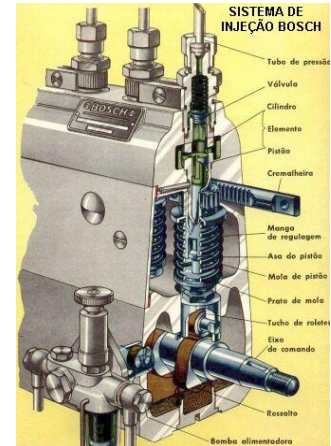


Figura 5: Esquema da bomba de injeção em linha [<http://www.joseclaudio.eng.br/Imagens/image018.jpg>]

Os pistões da bomba de injeção trabalham com pressões relativamente elevadas (500 bar) mas não dispõem de segmentos, pelo que são produzidos com tolerâncias muito apertadas e usam o poder lubrificante do gasóleo para sua lubrificação. A carga é controlada pelo curso útil do êmbolo, que por sua vez é controlado pela sua posição angular (Fig. 6). O curso útil inicia-se no princípio do movimento do pistão e termina quando a espiral escavada no êmbolo deixa escapar o gasóleo para o furo entrada/descarga do cilindro (Fig. 7).

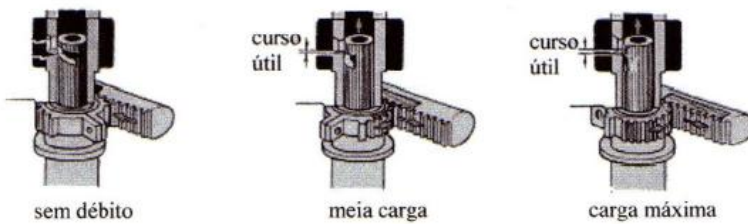


Figura 6: Funcionamento da bomba de injeção em linha [Martins, 2006]

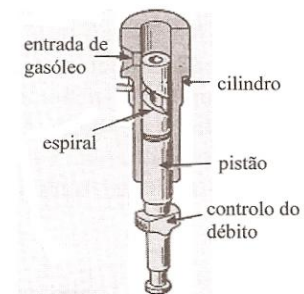


Figura 7: Pistão-camisa da bomba de injeção em linha [Martins, 2006]

O movimento de vaivém do êmbolo é originado a partir de uma árvore de cames (Fig. 5) que roda dentro da bomba injectora e actua cada êmbolo impulsionando um rolete a ele ligado. A bomba de injeção tem ainda controlo de início da injeção, que é aumentado com o aumento da velocidade e com baixas temperaturas do motor. A bomba de injeção roda a metade da velocidade do motor, pois trata-se de um ciclo de 4 tempos, com uma injeção em cada cilindro em cada 2 voltas da cambota. [Martins, 2006]

A bomba de injeção fornece o combustível para o motor, enquanto que o regulador comanda os débitos de injeção (Fig. 8). A bomba injectora é um sistema completamente mecânico (Fig. 5), o que varia é o regulador, que pode ser mecânico ou electrónico. [Silva, 2006]

O regulador electrónico é comandado pela ECU (Electronic Control Unit) e contém os seguintes componentes:

Dispositivo regulador – é formado por electroímã que comanda o movimento da cremalheira reguladora da bomba de injeção.

Sensor de posição – informa à ECU a posição da cremalheira reguladora da bomba de injeção. Isto dá à ECU a possibilidade de comandar o movimento da cremalheira reguladora e determinar, em cada momento, se a corrente eléctrica para o electroímã deve aumentar ou diminuir.

Sensor de rotações – informa à ECU sobre as rotações do motor.

A ECU depois de ler as informações recebidas compara com a programação que possui e envia um sinal de maneira a igualar os valores práticos com os teóricos (ideais). [Silva, 2006]

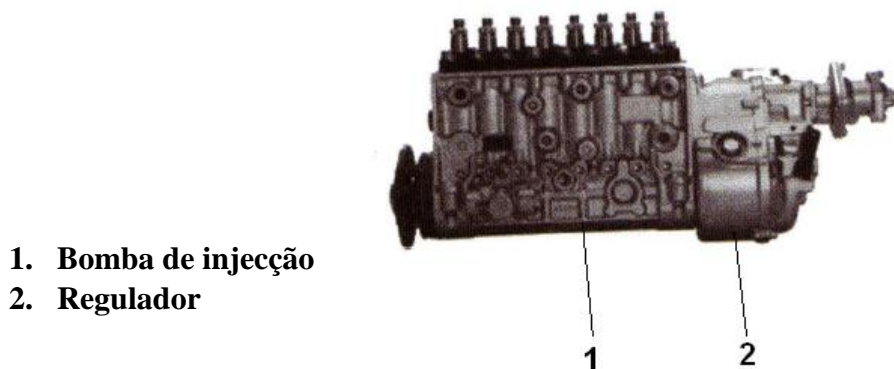


Figura 8: Bomba de injeção em linha [Martins, 2006]

As bombas de injeção em linha não são capazes de grandes velocidades, pelo que, com o desenvolvimento dos motores Diesel rápidos (com pré câmara de combustão), foi necessário usar outro tipo de bombas, as rotativas. Nestas a árvore de cames é substituída por um prato de perfil ondulado (Fig. 10) que roda e vai originar o movimento vaivém do êmbolo.



Figura 9: Bomba de injeção rotativa
[Martins, 2006]

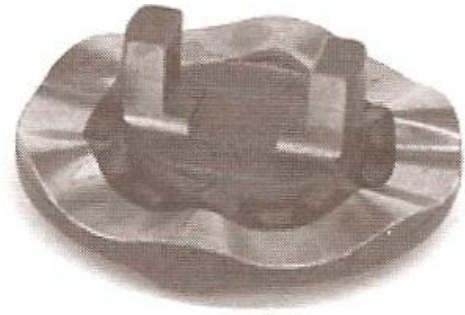


Figura 10: Prato da bomba rotativa (6 cilindros)
[Martins, 2006]

A bomba rotativa (Fig. 9) tem somente um cilindro. No entanto ela possui um distribuidor que liga a cada injector, sequencialmente. A bomba roda a metade da velocidade do motor, injectando em todos os cilindros em cada rotação, pelo que o prato terá de ter tantas “saliências” quantos os cilindros do motor.

Reportando-nos à figura 11, o volume no final do veio (que faz papel de êmbolo e de distribuidor) está repleto de gasóleo. O veio é solidário com o prato, pelo que rodam e se movem em conjunto. Quando o distribuidor está “virado” para uma das saídas (2), o prato avança (a sua saliência assim o obriga), comprimindo o líquido que está na sua extremidade (3), pelo que terá de sair pela janela de distribuição (4) para o tubo que o liga ao injector. O controlo da quantidade a injectar (6) é feito pela abertura de um orifício no êmbolo (5), que condiciona o seu curso útil. [Martins, 2006; "Diesel Fuel Injection" first edition published June 1994. ISBN 1-56091-542-0.]

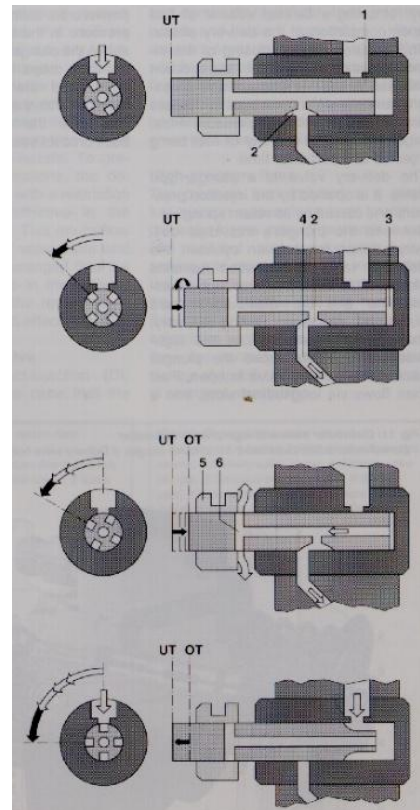


Figura 11: Esquema de funcionamento do veio distribuidor (OT=PMS; UT=PMI)

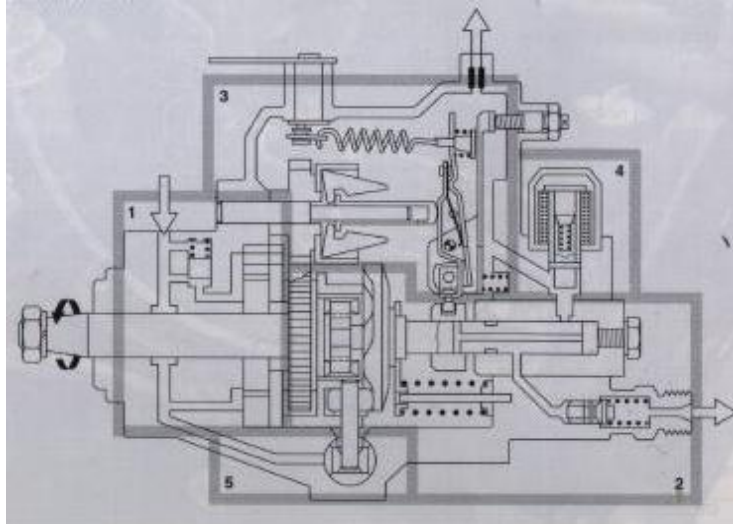


Figura 12: Esquema da bomba de injeção rotativa
["Diesel Fuel Injection" first edition published June 1994. ISBN 1-56091-542-0.]

Legenda da Fig. 12:

1. Bomba de fornecimento de combustível com válvula reguladora de pressão: recebe o combustível e cria pressão dentro da bomba.
2. Bomba de alta pressão com distribuidor: cria pressão de injeção, entrega e distribui combustível.
3. Controlador mecânico: controla a velocidade de bombeamento e varia a entrega de quantidade dentro do seu alcance.
4. Corte de combustível pela válvula electromagnética: interrompe o fornecimento de combustível.
5. Contador: ajustar o início da entrega (fecho da porta) em função da velocidade de bombeamento e em parte em função do carregamento.

Bomba-injector – Este sistema foi desenvolvido para elevar as pressões de injeção muito acima dos 1500 bar em motores de injeção directa não automóvel. O sistema obriga à instalação de cada bomba-injector de modo a ser actuada pela árvore de cames, ou ao uso de balanceiros e hastes entre estes elementos, pois terá de haver uma bomba-injector por cada cilindro e cada terá de ser actuada por um came. Este sistema proporciona as mais elevadas pressões (> 2000 bar) pois o injector e a bomba estão no mesmo corpo. Foi neste sistema que se iniciou o controlo electrónico da injeção, tendo sido possível melhorar o arranque a frio e reduzir drasticamente emissão de fumos. As elevadas pressões que estes sistemas proporcionam melhoram a preparação da mistura (gotas mais finas), reduzindo drasticamente a produção de partículas.

Alguns motores TDI da Volkswagen usaram (e ainda usam) este sistema de modo a obterem elevadas pressões de injeção. [Martins, 2006]

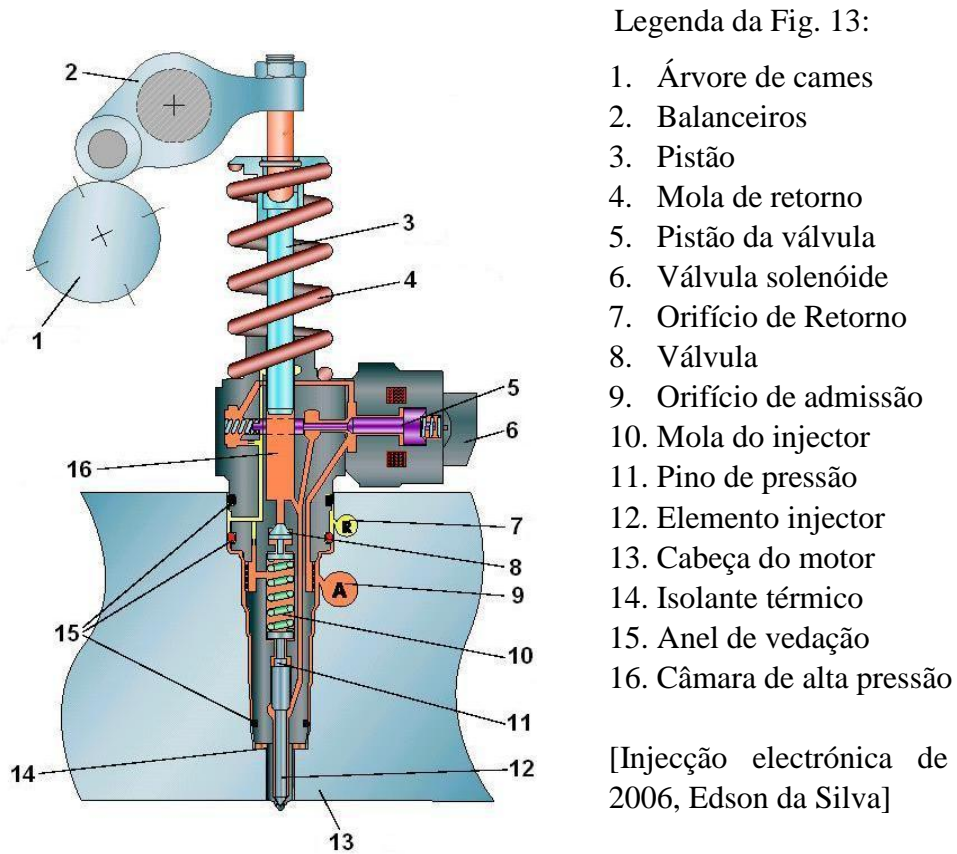


Figura 13: Esquema de um sistema bomba-injector
[<http://jcwinnie.biz/wordpress/imageSnag/pom1.jpg>]

FASES DE FUNCIONAMENTO DO SISTEMAS DE ALTA PRESSÃO:

Fase de abastecimento da bomba de alta pressão

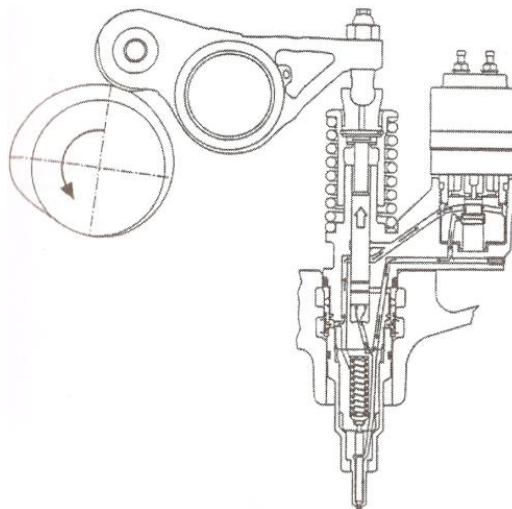


Figura 14: Bomba de alta pressão na fase de abastecimento [Silva, 2006]

Durante a subida do pistão da bomba, a ECU não acciona a válvula solenóide (5). Consequentemente, a válvula estará aberta, permitindo a entrada de combustível no cilindro da bomba (16). A came permite e a mola encarrega-se de retornar o pistão.

Fase de transbordo

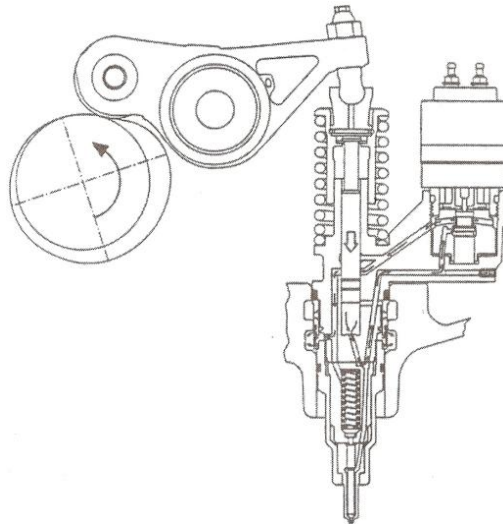


Figura 15: Bomba de alta pressão na fase de transbordo [Silva, 2006]

A came acciona o balancim, que empurra o pistão da bomba para baixo. O combustível retorna para a linha de baixa pressão enquanto o solenóide não fecha a válvula (em regime de carga nula, o solenóide nunca chega a actuar, não havendo injeção de combustível).

Momento de injeção

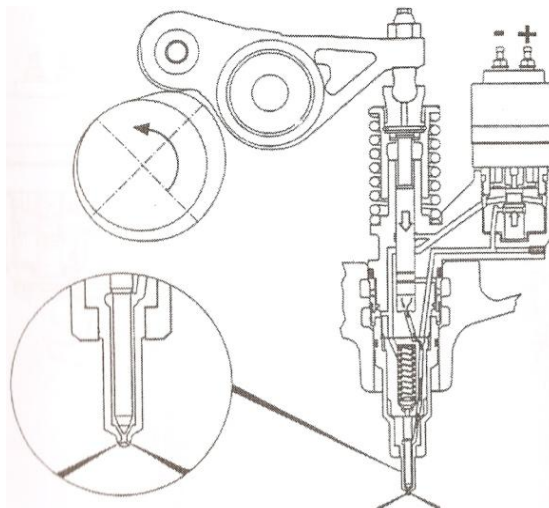


Figura 16: Bomba de alta pressão no momento da injeção [Silva, 2006]

O pistão continua pressionado pela came e o solenóide é alimentado com 9 volts através da ECU do motor, fazendo com que a válvula seja fechada, a pressão dentro do cilindro da

bomba aumente gradualmente e a agulha do injector vença a força da mola, originando a pulverização do combustível dentro da câmara de combustão.

Fim da injeção de combustível

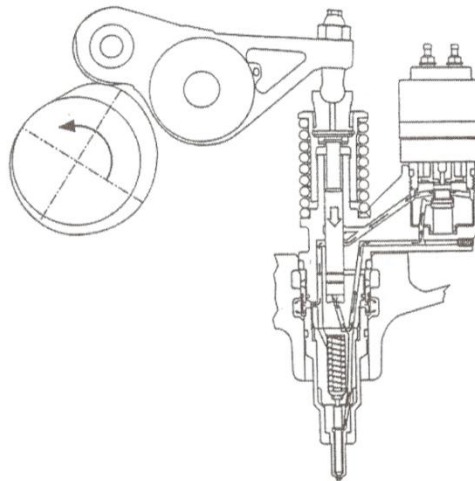


Figura 17: Bomba de alta pressão no fim da injeção de combustível [Silva, 2006]

O fim da injeção ocorre quando a ECU retirar a alimentação eléctrica no solenóide. A ausência do campo magnético vai provocar a abertura da válvula pela acção da sua mola de retorno. Consequentemente, o combustível retorna para o tanque através dos tubos. O pistão, no entanto, continua a descer até completar o seu curso, mas a quantidade de Diesel injectado depende do tempo que o solenóide permanece alimentado electricamente pela ECU do motor.

Common-Rail – sistema composto por uma bomba que eleva a pressão do combustível que é fornecido a todos os injectores por uma tubagem comum (daí a denominação). Assim a pressão é contínua e independente da velocidade do motor.

Cada injetor tem um sofisticado controlo de abertura (Fig. 18) que lhe permite operar uma elevada quantidade de impulsos por ciclo (actualmente fala-se de injeções piloto e várias pré-injeções, injeções principais e pós-injeções em cada ciclo). Cada uma das injeções parcelares da frase anterior pode ter curta duração de décimas de milissegundo (0.0001 s).

Nos injectores controlados electronicamente as agulhas continuam a ser somente mecânicas (funcionamento por diferencial de pressão) e o controlo da injeção é feito por válvulas que abrem/fecham a passagem da agulha (Fig. 18). Para permitir o controlo de injeções ao 0.1 ms alguns construtores usam válvulas piezo-eléctricas com esse potencial, pois permitem o dobro da velocidade de abertura que os sistemas electromagnéticos.

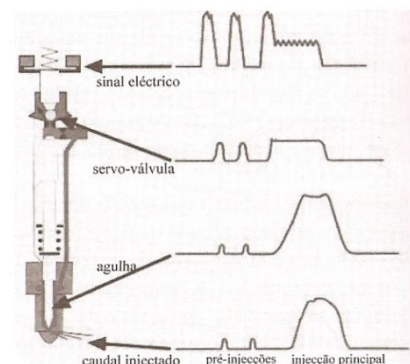
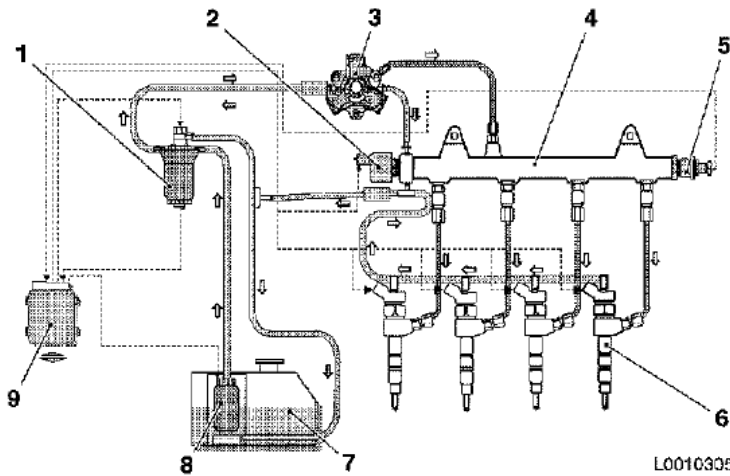


Figura 18: Comando do injetor “Common-rail” [Martins, 2006]

Quadro geral do sistema common rail:



Legenda fig. 19:

1. Filtro de combustível
2. Regulador de pressão
3. Bomba de alta pressão
4. Acumulador de pressão
5. Sensor da pressão
6. Injetor
7. Depósito de combustível
8. Bomba de combustível eléctrica
9. ECU (Electronic control unit)

Figura 19: Sistema common rail geral

Os sistemas common rail de injeção diesel, dos maiores fabricantes mundiais, instalados nas viaturas disponíveis no mercado automóvel (por ordem crescente do número de unidades montadas) são:

- BOSCH;
- DELPHI (antiga designação CAV / LUCAS);
- DENSO (ligado ao construtor TOYOTA);
- SIEMENS.

Sistema common rail do BOSCH - Existem 2 tipos de bombas de alta pressão para veículos comerciais, a CP1 e a CP3. Quanto a aplicações, a CP1 está instalada em motores desde 800 cm³ até 3 000 cm³, e a CP3 em motores desde 1 400 cm³ até 18 270 cm³.

Com o sistema common rail CP1:

- O gasóleo é injectado directamente, na massa de ar admitida adicionada dos vapores do cárter e dos gases de escape, que se encontra comprimida dentro da camisa ou no topo do cilindro;
- A pressão máxima atingida no acumulador de gasóleo é de 1 350 bar;
- Pode haver até três injeções por cilindro e ciclo motor.

O sistema common rail é constituído por duas partes distintas:

- Alimentação do gasóleo à CP1 e aos injectores;
- Controlo e gestão electrónica do sistema.

Na alimentação do gasóleo à CP1 com baixa pressão, estão inseridos:

- Depósito de gasóleo com pré-filtro e bomba eléctrica de abastecimento;
- Filtro de gasóleo com separador de água;
- Tubagem de alimentação e retorno de gasóleo ao depósito.

A bomba eléctrica situada no depósito comprime o gasóleo. Este passa pelo filtro provido de separador de água e entra dentro da CP1, através do furo de estrangulamento da válvula de segurança, para o circuito de lubrificação.

Se a pressão de fornecimento ultrapassa a pressão de abertura da válvula de segurança (0,5...1,5 bar), o gasóleo passa através da válvula de entrada de alta pressão, e, vai preenchendo o crescente volume gerado pelo deslocamento descendente do elemento (curso de aspiração). O movimento descendente do elemento é originado em grande parte pela força da mola (Fig. 21).

Ao iniciar-se a compressão por parte do elemento (curso de fornecimento), a válvula de entrada fecha e o gasóleo com uma pressão superior à que comanda a válvula de saída, passa continuamente através de um tubo para o acumulador, até que seja atingido o ponto morto superior. Passado este ponto, a pressão diminui e a válvula de saída fecha.

O veio de accionamento com a sua came, faz mover os três êmbolos na bomba no sentido ascendente.

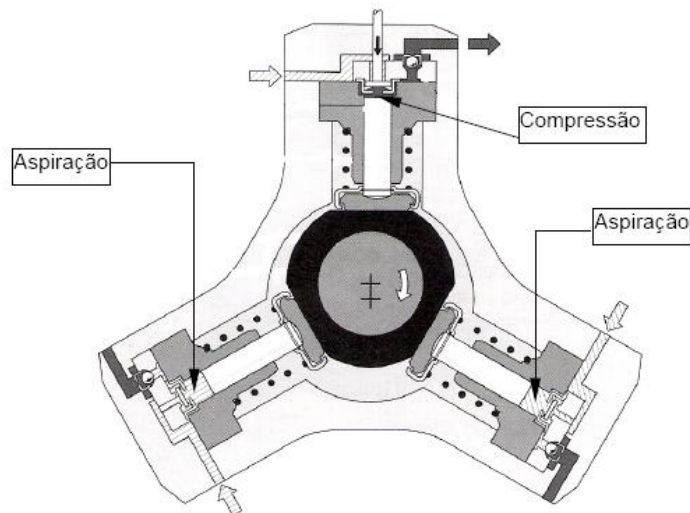


Figura 21: Admissão e compressão do gasóleo [Cairrão, 2004]

Como a bomba de alta pressão está dimensionada para grandes caudais de fornecimento, acontece que ao ralenti ou em carga reduzida, existe um excesso de gasóleo comprimido que é conduzido novamente ao depósito, através da válvula reguladora de pressão. O gasóleo quando chega ao depósito, perde a energia ganha com a compressão e faz aumentar a temperatura do que está lá.

O débito da bomba de alta pressão, é proporcional á sua rotação, e esta depende daquela a que o motor estiver a rodar.

Com a aplicação do sistema de injeção ao motor, é estabelecida uma rotação desmultiplicada, de tal forma que, por um lado não seja elevado o excedente do caudal de gasóleo transportado em baixa carga, e por outro quando a plena carga, as necessidades sejam satisfeitas.

São possíveis relações de 1:2 e 2:3, na transmissão entre o motor e a CP1.

A válvula reguladora de pressão é controlada a partir da ECU, com a finalidade de ajustar ou manter a pressão no acumulador, para qualquer estado de carga do motor. Se a pressão estiver acima do valor necessário para a condição exigida ao motor, a válvula abre e uma parte do gasóleo retorna ao depósito.

Sistema de injeção common rail DELPHI – Este sistema de injeção diesel, difere dos sistemas Bosch (e Siemens) na bomba de alta pressão (estrutura e modo como se dá a elevação da pressão de gasóleo), no acumulador de alta pressão (pode ser longitudinal ou circular) e nos injectores indutivos.

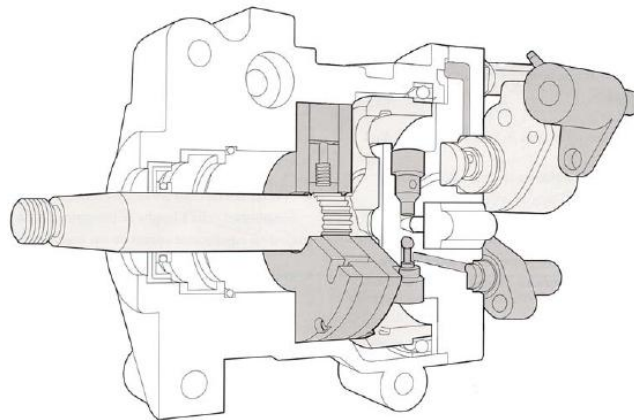


Figura 22: Esquema da bomba de alta pressão DELPHI [Cairrão, 2004]

A bomba de alta pressão (Fig. 22) é rotativa e de êmbolos radiais. Está acoplada à distribuição do motor, e, tem incorporada no próprio veio a bomba rotativa de palhetas, para alimentação de gasóleo a baixa pressão.

É constituída pelos seguintes componentes:

- Válvula de entrada;
- Válvula de saída;
- Anel de excêntricos;
- Roleta e impulsor;
- Câmara de pressurização.

O abastecimento de gasóleo a baixa pressão, dá-se sempre que a pressão de abastecimento ultrapasse a pressão na câmara de pressurização. Neste caso, a válvula de entrada abre, o gasóleo atinge a câmara de pressurização, através do canal de abastecimento, onde está uma válvula solenóide doseadora, afastando os êmbolos contra os excêntricos.

A válvula solenóide actua através do módulo de controlo dos injectores e tem como função, a regulação do diâmetro, do canal de abastecimento. A válvula de saída fecha, porque a pressão a jusante é superior à do canal de abastecimento.

O veio de accionamento que é solidário com o anel de excêntricos, no seu movimento de rotação desloca radialmente os êmbolos (vai - vem). Os êmbolos ao deslocarem-se no sentido

do centro da câmara de pressurização provocam o aumento de pressão. A fase de pressurização, dura até ao momento em que o rolete do impulsor atinge o ponto mais elevado do excêntrico (corresponde ao menor diâmetro interior do excêntrico), e, coincide com fim do curso de abastecimento dos êmbolos da bomba. Nesta fase a válvula de está fechada.

Ultrapassado o ponto máximo do excêntrico, como a pressão no canal de alta pressão é superior à pressão na câmara de pressurização, a válvula de saída fecha-se.

Está assim concluído o período de abastecimento de combustível.

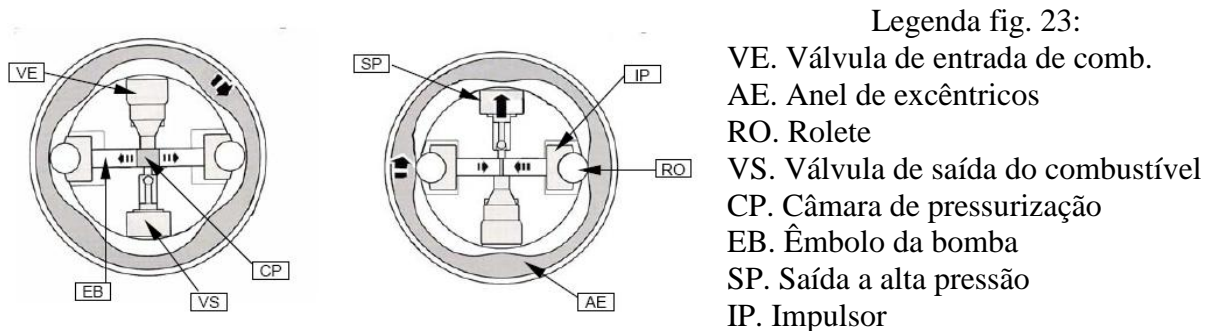


Figura 23: a) Admissão do combustível b) Compressão do combustível [Cairrão, 2004]

Com esta bomba atinge-se a pressão máxima de 1.400 bar, no regime de motor entre as 2.300 e as 4.900 rpm. Abaixo de 2.300 rpm, a pressão é reduzida devido ao controlo da válvula doseadora de gasóleo. Acima de 4.900 rpm, a pressão cai bruscamente.

Neste sistema, a linha de alimentação de gasóleo a alta pressão, está configurada de modo a ter um comprimento mínimo e a conter um volume de gasóleo adequado, para minimizar as flutuações de pressão e assegurar um arranque rápido. A elevação da pressão do combustível deve ser conseguida no mais curto intervalo de tempo.

Sistema de injeção common rail DENSO – Este sistema de injeção diesel, é idêntico ao Delphi. A maior diferença está no modo como é feita a elevação de pressão do gasóleo, dentro da bomba de alta pressão.

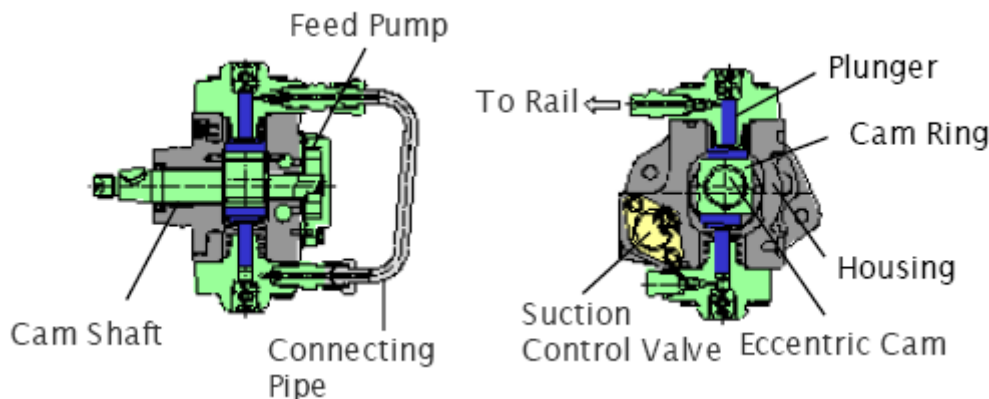


Figura 24: Esquema da bomba de alta pressão DENSO

A bomba de alta pressão Denso (Fig. 24) é estruturalmente semelhante à Delphi (Fig. 22). A alimentação a baixa pressão e o controlo de caudal de gasóleo é o mesmo, assim como a forma de atingir a alta pressão.

Há um sensor montado no corpo da própria bomba, para medir a temperatura do combustível. É um importante elemento de controlo no sistema.

A Denso para eliminar uma das causas que originam avarias graves adoptou um duplo sistema de elevação de pressão. Este sistema, tem dois conjuntos de roletes e êmbolos desfasados 90° (na posição tandem) e sujeitos ao mesmo anel de excêntricos.

O facto da elevação de pressão ser feita em simultâneo pelos dois conjuntos, (o gasóleo é equitativamente comprimido), reduz a pressão que é exercida pelos roletes no anel de excêntricos. O facto de haver uma menor relação entre as secções (onde é comprimido o gasóleo e a de saída) é menor o aumento de temperatura do gasóleo. Este processo da elevação de pressão do gasóleo, reduz o binário de accionamento e possibilita uma maior pressão de injeção (2.000 bar).

Sistema de injeção common rail SIEMENS - Este sistema de injeção diesel apresenta uma acentuada evolução em dois componentes:

- Bomba de alta pressão;
- Injectores (piezoeléctricos).

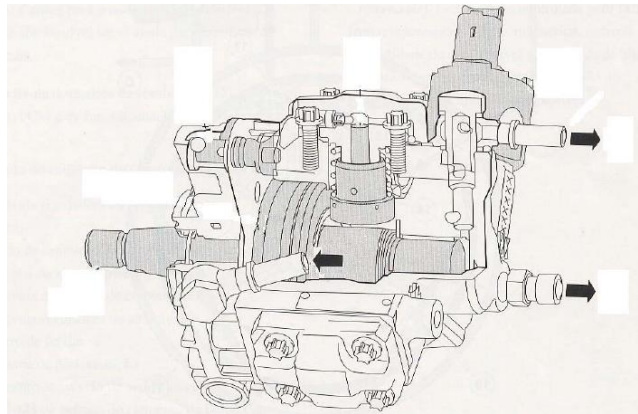


Figura 25: Bomba de alta pressão SIEMENS [Cairrão, 2004]

Esta evolução contribuiu para que o gasóleo não atingisse temperaturas muito elevadas, levando a um aumento da fiabilidade do sistema, a um melhor rendimento do motor, à redução do consumo e da emissão de contaminantes nos gases de escape.

A bomba da alta pressão (Fig. 25) está acoplada à distribuição do motor, e é constituída por:

- Bomba de abastecimento (baixa pressão);
- Bomba de pressurização (alta pressão);
- Válvula doseadora de gasóleo;
- Válvula reguladora de alta pressão.

A bomba de abastecimento, é incorporada no próprio veio de accionamento da bomba de alta pressão, é rotativa de palhetas, aspira o gasóleo do depósito através do filtro (com separador de água), para o encaminhar para a zona de pressurização, onde também exerce o efeito lubrificante. Com a incorporação da própria bomba no interior, aumentou-se a fiabilidade do sistema, porque foi anulada a bomba eléctrica instalada no depósito de gasóleo, utilizada no sistema da 1ª versão common rail da Bosch.

A bomba de alta pressão tem o mesmo funcionamento da CP1, com a diferença de enviar o fluxo de gasóleo para o acumulador, até uma pressão máxima de 1.500 bar. A válvula doseadora de gasóleo é accionada de forma electromagnética pela ECU, para controlo do caudal de gasóleo que é necessário na alta pressão, para que não haja um elevado caudal de retorno com temperatura elevada. O comando é variável, e, depende da intenção do condutor, do requisito de pressão de gasóleo e do regime do motor. A válvula reguladora de alta pressão também é accionada de forma electromagnética pela ECU, de modo a garantir a melhor pressão em cada solicitação e também servir de efeito amortecedor das oscilações de pressão geradas na alimentação de gasóleo.

Também neste caso, o comando é variável e depende da intenção do condutor, do requisito de pressão de gasóleo e do regime do motor. Se avariar, a pressão na linha de gasóleo durante a fase de arranque (pressão nominal mínima requerida, 150 bar) atinge apenas 50 bar, que representa a força da mola que fecha a válvula.

O injector piezoeléctrico, liga até quatro vezes mais rapidamente que os injectores de accionamento electromagnético.

No sistema de injeção common rail, o efeito piezoeléctrico, apresenta as seguintes vantagens:

- A pressão máxima de injeção pode chegar a 1.500 bar;
- O tempo de comutação é extremamente reduzido (0,2 milésimos de segundo no máximo), permitindo intervalos curtos e variáveis entre a pré-injeção e a injeção principal;
- Dosagem precisa da quantidade de gasóleo (na injeção piloto a quantidade mínima é de cerca 1 mm³);
- O controlo da corrente de excitação é feito de uma forma mais simples, devido uma elevada compatibilidade electromagnética, o que aumenta a fiabilidade.

O efeito piezoeléctrico pode ser utilizado por efeito directo ou indirecto.

O efeito directo é utilizado nos sensores. As cerâmicas piezoeléctricas, devido à sua rigidez quando ficam sob pressão, convertem a força que é exercida sobre elas (energia mecânica), num sinal eléctrico. O sistema common rail utiliza esta propriedade para enviar a condição de estado que se verifica para a ECU, a partir do sensor.

O efeito indirecto é utilizado nos actuadores. As cerâmicas piezoeléctricas, ao deformarem-se por acção de um campo eléctrico, convertem a energia eléctrica em energia mecânica. O corpo piezoeléctrico, ao ser impedido de se deformar, origina uma tensão elástica que tem associada uma força. Esta propriedade é utilizada no sistema common rail para enviar, a partir da ECU, uma ordem de execução de trabalho.

O sistema common rail da Siemens é utilizado no motor (com a cilindrada de 1.400 cm³) desenvolvido em conjunto pela FORD e o grupo PSA.

Injectores para os sistemas common rail – Estes sistemas são constituídos por agulha e o bico injector com os orifícios, servo-sistema hidráulico e electroválvula.

O seu funcionamento, é determinado em quatro estados de serviço, com o motor em qualquer regime e a bomba de alta pressão a funcionar:

- Injector fechado (estado de repouso) e alta pressão;
- Abertura do injector e início da injeção;
- Injector totalmente aberto;
- Fecho do injector, fim da injeção.

Estes estados de serviço são determinados pela distribuição das forças (hidráulica e da mola) nos componentes. Quando o motor está parado, não existe pressão no acumulador e é a mola do injector, que o fecha.

A figura representa a vista em corte de um injector indutivo e o pormenor do mecanismo que permite a injeção.

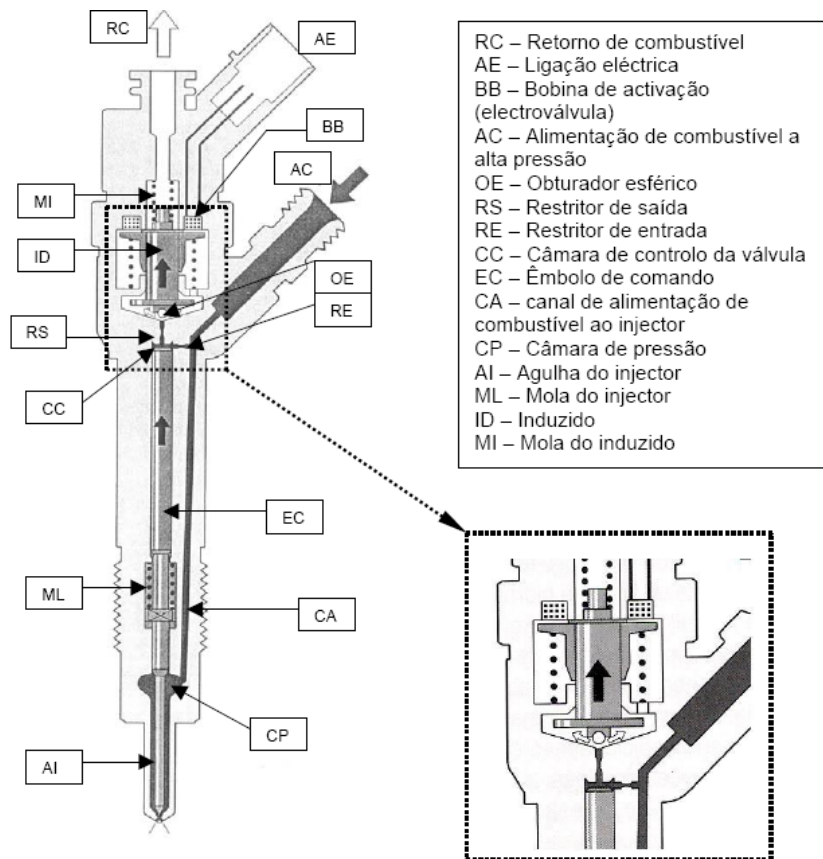


Figura 26: Vista em corte do injector indutivo [Cairrão, 2004]

Com o injector fechado (estado de repouso) e a alta pressão – a electroválvula (BB), como não está activada pela corrente de excitação, a esfera do induzido (OE) é pressionada pela mola da válvula (ML), contra a sede do restritor de saída (RS) e fecha a saída de gasóleo para o retorno. Na câmara de controlo (CC) existe a alta pressão do acumulador, assim como na câmara de pressão do injector (CP). A força devida à pressão do gasóleo, sobre a superfície

frontal do êmbolo de comando (EC) adicionada da força da mola do injector (ML), mantém fechada a agulha do injector (AI).

Abertura do injector e início da injeção – o injector encontra-se fechado. A electroválvula ao ser activada pela corrente de excitação, provoca o deslocamento rápido do induzido (ID) com a esfera (OE) a acompanhar o movimento, devido à pressão de gasóleo que passou através do restritor de saída (RS). O gasóleo ao sair da câmara de controlo da válvula (CC) retorna ao depósito.

Num tempo mínimo, a corrente de excitação mais elevada, reduz-se a uma corrente mais baixa de retenção do electroímã. Isto é possível, porque é menor a reacção do circuito magnético. O restritor de entrada (RE), impede uma compensação rápida e completa do volume da câmara de controlo da válvula (CC), o que conduz a que aqui a pressão seja menor que a pressão na câmara de pressão do injector, que é igual à pressão do acumulador. Ao baixar a pressão na câmara de controlo da válvula (CC), diminui a força que actua sobre o êmbolo de comando (EC), dando origem ao levantamento da agulha do injector (AI), inicia-se a injeção.

Com o injector totalmente aberto, a velocidade de abertura da agulha do injector, fica determinada pela diferença de fluxo de gasóleo entre o restritores de entrada (RE) e de saída (RS), traduzindo também o volume de gasóleo injectado. O êmbolo de comando (EC) alcança o topo superior e permanece ali. O volume de gasóleo residual tem um efeito amortecedor.

O gasóleo é injectado na câmara de combustão, com uma pressão aproximadamente igual à pressão do acumulador. A distribuição de forças, é similar à existente durante a fase de abertura.

O fecho do injector (final da injeção), acontece quando deixa de ser excitada a electroválvula. O induzido é pressionado pela força da mola do induzido (ID) e a esfera (OE) fecha a passagem de gasóleo pelo restritor de saída (RS). Esta condição leva a que através do restritor de entrada, a pressão na câmara de controlo (CC) seja igual à do acumulador. A velocidade de fecho da agulha do injector (AI), é determinada pelo fluxo de gasóleo através do estrangulamento de entrada. A injeção termina quando a agulha atinge de novo o topo inferior.

O desenvolvimento da injeção é o mesmo para qualquer função que esta tenha que desempenhar. A injeção é de extrema importância para o cumprimento da legislação ambiental e para a redução do consumo de combustível.

No primeiro sistema common rail, eram feitas até três injeções por ciclo motor, e cumpria-se a EURO III. Com a entrada em vigor do EURO IV, surgiu a versão Multijet, em que podem ser feitas até cinco injeções por ciclo motor.

No primeiro sistema temos:

- Pré-injeção;
- Injeção principal;
- Injeção posterior.

Na versão multijet há:

- Injecção piloto;
- Pré-injecção;
- Injecção principal;
- Injecção posterior;
- Injecção retardada.

A sequência das injeções é a mesma para as duas versões, e, todas são feitas em dois tempos motor. As injeções até à principal e com esta incluída, são feitas no tempo motor compressão. As restantes são feitas no tempo expansão.

Só são feitas as injeções que são necessárias, uma vez que estas são função da necessidade do motor e do controlo sobre as emissões dos gases de escape.

Assim, temos:

- A injeção piloto, que é feita na fase de aquecimento do motor, de modo a facilitar o seu arranque e diminuir o ruído;

- A pré-injecção caracteriza-se pela injeção de uma pequena quantidade de gasóleo no cilindro fazendo com que a pressão de compressão aumente ligeiramente por uma reacção prévia e uma combustão parcial, reduzindo-se o atraso da inflamação da injeção principal. O aumento da pressão da combustão e os picos de pressão da combustão reduzem-se (combustão suave).

- A injeção principal é a que determina a energia para o trabalho a realizar pelo motor. Este trabalho é o responsável pelo desenvolvimento do binário motor. A injeção principal deve ser modulada de modo a minimizar a produção de NO_x . Esta injeção deve terminar abruptamente, o que minimiza a produção de partículas.

A pós-injecção serve para reactivar a combustão pelo aumento de temperatura dos gases, queimando as partículas que de outro modo sairiam pelo escape. O gasóleo não queimado vaporiza-se com os gases de escape e são reaproveitados (através da EGR) para o colector de admissão, actuando como uma injeção prévia muito avançada.

- A injeção retardada pulveriza os gases de escape com um caudal de gasóleo bem doseado, evaporando-se no calor residual dos gases de escape e é utilizada como meio redutor do óxido de azoto nos catalisadores de NO_x . [Cairão, 2004]

Agulhas usadas em injectores - Consoante as aplicações, usam-se dois tipos de agulha, a de bico saliente usada em motores de câmara auxiliar (injecção indirecta) e a de bico cónico usada em motores de injeção directa (Fig. 26).

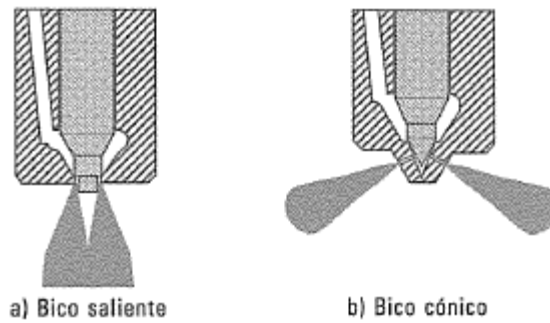


Figura 27: Bicos das agulhas dos injectores (a – injeção indirecta; b – injeção directa) [Martins, 2006]

A pulverização conseguida com os injectores com agulhas de bico cónico é muito superior à dos injectores de bico saliente, necessitando também de pressões muito mais elevadas para funcionarem eficazmente. Este tipo de injektor produz vários jactos (“sprays”) radialmente, pois deve injectar o combustível para toda a câmara de combustão. Por outro lado, os injectores de bico saliente injectam um só “spray” com menor pulverização, pois são usados em câmaras auxiliares, em que a preparação da mistura se faz pela elevada rotacionalidade do ar nessa câmara. [Martins, 2006]

2.1.6- Atomização

Quanto maior for a pressão de injeção, de menor diâmetro serão as gotas do “spray” (Fig. 37). Dados relativos a gasóleo podem ser correlacionados da seguinte forma:

$$d = A(p_{inj} - p_{cc})^{-0.135} \cdot \rho_{ar}^{0.121} \cdot V_f^{0.131}$$

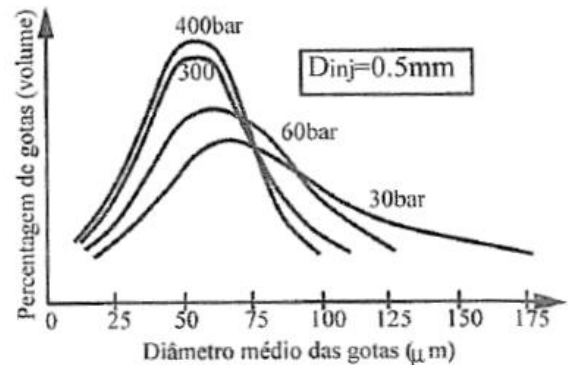


Figura 28: Distribuição de gotas de “sprays” a diferentes pressões [Martins, 2006]

com

d	Diâmetro médio (divisão entre volume de líquido e a sua área superficial) (m)
V_f	Volume de combustível (m ³ /inj.)
A	Constante do orifício igual a: 2.33·10 ⁻³ (inj. de orifícios) 2.45·10 ⁻³ (inj. de bico saliente)
ρ_{ar}	Massa volúmica do ar (kg/m ³)
p	Pressão (de injeção – inj e da câmara de combustão – cc)

A pressão do líquido não é a única variável da qual o diâmetro das gotas depende. O diâmetro do orifício influencia, embora pouco significativamente, a atomização do “spray”, mas um diâmetro reduzido homogeneiza as dimensões das partículas (ficando todas as gotas com dimensões semelhantes).

A melhor atomização dos sistemas de injeção directa é proporcionada por pressões de injeção elevadas e a distribuição pela totalidade da câmara consegue-se usando vários orifícios com diferentes orientações.

As condições óptimas de pulverização são as de dimensões médias mínimas para as gotas e do máximo de massa em gotas de menor diâmetro. Assim se conseguirá reduzir o atraso da inflamação (melhorando o arranque a frio) e melhorar a formação da mistura ar-combustível. [Martins, 2006]

2.1.7- Penetração do “spray”

A penetração das gotas de combustível no ar da câmara de combustão depende da sua velocidade e massa originais e das características do ar (massa volúmica). Quanto maior for a velocidade e maior for a gota, mais longe acabará o seu trajecto, pois terá maior energia cinética e maior massa para evaporar. A penetração do “spray” (s) pode ser calculada através da seguinte equação função do tempo (t): [Chalen, 1999]

$$s = 0.39 \sqrt{2 \cdot \frac{P_{inj} - P_{cc}}{\rho_f} \cdot t} \quad \text{para } 0 < t < t_{romp}$$

$$s = 2.95 \cdot \left(\frac{P_{inj} - P_{cc}}{\rho_{ar}} \right)^{0.25} \cdot \sqrt{Dt} \quad \text{para } t > t_{romp}$$

$$t_{romp} = 28.65 \cdot \frac{\rho_f \cdot D}{\sqrt{\rho_{ar} \cdot (P_{inj} - P_{cc})}}$$

com

s	Penetração do “spray” (m)
t_{romp}	Tempo de rompimento das gotas (s)
ρ	Massa volúmica (combustível – f, ar – ar) (kg/m ³)
p	Pressão (de injeção – inj e da câmara de combustão – cc)

A pressão de injeção poderá estar compreendida entre 300 e 2000 bar. O aumento da pressão de injeção ou a diminuição da massa específica são variáveis que permitem aumentar a velocidade, que geralmente é da ordem de 100 a 250 m/s.

Para melhorar a penetração, é fundamental ter-se em atenção o diâmetro do orifício, pois diâmetros reduzidos não originam gotas de grande dimensão. Como estas são as que proporcionam maior penetração, não se devem usar diâmetros de orifícios muito pequenos quando se pretendem elevadas penetrações (caso de cilindros de grande diâmetro). [Martins, 2006]

2.1.8- Avanço da injeção

A injeção é sempre feita com avanço 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. Em condições normais (motor quente com velocidade média ou baixa) o avanço mínimo (do início da injeção) é de 10 ou 15° antes de PMS. Se o avanço é maior (injeção antes desse ponto) a pressão e temperatura reinantes serão baixas, o que aumentará o atraso da inflamação. Se o avanço for menor, a pressão e temperatura serão marginalmente maiores, mas, como se passará o PMS, baixarão, aumentando também o atraso de inflamação.

Nos motores mais recentes o início da injeção é controlado pela ECU (Electronic Control Unit). O avanço é calculado a partir de inúmeras variáveis, nos quais se destacam a carga do motor, posição do acelerador, rotação do motor, temperatura e pressão do ar de admissão. O avanço da primeira pré-injeção nos sistemas electrónicos podem ser substancialmente maior que os 15°. [Martins, 2006; Silva, 2006; Chalen, 1999]

2.1.9- Carga ou quantidade de massa injectada

À medida que se aumenta a quantidade de combustível injectado por ciclo (aumentando a carga) o atraso de inflamação é reduzido, criando combustões com maior gradiente de pressão. Com o aumento da carga a temperatura dos gases residuais e das paredes da câmara vão aumentar e assim os gases frescos serão comprimidos a maior temperatura, reduzindo o atraso. Se o cálculo for efectuado retirando estes efeitos, nota-se que não há modificação do atraso da inflamação relativamente ao aumento de carga. [Martins, 2006]

2.1.10- Turbulência

O grau de turbulência é um aspecto decisivo no atraso da inflamação do combustível, pois é possível reduzir o atraso físico pela melhoria das condições de transferência de calor e massa entre o ar e as gotas. No entanto, para produzir turbulência é necessário incorrer-se em perdas de carga (pressão). A turbulência pode ser produzida nas condutas de admissão ou na câmara de combustão, aquando da subida do pistão. No primeiro caso (Fig. 29-c) as condutas têm um andamento curvo (em hélice) e o ar entra no cilindro em rotação. No segundo caso existe uma

câmara (Fig. 29-a) ou uma cavidade no pistão (Fig. 29-b) para onde o ar é forçado durante a compressão. Durante a redução do volume do cilindro o ar é introduzido nesse espaço, produzindo um turbilhão de elevada intensidade. O efeito da turbulência é principalmente notado em condições de arranque a baixa temperatura, pois a turbulência aumenta a taxa de vaporização e de transferência de calor. [Martins, 2006]

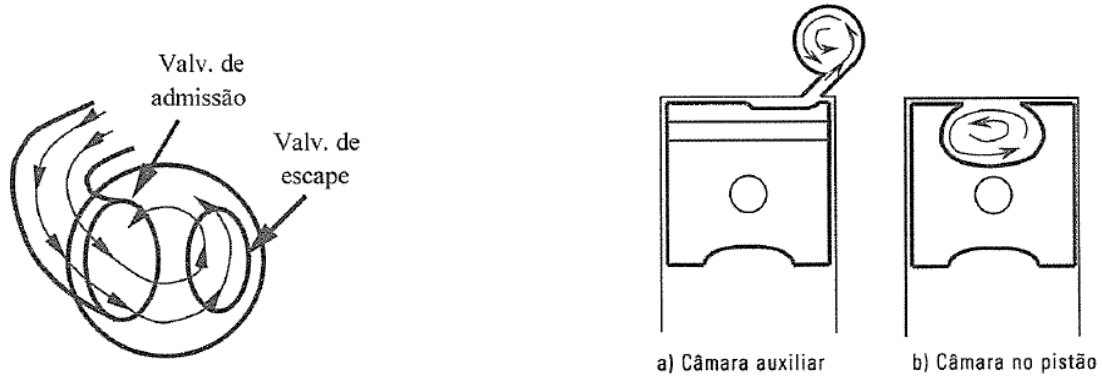


Figura 29-b: Criação de turbulência pelo uso de colectores de admissão curvos [Martis, 2006]

Figura 29-a: Câmaras para promover turbulência [Martins, 2006]

2.1.11- Taxa de compressão

O aumento da taxa de compressão implica uma maior pressão e temperatura na altura da injeção. Em virtude dessa maior temperatura e pressão o atraso da inflamação é reduzido, pois o aquecimento e vaporização das gotas é mais intenso e a temperatura no início é mais elevada. Tal origina taxas de aumento de pressão muito elevadas que criam ciclos pouco suaves e ruidosos (além de produzirem muito NO_x), pelo que a taxa de compressão dos motores actuais raramente ultrapassa os 22:1, sendo bastante inferior no caso de serem sobrealimentados (geralmente 19:1). [Martins, 2006]

2.1.12- Sobrealimentação

O Binário, a Potência e a pressão média são proporcionais à massa de ar que entra em cada ciclo no motor. Para aumentar estes valores num dado motor pode-se induzir uma maior quantidade de ar a entrar, aumentando a sua pressão. A sobrealimentação é um sistema usado para aumentar a pressão de alimentação.

O uso da sobrealimentação foi (e é) o principal segredo para o desenvolvimento dos motores diesel, tanto a nível da electrónica como a nível dos sistemas de injeção. Actualmente não existe nenhum automóvel comercial que não seja turbinado. Os mais recentes sistemas de injeção (common rail, etc.) que foram falados anteriormente foram desenvolvidos e só fazem sentido para motores sobrealimentados.

A sobrealimentação eleva a pressão e temperatura de admissão, pelo que deverá reduzir o atraso de inflamação. O uso de intercoolers vai reduzir a temperatura mas as condições na altura da injeção do combustível são ainda de modo a proporcionar uma combustão muito dura. Por essa razão, neste tipo de motores deve-se diminuir a taxa de injeção, de maneira a reduzir a pressão máxima e a taxa de aumento de pressão. Por vezes será necessário reduzir a taxa de compressão. [Martins, 2006]

Como se observa na figura 30, os gases de escape fazem girar a turbina. A turbina é ligada por um eixo ao compressor, produzindo trabalho necessário para pressurizar o ar para as câmaras de combustão. [Marques, Ramos, 2008]

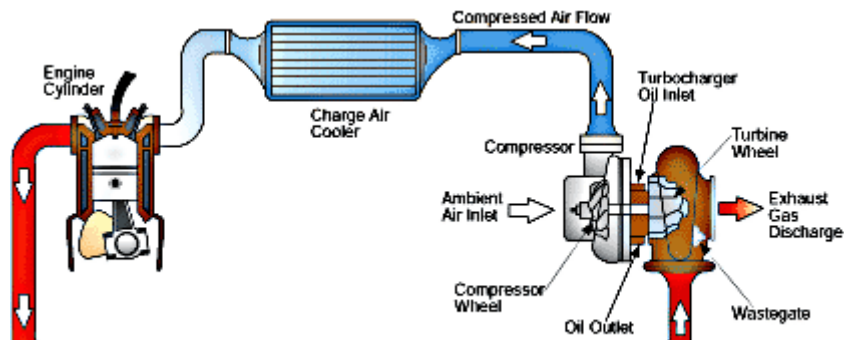


Figura 30: Esquema do motor sobrealimentado (com turbocompressor) com intercooler [Marques, Ramos, 2008]

A saída de gases dos cilindros percorre as pás da turbina, fazendo-a girar. A velocidade das pás do compressor (admissão de ar) aumenta com o aumento da velocidade das lâminas da turbina (velocidade dos gases de escape). Normalmente nos motores a gasóleo sobrealimentados a pressão (relativa) de admissão máxima varia entre 0,8 a 2 bar, consoante a potencia do motor e a resistência mecânica do turbocompressor (já a pressão (relativa) de admissão máxima em motores turbinados a gasolina varia entre 0,3 a 1 bar). [Marques, Ramos, 2008]

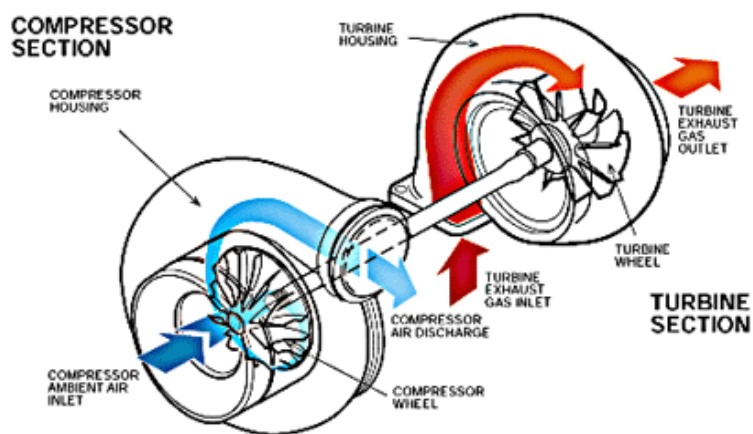


Figura 31: Princípio de funcionamento de um turbocompressor [Marques, Ramos, 2008]

2.1.13- EGR (recirculação dos gases de escape)

Como já foi dito anteriormente, a EGR serve para reduzir a temperatura máxima de chama e com ela a produção de NO_x . Como o motor Diesel não tem a admissão de ar limitada, poderia parecer que encher o cilindro com ar ou com gases de escape deveria ter o mesmo efeito relativamente à temperatura máxima de chama. Tal é verdade, mas quando se usa EGR haverá menos oxigénio disponível para a produção de NO_x . O arrefecimento da EGR logicamente irá resultar em ciclos de menor temperatura e consequentemente de menor produção de NO_x . Um dos problemas desta técnica é que pode elevar os níveis de partículas e fumos. [Martins, 2006]

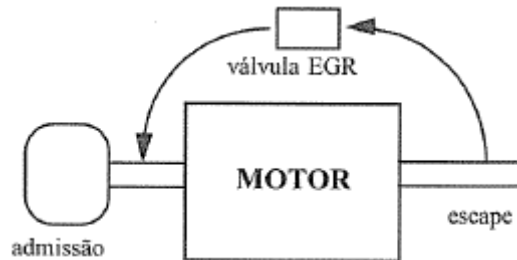


Figura 32: Esquema da EGR
[Martins, 2006]

2.2- Combustíveis

2.2.1- Emissões gasosas

Quando uma combustão se dá a temperatura elevada ($>1500\text{k}$) nem todo o combustível se converte em CO_2 e H_2O , pois a essas temperaturas dá-se uma reacção inversa, de dissociação destes compostos em CO , H_2 , O_2 e NO_x . Esta reacção de dissociação existe porque o equilíbrio químico altera-se com a temperatura.

A grande parte das emissões de CO (90%) tem como providência os escapes dos veículos, sendo o restante produzido por fogos e outras combustões.

Já no caso dos NO_x os transportes são responsáveis por cerca de metade de toda a produção, sendo a produção de electricidade responsável por quase 20% e a produção industrial por outro tanto.

Dos HC (ou VOC – volatile organic compounds) a contribuição dos transportes é de cerca de 35%, 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.

No respeitante às partículas materiais (PM_{10} , ou seja, de dimensões inferiores a $10\ \mu\text{m}$) a principal fonte é a produção de electricidade (30%) seguida pelos transportes, processos produtivos, combustão industrial e pequenas combustões, cada com cerca de 15%. [Martins, 2006]

Actualmente, as emissões de NO_x , HC, CO e fuligem estão regulamentadas 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. [Moreira, 2008]

As emissões normalizadas para veículos ligeiros de passageiros com motorização Diesel estão representadas pela seguinte tabela:

Tabela 1: Limites de emissão de poluentes para automóveis na União europeia
 [Martins, 2006; <http://europa.eu/scadplus/leg/pt/lvb/l28186.htm>]

Norma	Directiva	Data	CO	HC	NOx	HC+NOx	PM
Euro I	91/441/CEE	1992	2,72	-	-	0,97	0,19
Euro II	94/12/CE	1997	1,00	-	-	0,70	0,08
Euro III	98/69/CE	2000	0,64	-	0,50	0,56	0,05
Euro IV	98/69/CE	2005	0,50	-	0,25	0,30	0,025
Euro V	(CE) 715/2007	2009	0,50	-	0,18	0,23	0,005
Euro VI	(CE) 715/2007	2014	0,50		0,08	0,17	0,005

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. Voltou-se a introduzir limites para os HC e NO_x. [Martins, 2006]

Neste momento ainda não existem limites impostos pela União Europeia para a emissão de CO₂, 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 CO₂ de 140 g/km até ao final de 2008 com uma redução até às 120 g/km nos próximos cinco anos. Esta emissão de CO₂ 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. [Moreira, 2008]

A emissão dos vários poluentes varia gradualmente com a riqueza da mistura (Fig. 33). Para misturas pobres há pequena formação de CO, sendo esta aumentada com o enriquecimento da mistura. No respeitante aos HC, não varia com a riqueza da mistura. O nível de produção de NO_x diminui para misturas pobres e ricas, sendo o máximo de emissão coincidente com misturas estequiométricas ou levemente pobres. Quanto mais pobre for a mistura, menor quantidade de poluentes emitirá o motor (Fig. 33). Se a temperatura do motor for mais baixa, o espectro de emissão de poluentes muda, havendo uma menor produção de NO_x (temperatura mais baixa) e muito maior produção de HC.

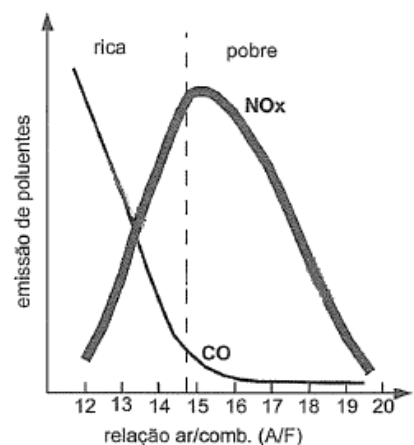


Figura 33: Produção de poluentes função da riqueza da mistura [Ramos, 2009]

De seguida vai ser apresentado o mecanismo de formação de poluentes anteriormente falados.

CO₂ – O dióxido de carbono (CO₂) existe livre na atmosfera e é um produto da combustão. Idealmente o fenómeno de combustão deveria produzir apenas dióxido de carbono e água

(H₂O). A proporção relativa destes dois 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.

Apesar de ser 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). [Challen, 1999; Moreira, 2008]

CO – O monóxido de carbono (CO) é tóxico. É um produto intermédio na combustão de combustíveis à base de hidrocarbonetos, desta forma a sua emissão resulta de uma combustão incompleta. Desta forma 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.

Visto que os motores Diesel operam com misturas pobres, as emissões de CO estão normalmente abaixo dos valores limite legislados, não sendo motivo de atenção especial.

Todo o CO emitido por um motor Diesel provém de mistura incompleta: a combustão toma lugar em condições locais ricas. Um catalisador de oxidação colocado na linha de escape poderá baixar os níveis de emissão de CO e hidrocarbonetos não queimados. Este processo é melhorado com o excesso de ar nos gases de escape. [Challen, 1999; Moreira, 2008]

HC – A emissão de hidrocarbonetos não queimados (HC) consiste em combustível que não foi queimado ou apenas queimado parcialmente durante a combustão. 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 homogénea, 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.

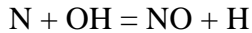
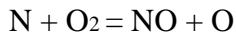
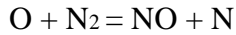
A segunda maior fonte de emissões de HC nos motores Diesel é a mistura deficiente injectada perto do final da combustão. À medida que a injeção de combustível ocorre, a sua taxa de mistura com o ar depende do movimento relativo dos dois. Após o final da injeção podem ocorrer injeções secundárias, ou o combustível residual na ponta do injector pode entrar na câmara de combustão. Em qualquer uma das duas hipóteses acima o combustível entra a baixa velocidade para a câmara de combustão (que está em arrefecimento rápido). Este combustível não se mistura eficientemente com o ar e algum dele deixa o cilindro sem ser queimado ou apenas queimado parcialmente. Esta fonte de HC pode ser controlada desenhando sistemas de injeção que possuam finais do ciclo rápidos e limpos (à prova de salpicos) bem como criando injectores que não possuam zonas onde criem reservas indesejáveis de combustível (por exemplo num injector tipo VCO a agulha fecha por cima dos furos, eliminando assim em grande parte este problema).

A oxidação catalítica de HC é possível com a ajuda do excesso de oxigénio derivado da combustão do motor Diesel (excesso de ar). No entanto as baixas temperaturas de escape fazem retardar essa conversão.

O desenvolvimento a nível da construção do motor e a melhor qualidade do combustível fazem com que as emissões de HC sejam reduzidas, pois estas derivam da ineficiência da combustão. [Challen, 1999; Moreira, 2008]

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*:

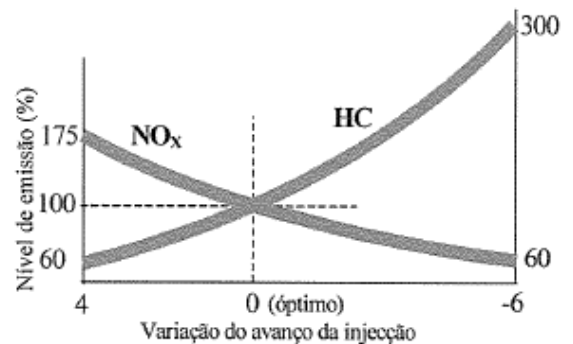


O dióxido de azoto (NO_2) forma-se a partir do NO. A formação de NO depende da quantidade de oxigénio disponível e da temperatura. Combustíveis que queimam antes de ser atingida a pressão máxima no cilindro são problemáticos. Após queimarem a sua pressão é elevada, bem como a sua temperatura. Desta forma 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.

As pré-injeções servem para suavizar o início da combustão, mas também reduzem a produção de NO_x . A injeção principal deve ser modulada de modo a minimizar a temperatura máxima de chama obtida no ciclo e assim minimizar a produção de NO_x .

A variação do avanço da injeção tem consequências ao nível de NO_x e de HC (na Fig. 24 ao ponto óptimo é dado o valor 100). Quanto maior for o avanço maior será a pressão máxima de ciclo, a dureza da combustão e a produção de NO_x , porque se dará uma combustão mais completa. No caso da redução do avanço, os NO_x diminuem, mas os HC aumentam, mostrando uma maior dificuldade na combustão.



[Challen, 1999; Martins, 2006; Moreira, 2008]

Figura 34: Variação de produção de NO_x e HC com a variação do avanço da injeção [Martins, 2006]

Partículas (PM) – As partículas em suspensão são uma das emissões mais preocupantes nos motores diesel. Estas são compostas por fuligem e compostos inorgânicos (sulfatos, água e cinzas).

A fuligem forma-se no cilindro, deriva dos HC's na fase gasosa que condensam em regiões com deficiência de oxigénio. A fuligem forma-se através de reacções de pirólise, estas dão-se em condições de temperatura elevada e de mistura rica (excesso de combustível). Ajustando a relação entre a mistura combustível/ar e o aumento de temperatura é possível interferir na formação de fuligem. Uma mistura mais rápida a temperaturas mais baixas irá inevitavelmente baixar os níveis de fuligem emitidos. Após a sua formação, a fuligem mistura-se com oxigénio e é queimado se a temperatura for suficientemente alta. O pico de

fuligem dentro do cilindro é consideravelmente mais elevado do que a fuligem apresentada nos gases de escape. Cerca de 90% é oxidado dentro do cilindro.

As principais estratégias de redução das fuligens num motor Diesel passam pelo aumento da taxa de mistura ar/combustível requerendo sistemas de injeção mais evoluídos, e pela optimização das câmaras de combustão. [Challen, 1999; Moreira, 2008]

2.2.2- Poder Calorífico

A quantidade de energia química disponível no combustível chama-se poder calorífico e pode ser referido por massa de combustível ou por massa de mistura estequiométrica ar-combustível (Tabela 2).

O poder calorífico é calculado (ou medido) a partir da quantidade de calor extraída durante a combustão, considerando as temperaturas dos reagentes iguais às temperaturas dos produtos da combustão. Como um dos constituintes dos gases de escape é a água, esta poderá aparecer sob a forma de vapor ou no estado líquido. A quantidade de energia referente ao calor latente de vaporização dessa água dá-nos a diferença entre o poder calorífico inferior – PCI (vapor) e superior – PCS (água condensada). A diferença entre estes valores é maior quanto maior percentagem de hidrogénio tiver o combustível, sendo máxima para o hidrogénio e nula para o carbono.

Tabela 2: Propriedades de alguns combustíveis [Martins, 2006]

combustível	fórmula	calor latente		calor específico		poder calorífico		poder calor. inf.	
		vaporização	líquido	vapor	superior	inferior	da mistura esteq	A/F	
		(kJ/kg)	(kJ/kg.K)	(kJ/kg.K)	(MJ/kg)	(MJ/kg)	(MJ/kg)		
gasolina	$C_8H_{1,87n}$	350	2.4	1.7	47.3	44.0	2.83	14.6	
gasóleo	$C_nH_{1,3n}$	270	2.2	1.7	46.1	43.2	2.79	14.5	
fuel	$C_nH_{1,7n}$	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	C_2H_5O	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	

A indicação dos poderes caloríficos dos combustíveis pode ser enganosa, porque o combustível tem que se juntar ao ar para arder. Assim, uma informação importante é o poder calorífico da mistura (Fig. 35). O hidrogénio, embora tenha um poder calorífico muitíssimo maior que o dos outros combustíveis, o poder calorífico da sua mistura é inferior aos restantes.

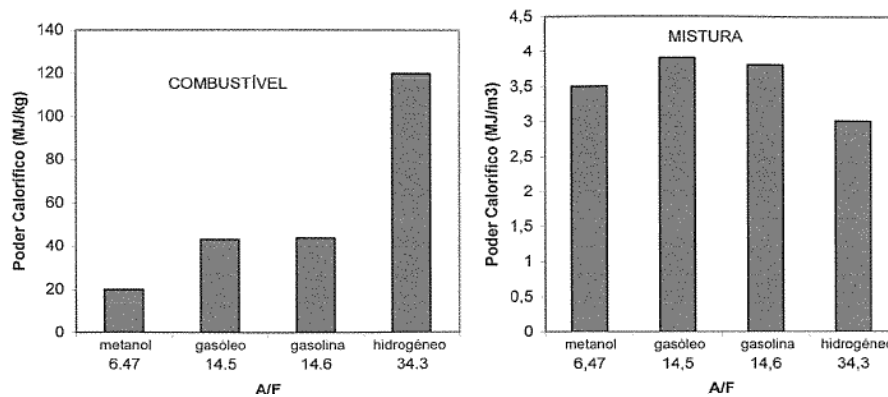


Figura 35: PCI dos combustíveis e da sua mistura estequiométrica [Martins, 2006]

2.2.3- Gasóleo

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. Contrariamente à gasolina, o combustível a usar no motor de ignição por compressão (Diesel) deve ser facilmente auto-inflamável, sendo esta uma das características mais importantes destes combustíveis, que se mede 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. Os valores correntes de índice de cetano para o gasóleo situam-se por volta do valor 50 (54 para o gasóleo aditivado e 56-58 para Biodiesel), sendo desejáveis valores superiores a este, 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 cal/g. O PCI é cerca de 10.280 cal/g. [Martins, 2006]

As Fig. 36 e 37 mostram a relação da produção de CO₂ 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 (Tab. 2). Pode-se afirmar assim que para dois automóveis (Diesel e a gasolina) com potência semelhante, o automóvel Diesel vai produzir menos CO₂ dado que também consome menos gasóleo (visto que o rendimento do motor Diesel é superior ao do motor a gasolina).

	Emissão de CO ₂
Gasolina	100
Gasóleo	102
GPL	87
Gás Natural	75
Hidrogénio	0

(FERGUSON, 2001)

Figura 37: Potencial de produção de CO₂ de alguns combustíveis [Martins, 2006]

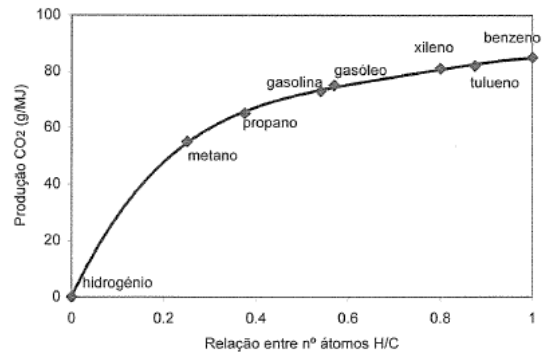


Figura 36: Produção de CO₂ função da relação entre átomos de hidrogénio e carbono [Martins, 2006]

2.2.4- Biodiesel

O Biodiesel é um combustível biodegradável derivado de fontes renováveis. Elaborado a partir de óleos vegetais ou animais, apto como substituto parcial ou total do gasóleo em motores Diesel, sem que sejam necessárias quaisquer alterações ou regulações especiais do motor. O Biodiesel pode ser considerado de 1^a ou 2^a geração, caso seja obtido a partir de óleos ou gorduras virgens ou obtido a partir de óleos usados.

É considerado uma fonte de combustível renovável pois é obtido a partir de plantas ou cereais (ex: flor de girassol, milho, soja, etc) e podem ser replantadas todos os anos.

Para compreender o interesse ecológico do Biodiesel (Biocombustível) em relação ao gasóleo (combustível de origem fóssil), convém situar-nos sob o ponto de vista da abordagem global, que permite fazer o balanço completo das emissões de CO₂, desde a produção do combustível até ao seu consumo pelo veículo. No caso do gasóleo, o CO₂ é emitido durante as várias fases de produção (extracção e refinação do petróleo), de transporte e de utilização do veículo. Como Biodiesel provém da biomassa, o CO₂ emitido por um veículo movido a Biodiesel é o CO₂ absorvido pelas plantas (fenómeno da fotossíntese) utilizadas na sua produção. O CO₂ absorvido por uma planta durante o seu crescimento pode assim ser subtraído ao total das emissões. [Incalculável, 2008]

A Agência de Protecção Ambiental (EPA/EE.UU.) tem-no registado para utilização como combustível puro (100% de Biodiesel, o B100), como mistura (com 20% de Biodiesel e o resto gasóleo, B20), ou como aditivo de combustíveis derivados do petróleo em proporções de 1 a 5% (B1 a B5).

As metas indicativas nacionais para a colocação no mercado de biocombustíveis e outros combustíveis renováveis, no domínio dos transportes, são definidas pelo Governo. Na Resolução do Conselho de Ministros nº119/2004 de 31 de Julho que aprovou o Programa Nacional para as Alterações Climáticas (PNAC-2004) foi publicado como meta para 2010, o

valor de 5,75%. No entanto, o Governo definiu recentemente para 2010 uma meta mais ambiciosa, 10%, para a penetração dos biocombustíveis no sector dos transportes.

Em Portugal durante o ano de 2006 entraram em funcionamento cinco unidades industriais (duas grandes e três pequenas) de produção de Biodiesel com capacidade de produção total de cerca de 200.000 ton/ano. Estima-se que no final de 2007 a capacidade instalada seja de 350.000 ton/ano. [Direcção geral de Energia e Geologia, 2007; Moreira, 2008].

2.2.4.1- Produção

Produção (Fundamentação teórica) – Biodiesel (Ester metílico) é o nome atribuído a todos os combustíveis produzidos pelo processo de transesterificação de óleos, gorduras e ácidos gordos.

Óleos que contêm triglicerídios são compostos de três ésteres ligados a uma molécula de glicerina (Fig. 38).

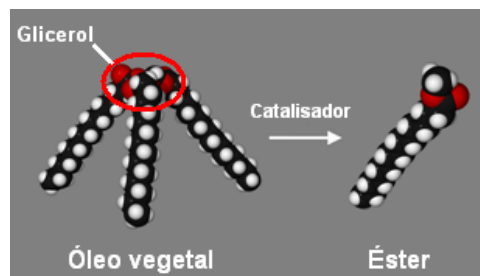
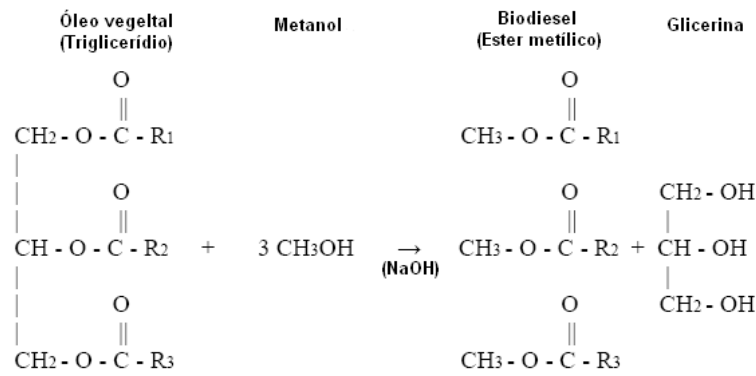


Figura 38: Esquema da reacção de transesterificação [Ramos, 2009]

A reacção de transesterificação, neste caso, irá consistir em separar os ésteres da glicerina. Isto explica por que ao se produzir Biodiesel sempre ocorre a produção de glicerina.

A quebra das ligações entre os átomos é feita com o auxílio de um catalisador, NaOH ou KOH. Os ésteres livres rapidamente se combinam com as moléculas do álcool (metanol ou etanol) formando Biodiesel + glicerina.



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

Figura 39: Reacção de transesterificação [Ramos, 2009]

Produção (Aspectos técnicos) – A produção de Biodiesel depende da matéria-prima que vai ser usada. Se for óleo usado, tem que se passar pelo processo de filtragem, decantação e titulação. No caso de se usar óleo novo, pode não ser necessária a titulação.

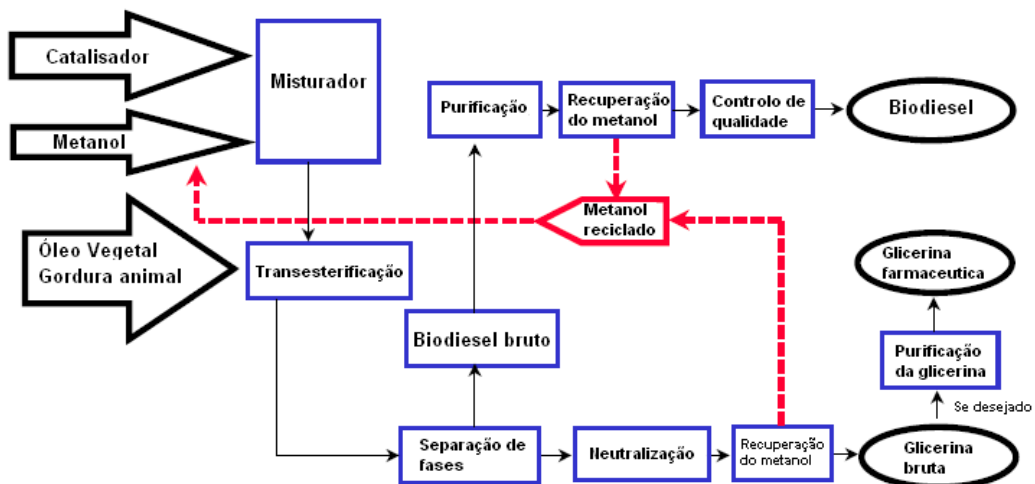


Figura 40: Representação esquemática das fases de produção de Biodiesel [Ramos, 2009]

2.2.4.2- Vantagens Gerais do Biodiesel

Vantagens do Biodiesel:

- Maior ponto de ignição (reduz o perigo de explosões por emanção de gases durante o armazenamento)
- Índice de cetano é em média de 55

- Maior lubrificidade (favorece o funcionamento do circuito de alimentação e da bomba de injeção)

Vantagens Técnicas (uso):

- Não são necessárias modificações nos motores diesel convencionais para o seu uso, obtendo-se similares rendimentos.
- A sua utilização substituta não requer modificações na infra-estrutura de distribuição e venda de combustíveis líquidos instalada.

Vantagens Técnicas (ambientais):

- Alta biodegradabilidade, comparável à da dextrose
- Não contém enxofre, logo permite o uso de catalisadores para melhorar a combustão e minimização de gases de escape.

Vantagens socioeconómicas:

- Viabiliza o auto abastecimento de combustível ao produtor agro-pecuário (em termos de micro economia)
- Confere alguma independência aos países agro produtores do abastecimento de combustíveis fósseis por parte dos países produtores de petróleo.
- Os projectos de produção em qualquer escala constituem uma fonte potencial de novos postos de trabalho

2.2.4.3- Desvantagens Gerais do Biodiesel

Factos económicos:

- Alta dependência do custo das matérias-primas
- Geração de um sub produto (glicerina) cuja purificação técnica só é viável para grandes produções

Aspectos técnicos:

- Problemas de fluidez a baixas temperaturas (inferiores a 0°C)
- Escassa estabilidade oxidativa (vida útil / período máximo de armazenamento inferior a seis meses)

Aspectos técnicos: poder solvente

- Incompatível com uma série de plásticos e derivados naturais (eventual substituição de alguns componentes do motor: mangueiras, juntas, solos, diafragmas, partes de filtros e similares)
- 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. [Incalculavel, 2008]

2.2.4.4- Causas da falha do equipamento de injeção derivado ao uso de Biodiesel

Os sistemas de injeção mais recentes são os mais atingidos devido à alta pressão que eles permitem e à elevada viscosidade do Biodiesel. Estes sistemas são:

- Unidades injectoras
- Sistemas common rail (injectores)
- Bombas de alta pressão

As causas da falha do equipamento de injeção com a utilização do Biodiesel são:

1. Envelhecimento do combustível
2. Impurezas relativas à produção
3. Parâmetros físico-químicos
4. Abastecimento alternado de Biodiesel e gasóleo

Os exemplos mostrados a seguir são decorrentes do uso de B100.

1. O envelhecimento do Biodiesel é a causa mais importante para falhas do equipamento de injeção. Estas causas podem ser divididas em:

1.1 Formação de depósitos por precipitação de produtos por envelhecimento

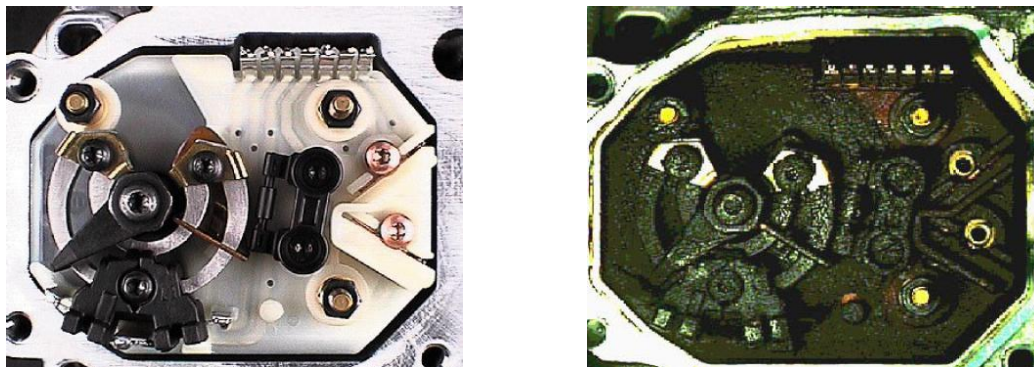


Figura 41: a – Bomba rotativa de alta pressão; b – Bomba rotativa após o uso de B100 de baixa qualidade (fora dos parâmetros regulamentados) [Leandro H. Benvenuti – Ford Motor Company – Combustíveis e Lubrificantes]

1.2 Corrosão do aço por ácido fórmico

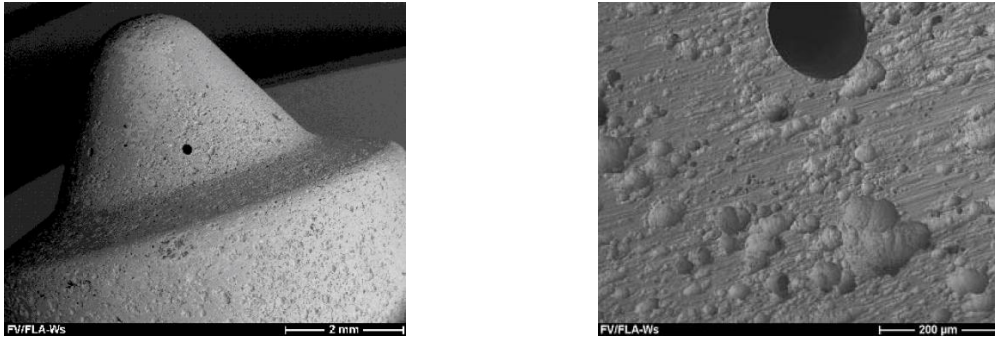


Figura 42: a e b – Durabilidade de um corpo de injector ao fim de 97.000 km (fortes marcas de corrosão) [Leandro H. Benvenuti – Ford Motor Company – Combustíveis e Lubrificantes]

1.3 Formação de sabão (subproduto)



Figura 43: a e b – Veio de accionamento de bomba rotativa de alta pressão com desgaste [Leandro H. Benvenuti – Ford Motor Company – Combustíveis e Lubrificantes]

Na figura 43 observa-se um veio de accionamento de uma bomba rotativa com desgaste. Segundo a Ford Motor Company, a análise dos depósitos revelou sais de ácidos de envelhecimento com iões metálicos resultantes da corrosão e desgaste.

2. Impurezas relativas à produção

2.1 Iões alcalinos e alcalinos terrosos

São responsáveis pela formação de sabão na presença de ácidos gordos livres. Como consequência, a formação de depósitos no filtro de combustível do veículo (impedindo a circulação), alterando propriedades a nível da injeção

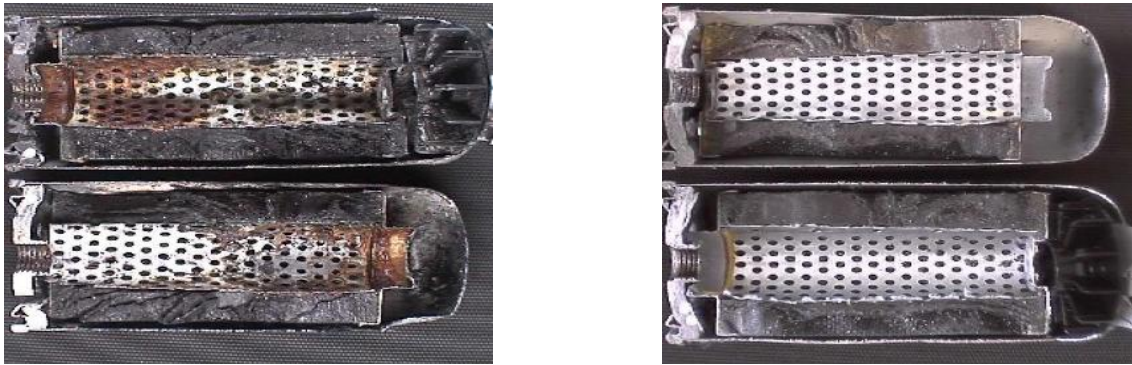


Figura 44: a – (esquerda) Biodiesel má qualidade; b – (direita) Biodiesel boa qualidade
[Leandro H. Benvenuti – Ford Motor Company – Combustíveis e Lubrificantes]

2.2 Formação intensiva de sabão no dispositivo de regulação duma bomba rotativa de alta pressão



Figura 45: Formação de sabão

[Leandro H. Benvenuti – Ford Motor Company – Combustíveis e Lubrificantes]

2.3 Glicerina



a



c



**Figura 46: a-b) coqueamento do bico causado por Biodiesel;
c-d) coqueamento do bico causado pelo gasóleo**
[Leandro H. Benvenuti – Ford Motor Company – Combustíveis e Lubrificantes]

Foi provado que glicerídios e carbonato de sódio (Na_2CO_3) estão presentes nos depósitos de coqueamento pelo Biodiesel. Na_2CO_3 é formado por iões de sódio e CO_2 da câmara de combustão

2.3 Água no Biodiesel



Figura 47: a – (esquerda) veio de accionamento; b – (direita) Garras do veio de accionamento [Leandro H. Benvenuti – Ford Motor Company – Combustíveis e Lubrificantes]

Forte formação de ferrugem pela presença da água no Biodiesel.

2.4 Metanol

Outra característica da má produção de Biodiesel é a presença do metanol, causando a corrosão do alumínio e estrago (alargamento) de elastómeros (O-rings das bombas de injeção).

3. Parâmetros físico-químicos:

3.1 Viscosidade/compressibilidade

A viscosidade elevada (comparando com o gasóleo) é responsável por uma carga maior nos componentes:

- 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 injetora (desgaste elevado no corpo da bomba)



Figura 48: Corpo da bomba da unidade injetora
[Leandro H. Benvenuti – Ford Motor Company – Combustíveis e Lubrificantes]

4. Abastecimento alternado de gasóleo e Biodiesel 4.1 Precipitação de produtos de envelhecimento

A redução da polaridade do meio pelo abastecimento com gasóleo após o uso de biodiesel pode resultar na precipitação de produtos polares gerados pelo envelhecimento do biodiesel.

4.2 Deslocamento de depósitos

Após a mudança de gasóleo para Biodiesel, depósitos provenientes do gasóleo podem ser deslocados pela maior polaridade do Biodiesel, criando obstruções.

2.2.5.5- O Biodiesel e o futuro

O Biodiesel é uma alternativa real ao gasóleo convencional, o que favorece os fabricantes de automóveis e o desenvolvimento económico, pois muito dinheiro já foi e continua a ser investido no desenvolvimento dos motores Diesel. O que significa que esta tecnologia não desapareça com o fim do petróleo.

Só nos resta saber se é possível obter matéria-prima para a produção de Biodiesel que satisfaça a procura de combustível da indústria e transportes, sem que haja o problema (e a questão moral) de se usar os terrenos apenas para a produção de combustível, deixando de lado os objectivos alimentares.

Este problema está a ser resolvido através do uso de micro-algas como matéria-prima para a produção de Biodiesel.

Nas condições ideais as algas reproduzem-se até 6 vezes cada 24 horas. São os organismos que possuem o crescimento fotossintético mais rápido. Cerca de 50% da alga é transformada em lípidos.

Apenas são precisas criar infra-estruturas necessárias ao desenvolvimento destas micro-algas. Água, algas e nutrientes circulam em tanques rasos (necessidade de manter as algas expostas à luz solar). O CO₂ e a luz solar são ambas muito importantes para o crescimento das algas pelo processo da fotossíntese (Fig. 49). [US Department of Energy's Aquatic Species; Global Green Solutions, 2007]

A biomassa das algas contém três componentes principais:

- Óleo natural
- Hidratos de carbono
- Proteína

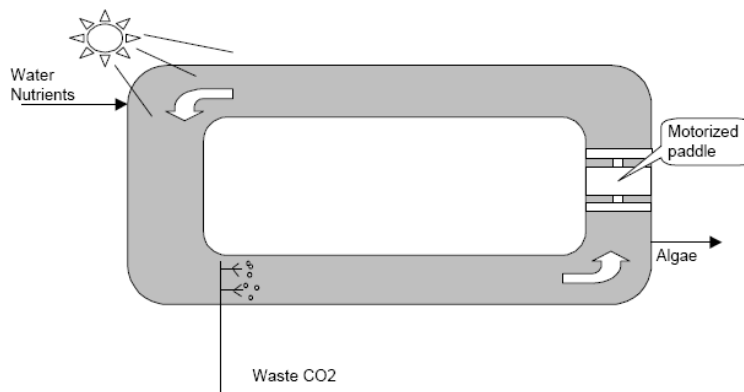


Figura 49: Esquema de reprodução de algas
[US Department of Energy's Aquatic Species]

Não existe o problema do espaço do cultivo (grande área de terrenos), nem a questão moral de produzir cereais para alimentar um automóvel.

São necessárias grandes quantidades de água, no entanto não necessita (nem é) de água potável. Muitas espécies de algas crescem em água salobra (água com grande teor de sal), isto significa que não é necessário usar fontes de água fresca, que é um bem, infelizmente, escasso, necessário para todas as formas de vida no planeta. [US Department of Energy's Aquatic Species]

As micro-algas para que se reproduzam rapidamente precisam de luz solar e de grande quantidade de CO₂. Para isso foram desenvolvidos alguns planos na construção de fábricas, tendo em conta o número de horas de sol, temperatura e zona com grande quantidade de CO₂. Descobriu-se que o ideal era construir esta fábrica perto duma outra que produzisse muito CO₂ (por ex: fabrica de carvão), resolvendo assim dois problemas: rápido desenvolvimento das algas, e consumo de CO₂ através do processo da fotossíntese.

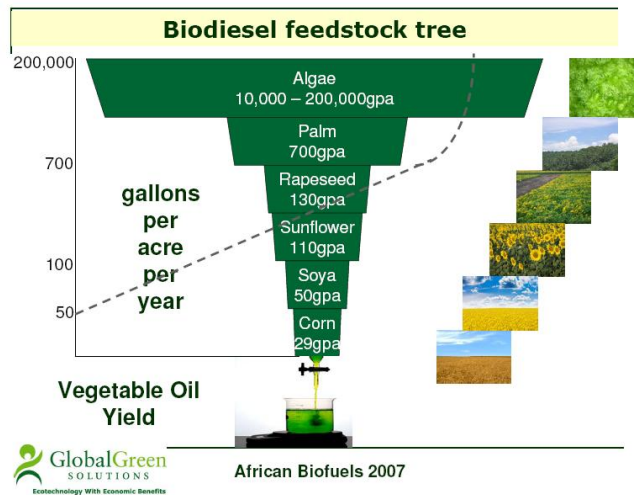


Figura 50: Quantidade de óleo vegetal produzida para matérias-primas diferentes (galões/acre/ano) [Global Green Solutions, 2007]

Dado que 1 acre = 0,4046 hectares e 1 galão = 3,8 litros:

Tabela 3: Quantidade de óleo vegetal produzida para matérias-primas diferentes (Litros/hectare/ano)

	Quantidade anual (litros/hectare)
Micro-Algas	93,4 mil a 1,87 milhões
Palma	6500
Colza	1200
Girassol	1000
Soja	450
Milho	270

Nas condições ideais de produção (exposição solar, quantidade CO₂) consegue-se produzir quase 2 milhões de litros por ano utilizando um espaço equivalente a um campo de futebol, devido à possibilidade de compactação neste tipo de processo (Fig. 51).

Com o desenvolvimento da produção do Biodiesel a seguir este caminho pode-se afirmar que o Biodiesel é um combustível para o futuro.

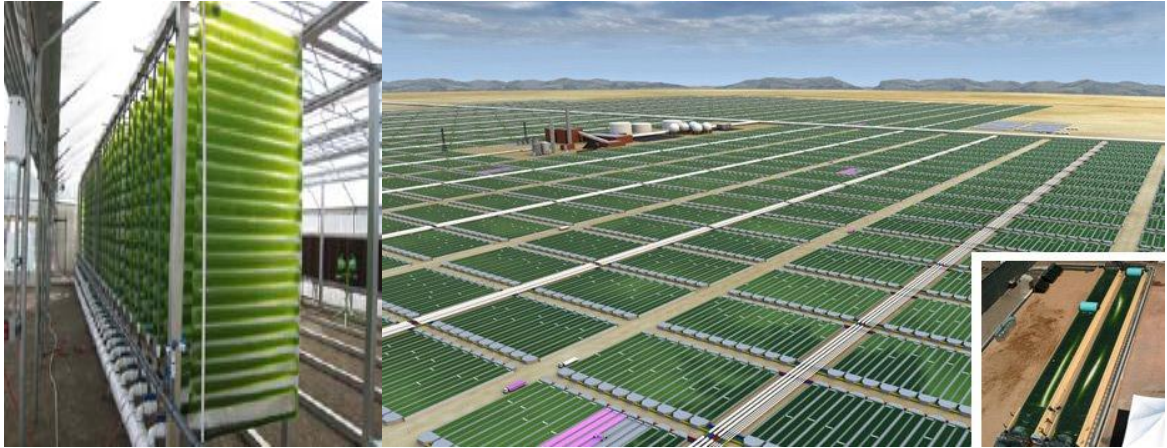


Figura 51: Área de produção de Micro-algas [Global Green Solutions, 2007]

2.2.5.6- Regulamentação

A norma ASTM D 6751 (reconhecida pelas organizações do Governo Norte-Americano), 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. O Diesel é normalizado segundo ASTM D975.

Na Europa, o Biodiesel encontra-se normalizado segundo DIN 51506 ou EN 14214. O gasóleo segundo a norma EN 590. [EMA, 2005; Pimenta, 2008]

Tabela 4: Propriedades do gasóleo e Biodiesel normalizadas

Combustível	Gasóleo	Biodiesel
Norma	EN 590	EN 14214
Viscosidade Cinemática (40 °C)	1.5 - 4.0	3.5 – 5.0

3- Objectivos

O objectivo da execução deste projecto foi a seguinte:

- **Optimização da gestão electrónica de um motor turbodiesel para o combustível Biodiesel**

3.1- Combustíveis testados

Os combustíveis utilizados foram os seguintes:

Diesel – gasóleo comercial de origem mineral. Foram utilizados dois do mesmo fabricante, gasóleo normal e gasóleo especial.

Biodiesel Feup – fabricado em laboratórios na FEUP por processo de transesterificação, a partir de óleo de colza. (O mesmo Biodiesel utilizado nos projectos dos Engenheiros Moreira, Pimenta e Ramos).

4- Procedimento Experimental

4.1- Influência do Biodiesel no funcionamento dos motores a gasóleo

O estudo desta questão foi iniciado na investigação da Faculdade, a nível das emissões poluentes, pelo Engenheiro Sérgio Moreira, pelo Engenheiro Daniel Pimenta e pelo Engenheiro Diogo Ramos que progrediu o estudo a nível das propriedades físicas e químicas do biodiesel.

No estudo do Eng. Daniel Pimenta, utilizou-se dois automóveis com dois sistemas de injeção distintos, sendo um com sistema common rail e o outro com sistema mais rodimentar de bomba de injeção. Os automóveis utilizados 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 (Dados no fabricante).
- Fiat Bravo 1.9 TD100 com 100 cv de origem, mas preparado a nível de motor e chassis para competição.

Os testes foram efectuados em banco de potência e obtiveram-se diversas curvas de binário e potência para vários combustíveis e misturas dos mesmos, dos quais vou referenciar curvas para o gasóleo, e dois tipos de Biodiesel B100 (um feito pela FEUP e um comercial)

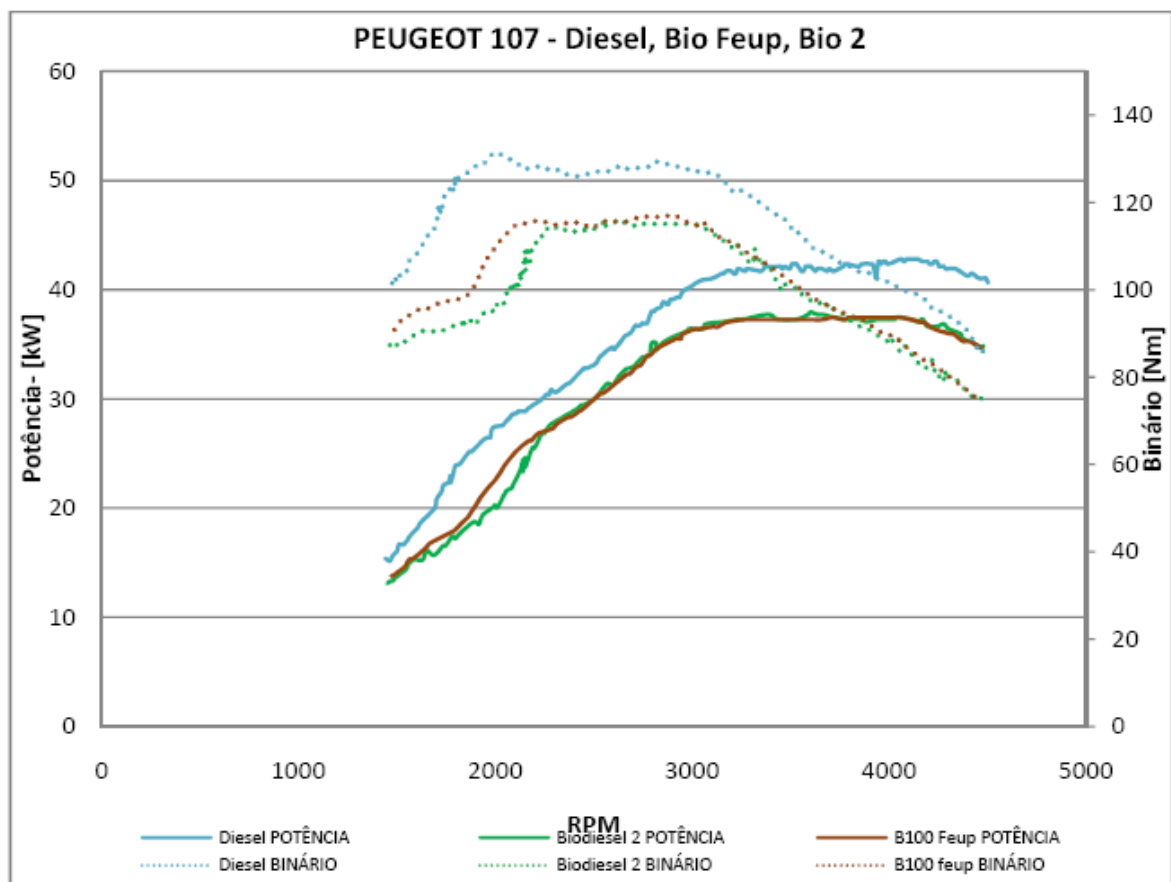


Figura 52: Curvas de potência e binário do Peugeot 107 utilizando gasóleo, Biodiesel e Biodiesel 2 [Pimenta, 2008]

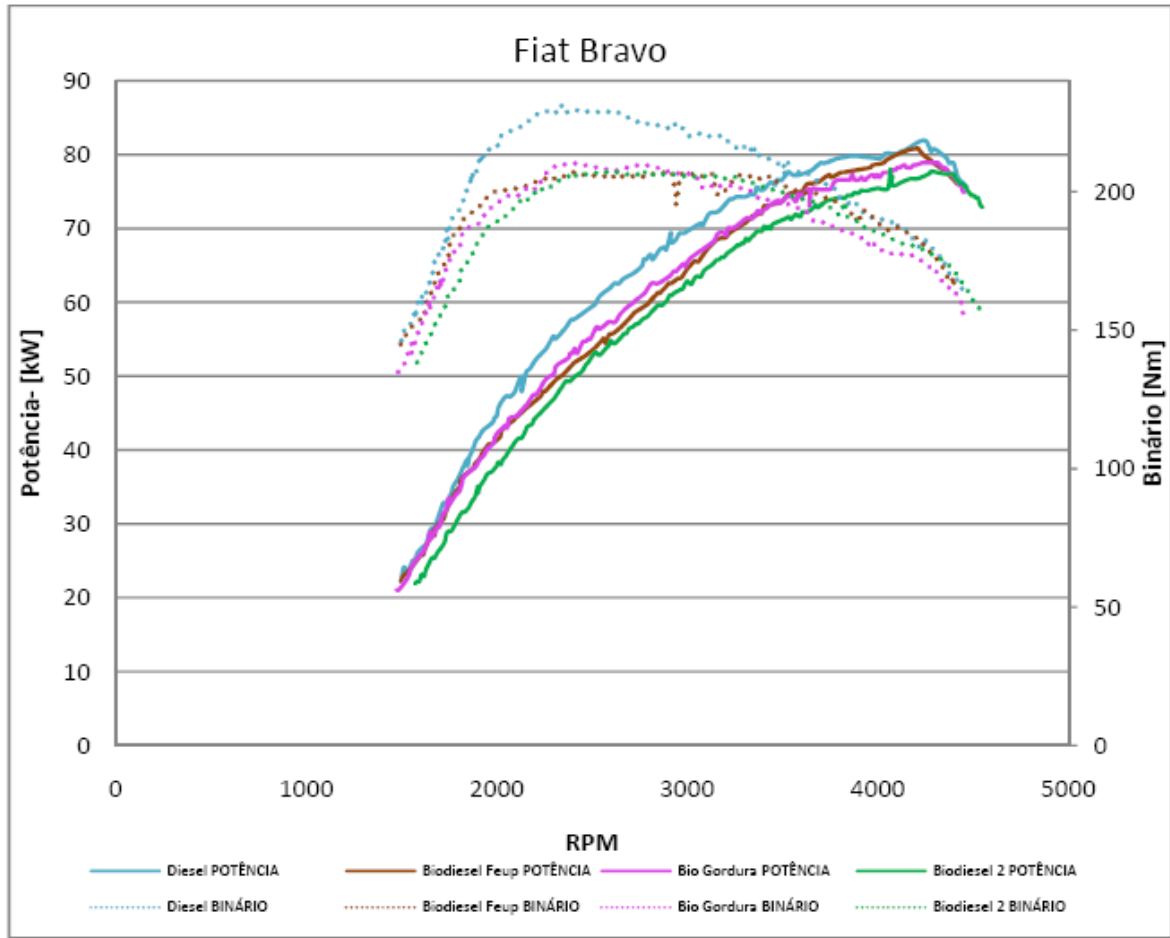


Figura 53: Curvas de potência e binário do Fiat Bravo utilizando gasóleo, Biodiesel e Biodiesel 2 [Pimenta, 2008]

Na figura 52, relativamente ao Peugeot 107, as curvas de binário do B100 FEUP deslocam-se ligeiramente para baixo e para a direita. O Binário máximo, obtido no banco de potência para o gasóleo é de 132 Nm às 1990 rpm, para B100 Feup o binário é de 115 Nm às 2850 rpm.

O B100 Feup perde para o gasóleo cerca de 13% de binário máximo com a agravante de estarem desfasados cerca de 860 rpm (1990 rpm contra 2850 rpm).

Na figura 53, relativamente ao Fiat Bravo, as curvas de binário do B100 FEUP deslocam-se (apenas) ligeiramente para baixo. O binário máximo obtido no banco de potência para gasóleo é de 232 Nm às 2290 rpm, para B100 FEUP o binário é de 208 às 2410 rpm. Temos assim um quebra de potência em menor ordem que a anterior e o mesmo de sucede com o binário.

Efectuada uma observação cuidada sobre estes dois testes podemos tirar várias conclusões das quais:

- Variando apenas o combustível de gasóleo para biodiesel as perdas de binário e potência são mais acentuadas nos sistemas common rail do que nos sistemas de bomba injectora;

- No sistema common rail para além das perdas já referidas há uma agravante que é o facto do binário máximo ocorrer quase 1000rpm mais tarde o que numa condução diária se revela um ponto muito negativo na agradabilidade de condução;
- Nos sistemas de bomba injectora as perdas são menores mas notórias com a mesma agravante do binário máximo ser menor e ocorrer a uma rotação mais tardia mas aqui a diferença não ultrapassa as 200rpm;
- Repare-se no caso do 107 que a faixa de rotação de uma condução normal e diária (1250 a 2000rpm) as curvas de binário do gasóleo para o biodiesel têm concavidades diferentes e a quebra de binário chega a ser superior a 20Nm o que prejudica imenso a condução nessa faixa, obriga o recurso a maiores rotações para o mesmo ritmo de andamento e conseqüentemente aumento dos consumos.
- No global, se apenas se alterar o tipo de combustível de gasóleo para o biodiesel o motor perde sempre prestações a qualquer faixa de rotação/utilização;

4.2- Propriedades do Biodiesel

4.2.1- Poder Calorífico de vários combustíveis

O poder calorífico do combustível é um factor crucial para o rendimento global e potência dos motores de combustão interna.

Na tabela 5 são expostos os vários pcs de variados combustíveis:

Tabela 5: Resultados das determinações do PCS [Ramos, 2009]

	Poder Calorífico (cal/g)	erro (%)	Diferença *
Biodiesel	9074,75	2,13	10,98%
Azeite	8946,67	2,58	12,23%
Óleo de Soja	8707,04	0,87	14,58%
Óleo de Milho	8743,99	2,10	14,22%
Óleo de Girassol	9016,59	2,00	11,55%
Óleo de Amendoim	8792,95	1,35	13,74%
Óleo de Vegetais	8667,13	1,30	14,97%
Gasóleo normal	10193,60	1,43	0,00%
Gasóleo especial	10164,80	1,06	0,28%
Gasóleo normal retorno	10411,30	1,31	-2,14%
Biodiesel retorno	8844,22	0,65	13,24%

Efectuada a análise da tabela imediatamente se constata o poder calorífico do gasóleo superior a qualquer outro combustível testado incluindo o combustível chave deste trabalho, o biodiesel.

Neste ponto é evidente que iremos ter perdas nas curvas de potencia e conseqüentemente nas de binário também o que confirma o ponto 4.1 anteriormente exposto. O valor o pcs é inferior

em mais de 10% face ao gasóleo, diferença esta muito significativa e deste ponto denota-se então que o biodiesel será um combustível menos “produtivo” que o gasóleo.

4.2.2- Viscosidade cinemática

A viscosidade cinemática é outra propriedade essencial para o estudo conveniente do biodiesel e os resultados descritos na tabela 6 para uma gama de temperaturas compreendida entre 30°C a 50°C:

**Tabela 6: Resultados das determinações da viscosidade cinemática (mm²/s)
[Ramos, 2009]**

	Amendoim	Milho	Vegetais	Soja	Girassol	Azeite
30 °C	58,73	49,04	47,58	48,75	47,46	61,00
40 °C	40,83	34,70	33,89	34,27	33,59	42,08
50 °C	29,20	25,15	24,61	25,06	24,02	29,99
30-50 °C	50,28%	48,72%	48,28%	48,59%	49,39%	50,84%

	Gasóleo normal	Gasóleo especial	Biodiesel
30 °C	3,07	3,02	10,50
40 °C	2,54	2,51	8,16
50 °C	2,14	2,12	6,49
30-50 °C	30,29%	29,80%	38,19%

	Biodiesel 5% 95	Biodiesel 5% 98	Biodiesel retorno	Gasóleo retorno
30 °C	8,86	8,72	10,19	3,26
40 °C	7,00	6,90	7,96	2,54
50 °C	5,66	5,57	6,30	2,13
30-50 °C	36,12%	36,12%	38,17%	34,66%

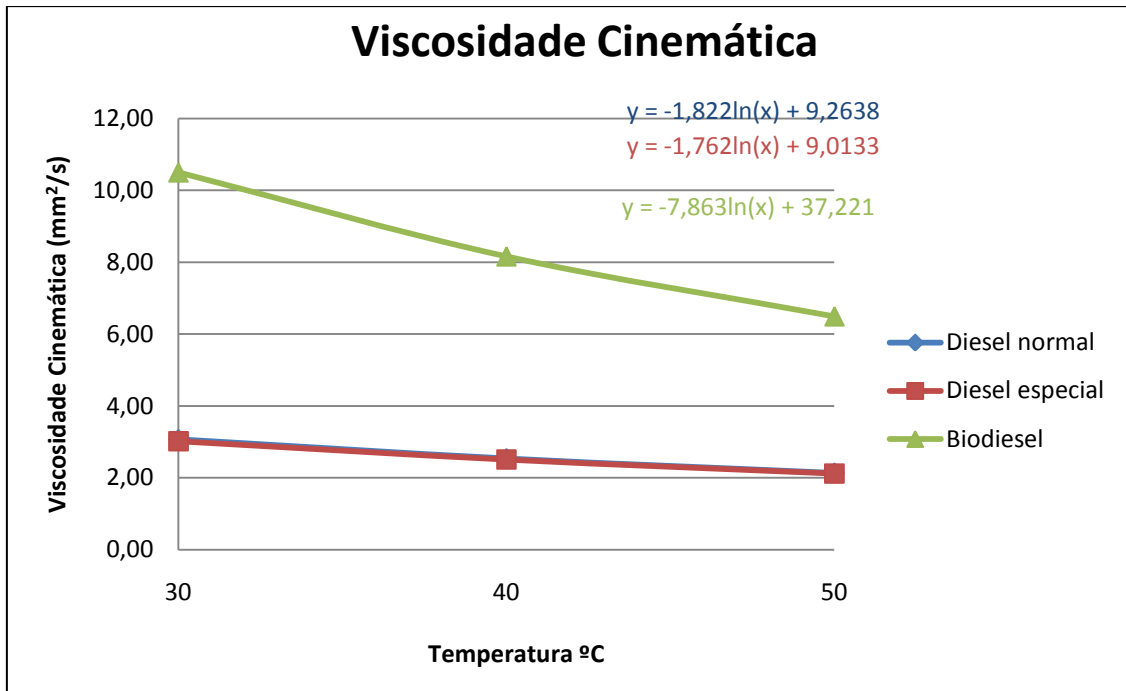


Figura 54: Viscosidade Cinemática dos combustíveis em função da temperatura [Ramos, 2009]

Na figura 54 vem apresentada fica gráfica os resultados da viscosidade cinemática do gasóleo normal, gasóleo especial e biodiesel para uma gama de temperaturas de 30°C a 50°C.

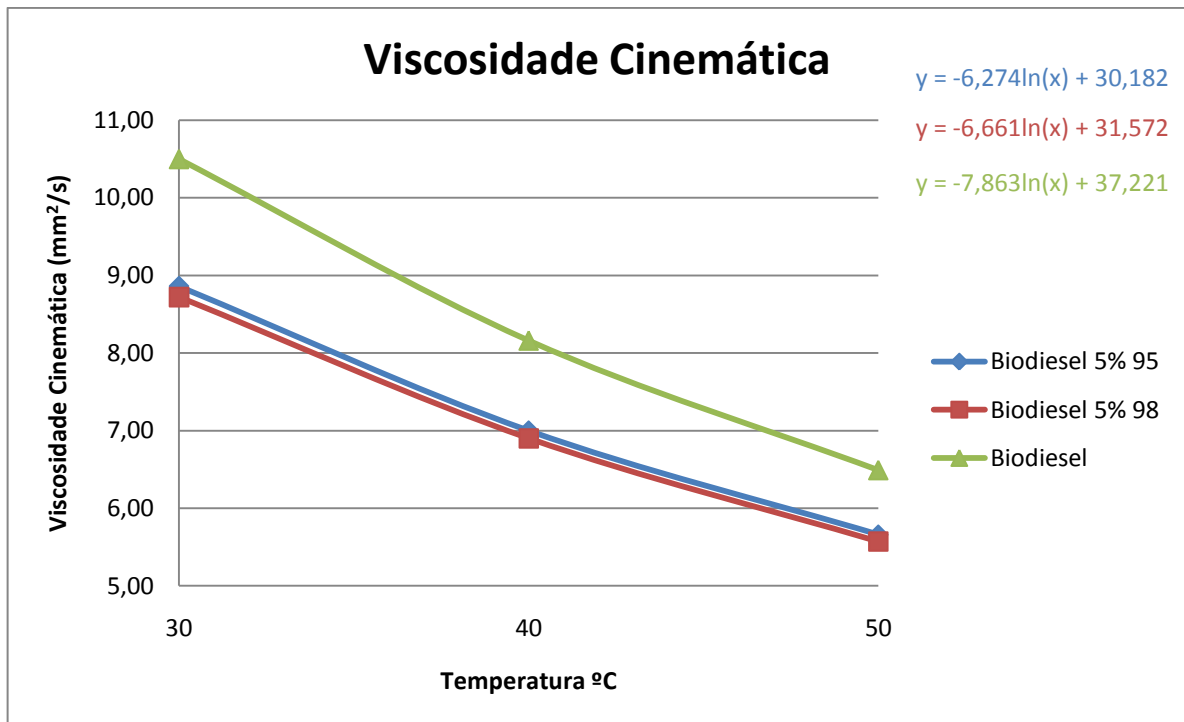


Figura 55: Viscosidade Cinemática dos combustíveis em função da temperatura [Ramos, 2009]

A figura 55 mostra o resultado da viscosidade cinemática de várias composições do biodiesel sendo elas, biodiesel, biodiesel com 5% de gasolina 95 octanas e biodiesel com 5% de gasolina de 98 octanas. O gráfico vem compreendido numa gama de temperaturas de 30°C a 50°C.

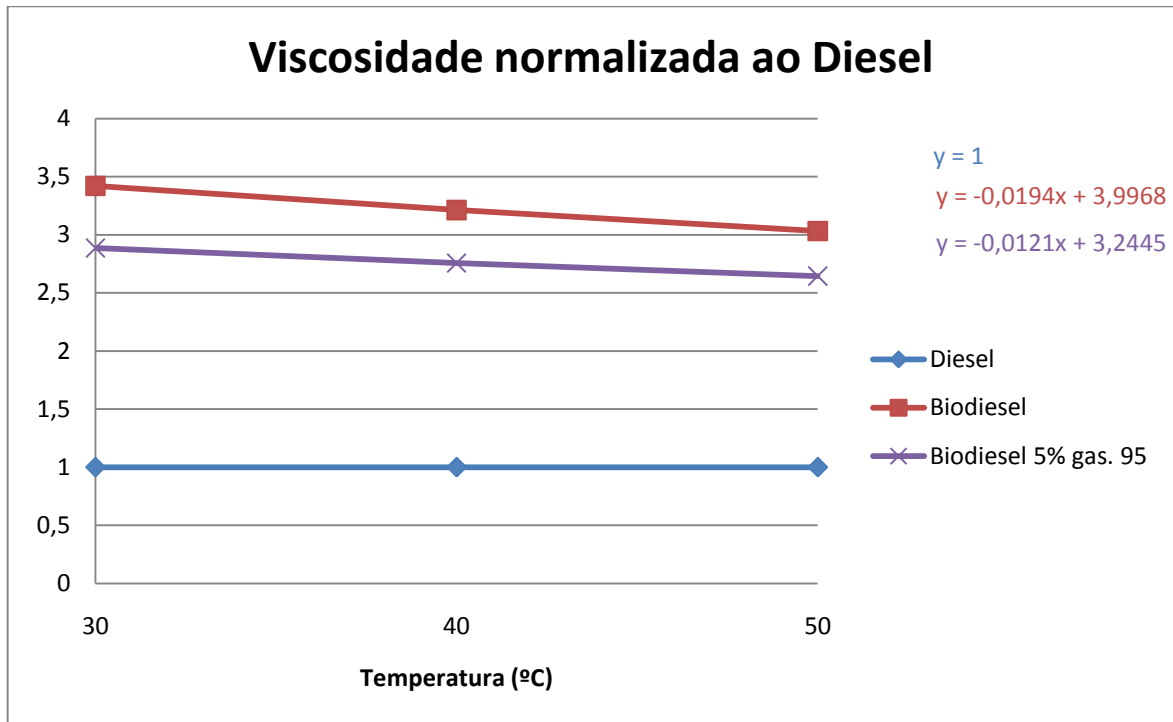


Figura 56: Viscosidade Cinemática dos combustíveis normalizada ao Gasóleo em função da temperatura [Ramos, 2009]

Na figura 56 é apresentada a viscosidade cinemática do biodiesel e biodiesel com 5% de gasolina 95 octanas normalizada em relação ao gasóleo.

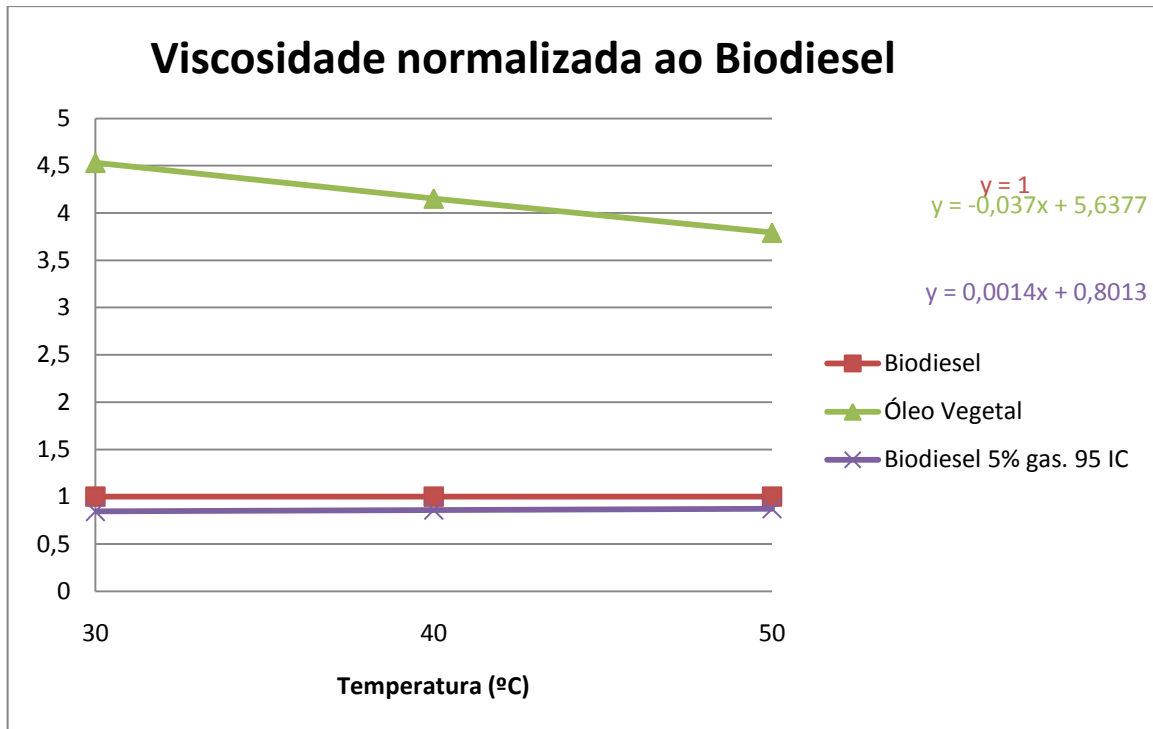


Figura 57: Viscosidade Cinemática do óleo vegetal normalizado ao Biodiesel em função da temperatura [Ramos, 2009]

A figura 57 mostra o resultado da viscosidade cinemática do óleo vegetal normalizado relativamente ao biodiesel no intervalo de temperaturas de 30°C a 50°C.

Efectuada uma atenção detalhada sobre estes resultados pudemos constatar que o biodiesel tem um valor de viscosidade muito superior ao gasóleo (cerca de 3 vezes mais) sendo à partida um indicador desfavorável pois teoricamente, um fluido mais viscoso tem mais dificuldade em transpor determinado orifício e como tal por cada injeção e durante o tempo da mesma, a quantidade de biodiesel deve ser inferior a uma mesma injeção executada com gasóleo. O caudal de injeção se é inferior, teoricamente o trabalho produzido será sempre inferior e logo as perdas são inevitáveis.

O ponto curioso verificado é o facto de aquando da adição de gasolina 95 ou 98 ao biodiesel faz com que a sua viscosidade baixe e aqui reside uma questão que podia ser mais aprofundada pois para além da viscosidade diminuir, o que é favorável, o pcs da mistura será superior. A quantidade de gasolina adicionada à mistura iria ser um ponto pertinente pois assim se constatava que com maior percentagem de gasolina se se iria ter mais ganhos ou não e depois surge um inconveniente que é para além da gasolina ser um combustível mais caro, este é também um oriundo fóssil o que para este trabalho é um contra.

4.2.3- Massa volúmica

A massa volúmica é outra propriedade importante para a investigação do biodiesel e na tabela 7 são discriminadas as massas volúmicas de alguns combustíveis:

Tabela 7: Resultados das determinações da massa volúmica para temperatura ambiente (kg/m³) [Ramos, 2009]

Temperatura (°C)	Amb. (25 °C)
Gasóleo	0,8180
Biodiesel	0,8894
Óleo de vegetais	0,9120

4.3- Quantidade de combustível injectada

A quantidade de combustível injectada para uma determinada pressão e temporização de injeção varia segundo o combustível que se utiliza. Na tabela 8 são apresentados os resultados do caudal mássico para o gasóleo, biodiesel e óleo vegetal.

Tabela 8: Resultados das determinações do caudal injectado (mm³/ciclo)[Ramos, 2009]

mm ³ /cu	Diesel			mm ³ /cu	Biodiesel			mm ³ /cu	Óleo Vegetal		
	420	480	590		420	480	590		420	480	590
1	31,6	32	38	1	30	32	36	1	30	30,8	38
3	70	76	88	3	64	68	78	3	60	66,8	76
5	112,8	122	136,8	5	108	117,2	134	5	95,6	102	120
7	154	164	188,8	7	148	158	178	7	127,6	138	162
10	208	225	260	10	203,6	219	248	10	174,8	190	220
15	295	324	368	15	286	308	352	15	244	270	312

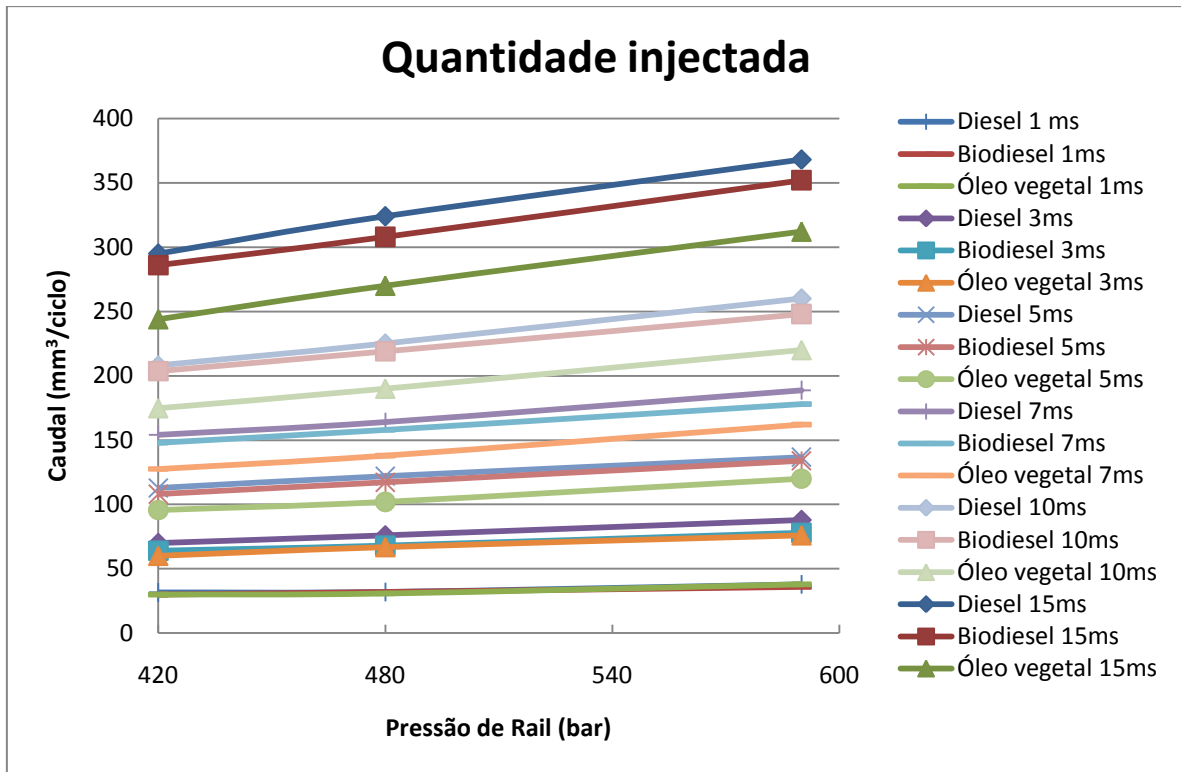


Figura 58: Quantidade injectada de combustível por ciclo (mm^3/ciclo) para todas as temporizações [Ramos, 2009]

Na figura 58 são apresentados os resultados de vários combustíveis relativamente á quantidade mássica de combustível injectada para uma gama de tempos de injeção compreendida entre 420 e 600 bar.

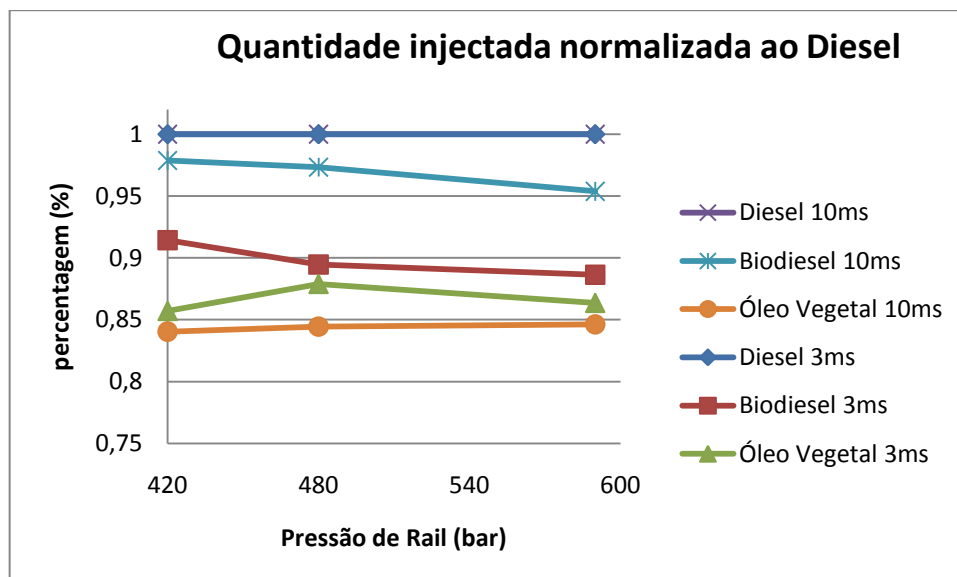


Figura 59: Quantidade injectada de combustível por ciclo normalizado ao Gasóleo com uma temporização de 3 e 10 ms em função da pressão de injeção [Ramos, 2009]

A figura 59 apresenta a quantidade de combustível injectada por ciclo normalizada ao gasóleo para vários combustíveis com tempos de injeção de 3 e 10 ms.

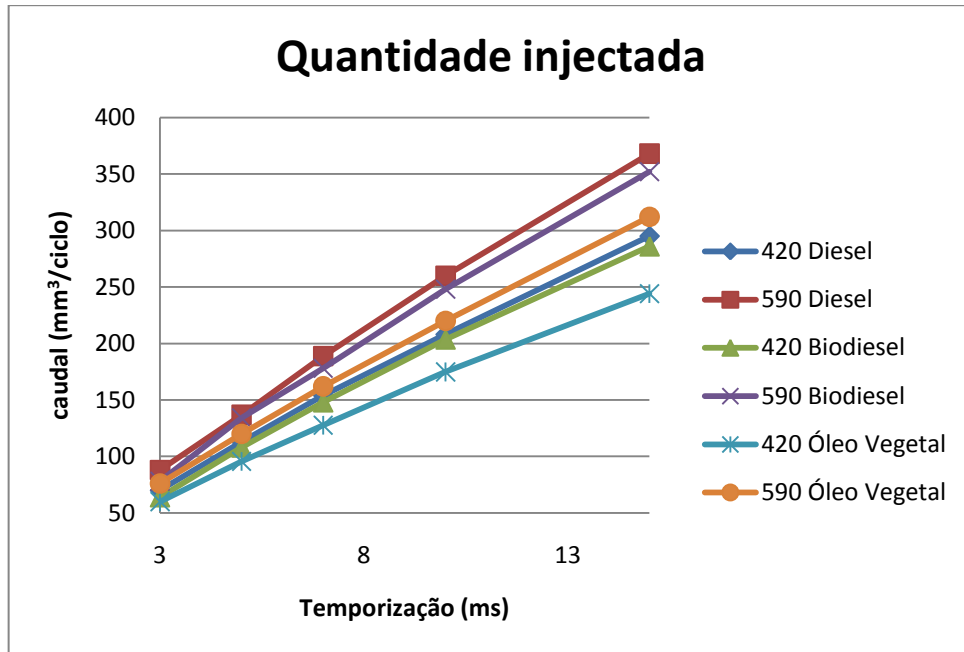


Figura 60: Quantidade injectada de combustível por ciclo em função da temporização [Ramos, 2009]

Na figura 60 pode-se constatar graficamente, a quantidade de combustível injectada por ciclo em função do tempo de injeção.

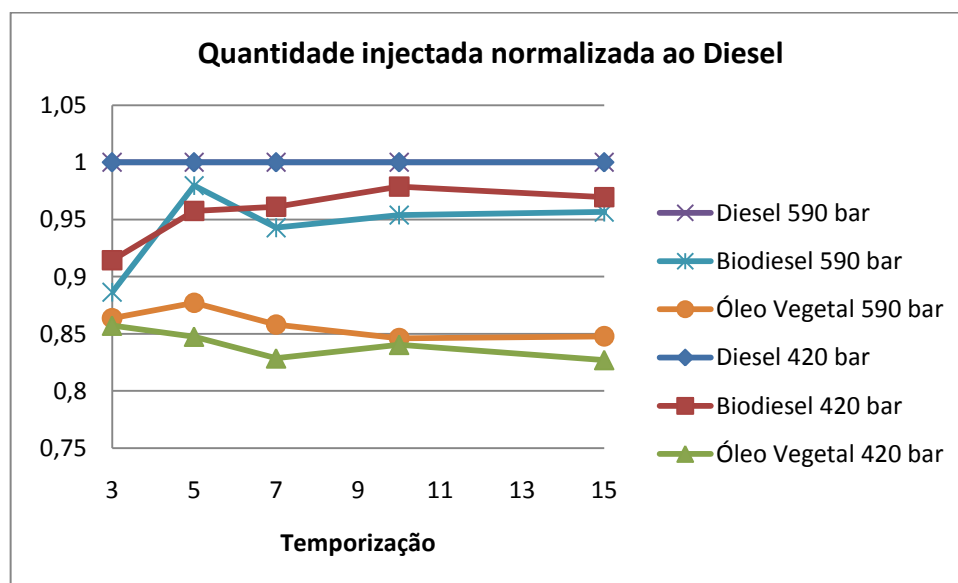


Figura 61: Quantidade injectada de combustível por ciclo normalizado ao Gasóleo com uma pressão de injeção de 420 e 590 bar em função do tempo de injeção [Ramos, 2009]

A figura 61 traduz via gráfica, a quantidade mássica injectada por ciclo normalizada relativamente ao gasóleo com pressões de injeção de 420 e 590 bar em função do tempo de injeção.

Análise do Caudal Mássico

O produto da massa volúmica com os valores da Tabela 8 resultam a seguinte tabela:

Tabela 9: Resultados das determinações do caudal mássico injectado (mg/ciclo) [Ramos, 2009]

mg/cu	Diesel			mg/cu	Biodiesel			mg/cu	Óleo Vegetal		
	420	480	590		420	480	590		420	480	590
1	25,8	26,2	31,1	1	26,7	28,5	32,0	1	27,4	28,1	34,7
3	57,3	62,2	72,0	3	56,9	60,5	69,4	3	54,7	60,9	69,3
5	92,3	99,8	111,9	5	96,1	104,2	119,2	5	87,2	93,0	109,4
7	126,0	134,2	154,4	7	131,6	140,5	158,3	7	116,4	125,9	147,7
10	170,1	184,1	212,7	10	181,1	194,8	220,6	10	159,4	173,3	200,6
15	241,3	265,0	301,0	15	254,4	273,9	313,1	15	222,5	246,2	284,5

A tabela 9 anuncia os resultados das determinações do caudal de combustível injectado por ciclo.

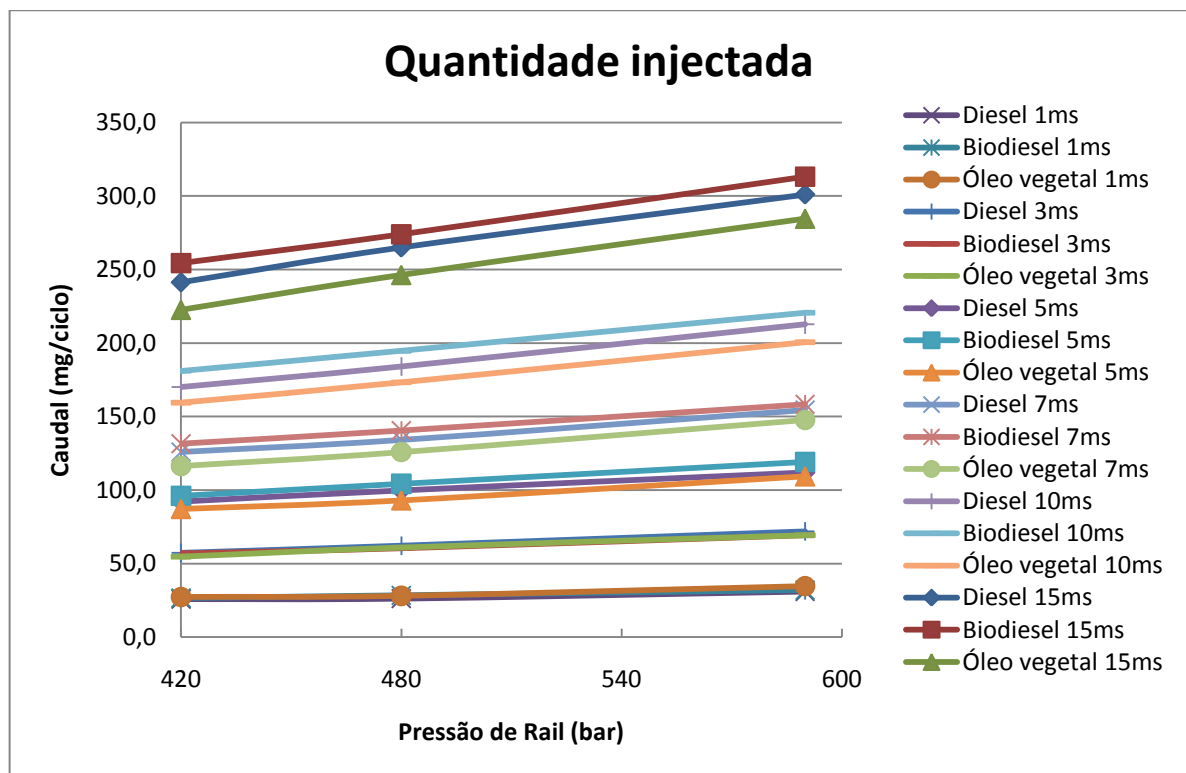


Figura 62: Quantidade injectada de combustível por ciclo (mg/ciclo) para todas as temporizações [Ramos, 2009]

Na figura 62 é apresentada a quantidade mássica injectada por ciclo para tempos de injeção compreendidos entre 1 e 15 ms.

A análise efectuada sobre estes resultados é de conclusão imediata e óbvia que para a mesma temporização e pressão de injeção, o caudal de injeção é superior no gasóleo face ao biodiesel. Teoricamente menos quantidade de combustível para as mesmas condições de operação do motor implica menor potência gerada.

A inferior quantidade de combustível injectada por parte do biodiesel reflecte-se em qualquer situação e em grande parte dos casos à mesma proporção mas após uma análise mais detalhada constata-se que para que o biodiesel tenha o mesmo caudal de injeção para as mesmas condições bastando um aumento na ordem dos 40 a 60 bar na pressão de injeção e é neste ponto que pode residir grande parte da recuperação da potência e binário perdidos do biodiesel face ao gasóleo.

4.4- Calor fornecido pela combustão

O calor fornecido pelo gasóleo e o biodiesel com a mesma pressão e temporização de injeção é outro ponto pertinente e muito importante para a posterior optimização do combustível alvo.

Tabela 10: Resultados das determinações calor fornecido pela combustão (cal/ciclo) [Ramos, 2009]

cal/cu	Diesel			cal/cu	Biodiesel			cal/cu	Óleo Vegetal		
	420	480	590		420	480	590		420	480	590
1	0,263	0,267	0,317	1	0,242	0,258	0,291	1	0,237	0,243	0,300
3	0,584	0,634	0,734	3	0,517	0,549	0,630	3	0,474	0,528	0,601
5	0,941	1,017	1,141	5	0,872	0,946	1,082	5	0,756	0,806	0,949
7	1,284	1,367	1,574	7	1,195	1,275	1,437	7	1,009	1,091	1,281
10	1,734	1,876	2,168	10	1,643	1,768	2,002	10	1,382	1,502	1,739
15	2,460	2,702	3,069	15	2,308	2,486	2,841	15	1,929	2,134	2,466

A tabela 10 mostra o resultado das determinações do calor fornecido pela combustão.

Tabela 11: Tabela de conversão [Ramos, 2009]

Massa Volumica	Diesel	Biodiesel	Óleo vegetal
Kg/m ³	0,8180	0,8894	0,9120
Poder calorifico	Diesel	Biodiesel	Óleo vegetal
cal/g	10193,60	9074,75	8667,13
Poder calorifico	Diesel	Biodiesel	Óleo vegetal
cal/mm ³	0,008338	0,008071	0,007904

A tabela 11 tem os valores de conversão de vários combustíveis segundo várias propriedades.

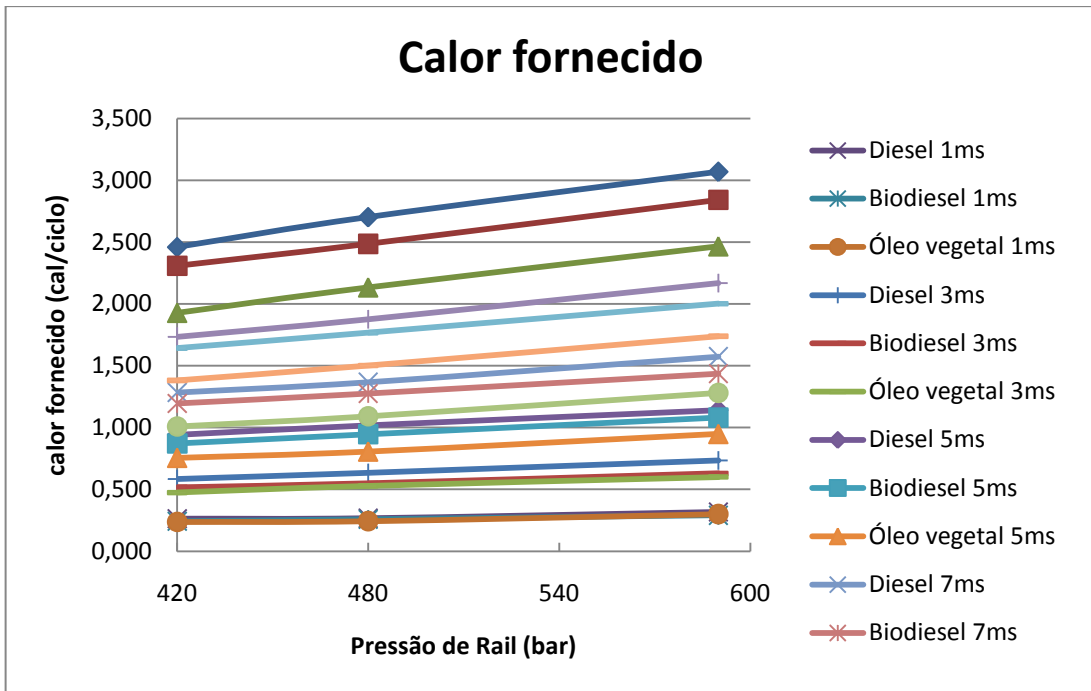


Figura 63: Calor fornecido por ciclo (cal/ciclo) para todas as temporizações [Ramos, 2009]

Na figura 63 é apresentado o calor fornecido por ciclo para uma gama de temporizações compreendida entre 1 e 7 ms.

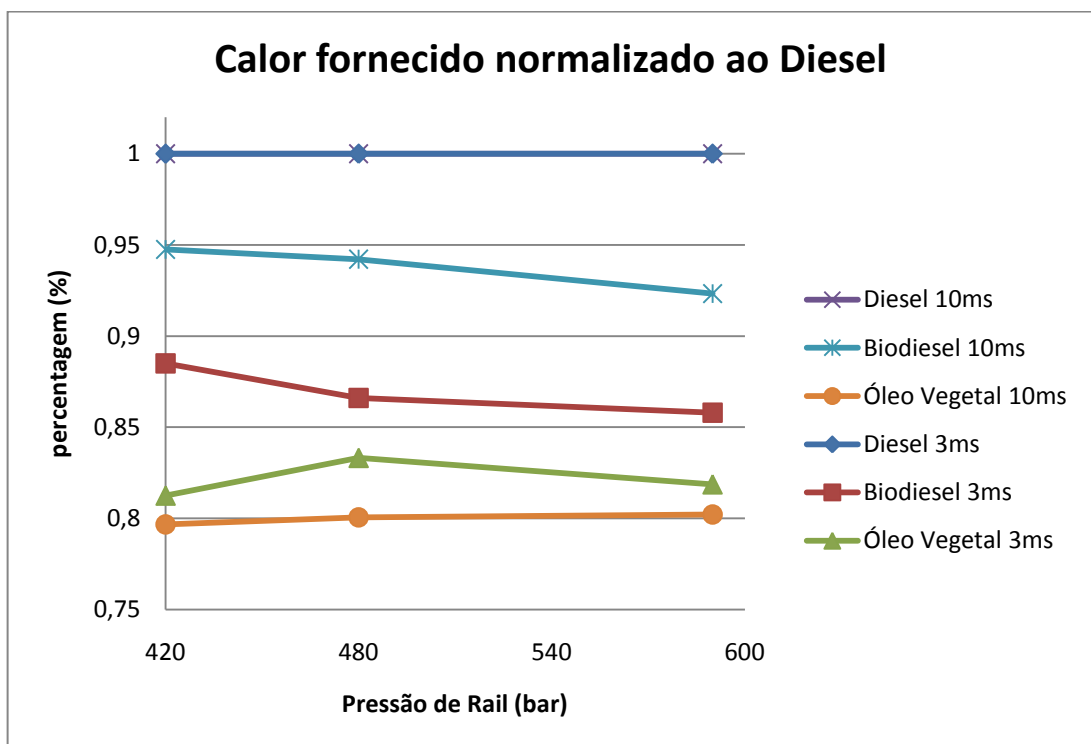


Figura 64: Calor fornecido por ciclo normalizado ao Gasóleo com uma temporização de 3 e 10 ms em função da pressão de injeção [Ramos, 2009]

A figura 64 representa o calor fornecido por ciclo normalizado ao gasóleo em função da pressão de injeção para um intervalo de temporização de 3 a 10 ms.

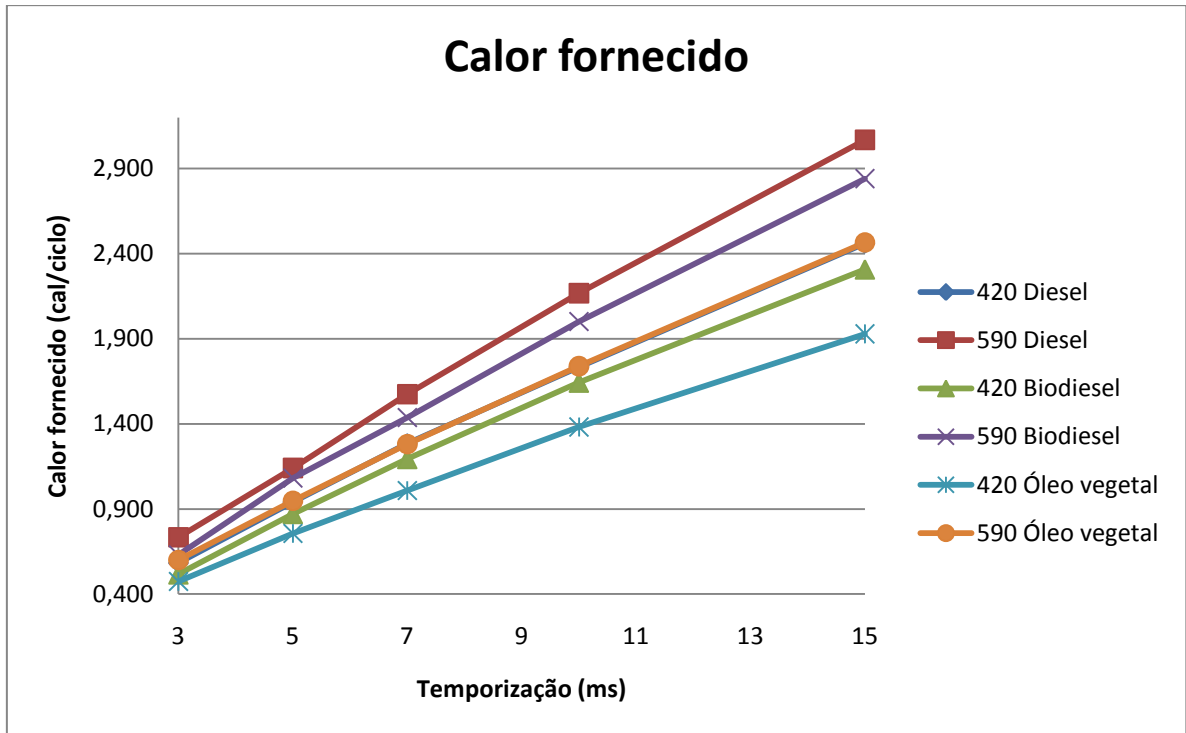


Figura 65: Calor fornecido para cada combustível para cada pressão em função da temporização [Ramos, 2009]

Na figura 65 é mostrado o calor fornecido em função do tempo de injeção para vários combustíveis com pressões de injeção de 420 e 590 bar.

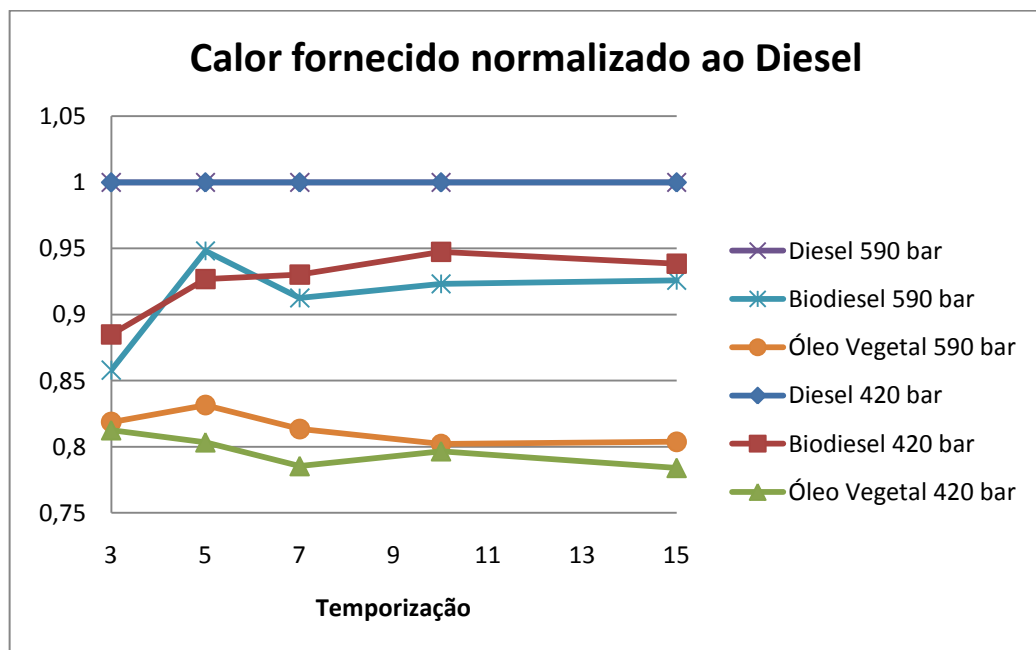


Figura 66: Calor fornecido por ciclo normalizado ao Gasóleo com uma pressão de injeção de 420 e 590 bar em função da temporização [Ramos, 2009]

A figura 66 representa uma normalização relativa ao gasóleo de vários combustíveis do calor fornecido por ciclo.

Tabela 12: Percentagem de diminuição de calor fornecido em função do Gasóleo e do Biodiesel [Ramos, 2009]

cal/cu	Perda Diesel para Óleo Veg.			cal/cu	Perda Diesel para Biodiesel			cal/cu	Perda Biodiesel para Óleo Veg.		
	420	480	590		420	480	590		420	480	590
1	10,00%	8,76%	5,20%	1	8,11%	3,21%	8,30%	1	2,06%	5,74%	-3,38%
3	18,75%	16,68%	18,13%	3	11,50%	13,39%	14,20%	3	8,19%	3,79%	4,58%
5	19,66%	20,74%	16,85%	5	7,32%	7,01%	5,19%	5	13,31%	14,77%	12,30%
7	21,45%	20,23%	18,66%	7	6,98%	6,75%	8,74%	7	15,56%	14,46%	10,87%
10	20,34%	19,95%	19,79%	10	5,25%	5,79%	7,67%	10	15,92%	15,03%	13,12%
15	21,59%	21,00%	19,63%	15	6,16%	7,99%	7,41%	15	16,45%	14,15%	13,19%

A tabela 12 demonstra a percentagem de diminuição do calor fornecido em função do gasóleo e do biodiesel.

O calor fornecido pelo biodiesel tem a mesma tendência que os parâmetros analisados anteriormente, isto é, sempre inferior ao gasóleo. A inferioridade neste ponto é maior que nos outros casos e para se ter no biodiesel o mesmo calor fornecido, tem que se aumentar a pressão de injeção de 60 a 100bar o que já não é um caso de fácil optimização porque nem todos os sistemas common rail estão preparados para trabalhar com mais 100bar face ao valor de funcionamento que actualmente têm nos veículos onde estão instalados.

4.5- Parâmetros optimizáveis

Os motores gasóleo actuais no mercado automóvel vêm praticamente todos equipados com gestão electrónica que regem o seu devido funcionamento.

A injeção é uma parte da gestão electrónica fundamental e muito elaborada devido sua importância nos motores, sejam eles de sistema de injeção por bomba injectora, injector-bomba ou o mais actual e futurista common-rail.

4.5.1- Sistema de injeção Bomba Injectora

O sistema de injeção por bomba injectora é um sistema de injeção mais antigo e é com este sistema que se iniciou a integração da gestão electrónica nos motores a gasóleo.

As principais marcas de gestão electrónica associadas a este sistema de injeção são várias a Bosch (fig. 67) e a Delphi (fig. 68).



Figura 67: Centralina Bosch EDC15V



Figura 68: Centralina Delphi Ford

Os principais parâmetros de optimização da gestão electrónica de um motor com este sistema de injeção são os seguintes:

- Caudal de Injecção
- Avanço de Injecção
- Voltagem da bomba de injeção (fig. 69)
- Pressão de sobrealimentação
- Regulação da geometria variável do turbo
- Limitadores de velocidade
- EGR

rpm mg/ciclo	Voltagem da Bomba de Injecção (rpm,mg/ciclo)/mV															
	0	210	399	609	798	903	1008	1260	1491	1743	1995	2499	3003	3507	3990	4494
0.00	0	931	915	867	771	723	642	337	0	0	0	0	0	0	0	0
0.40	1219	1220	1220	1220	1219	1203	1187	1147	1099	1059	1027	1003	978	970	970	970
2.00	1293	1293	1292	1292	1285	1285	1261	1219	1170	1130	1106	1090	1081	1057	1057	1057
4.00	1383	1383	1383	1383	1375	1375	1359	1318	1268	1228	1204	1180	1171	1155	1139	1139
6.00	1465	1465	1465	1465	1465	1465	1457	1417	1358	1318	1286	1261	1245	1229	1229	1229
8.00	1532	1532	1532	1532	1532	1532	1532	1515	1442	1389	1381	1367	1351	1343	1343	1343
10.00	1597	1597	1597	1597	1597	1598	1590	1581	1516	1478	1478	1470	1469	1461	1461	1461
12.00	1654	1654	1646	1654	1654	1654	1638	1639	1590	1582	1590	1598	1598	1606	1614	1630
15.00	1702	1702	1702	1702	1702	1702	1704	1721	1713	1704	1710	1750	1758	1774	1791	1815
20.00	1822	1822	1823	1823	1822	1823	1831	1863	1884	1893	1918	1976	2024	2072	2128	2168
25.00	1911	1911	1911	1911	1911	1911	1919	1992	2032	2080	2128	2216	2297	2377	2450	2498
30.00	2024	2023	2023	2023	2032	2040	2064	2144	2192	2256	2321	2449	2570	2715	2827	2944
35.00	2115	2120	2120	2128	2152	2169	2193	2273	2345	2425	2518	2657	2790	2915	3029	3149
40.00	2225	2220	2222	2245	2269	2288	2312	2405	2493	2591	2682	2853	3017	3165	3302	3374
51.00	2331	2328	2337	2377	2433	2466	2489	2594	2690	2795	2907	3108	3277	3374	3374	3374

Figura 69: Mapa da voltagem da bomba de injeção de um motor 1.9 TDI 110cv VAG

4.5.2- Sistema de injeção Injector – Bomba

O sistema de injeção por injector – bomba de controlo electrónico é pioneiro e patenteado pela marca construtora de automóveis Volkswagen. A sua implementação no mercado foi no ano de 1999 e actualmente este grupo ainda comercializa veículos com esta tecnologia de injeção.

As principais marcas de gestão electrónica associadas a este sistema de injeção são a Bosch e a Siemens (fig.70) (alguns motores 2.0 TDI PD de 140cv e todos os 2.0 TDI PPD de 170cv).



Figura 70: Centralina Siemens PPD

Os principais parâmetros de optimização da gestão electrónica de um motor com este sistema de injeção são os seguintes:

- Caudal de Injecção
- Mistura Ar/Combustível
- Avanço de Injecção
- Pressão de sobrealimentação (fig.71)
- Regulação da geometria variável do turbo
- Limitadores de velocidade
- EGR

rpm mg/ciclo	p (turbo) (rpm,m(comb))/mbar															
	1000	1200	1400	1600	1800	2000	2200	2400	2600	2800	3000	3200	3400	3600	3800	4000
0.0	30.0	0.0	16.0	31.0	58.0	63.0	93.0	90.0	92.0	107.0	144.0	144.0	173.0	177.0	195.0	226.0
10.0	35.0	38.0	41.0	46.0	63.0	220.0	300.0	320.0	360.0	440.0	470.0	540.0	542.0	556.0	570.0	570.0
15.0	46.0	65.0	78.0	91.0	119.0	320.0	400.0	440.0	550.0	590.0	580.0	590.0	621.0	640.0	649.0	650.0
20.0	77.0	117.0	132.0	155.0	330.0	435.0	540.0	590.0	595.0	690.0	681.0	730.0	704.0	712.0	711.0	718.0
25.0	124.0	175.0	253.0	334.0	412.0	550.0	600.0	640.0	658.0	780.0	792.0	806.0	822.0	813.0	810.0	801.0
30.0	130.0	237.0	354.0	439.0	549.0	655.0	694.0	721.0	773.0	931.0	924.0	924.0	922.0	903.0	892.0	878.0
35.0	130.0	280.0	440.0	543.0	655.0	747.0	878.0	960.0	980.0	981.0	984.0	985.0	984.0	978.0	963.0	947.0
40.0	130.0	280.0	440.0	645.0	788.0	868.0	953.0	1010.0	1028.0	1037.0	1035.0	1031.0	1025.0	1020.0	1013.0	1000.0
45.0	130.0	280.0	440.0	645.0	852.0	977.0	1074.0	1100.0	1100.0	1100.0	1100.0	1100.0	1025.0	1025.0	1020.0	1010.0
50.0	130.0	280.0	440.0	645.0	852.0	1020.0	1100.0	1100.0	1100.0	1100.0	1100.0	1100.0	1025.0	1025.0	1020.0	1010.0

Figura 71: Mapa pressão relativa de sobrealimentação do motor 1.4 TDI PD 75cv VAG

4.5.3- Sistema de injeção Common Rail

O sistema de injeção common-rail é o sistema mais desenvolvido e o mais utilizado pelos fabricantes de automóveis na actualidade.

Praticamente todas as empresas produtoras de gestão electrónica produzem equipamentos para este sistema de injeção. Na figura 72 apresenta-se um exemplo de uma centralina utilizada neste sistema de injeção.



Figura 72: Centralina Delphi do Jaguar X-Type 2.0d

Os principais parâmetros de optimização da gestão electrónica de um motor com este sistema de injeção são os seguintes:

- Caudal de Injecção
- Avanço de Injecção (fig. 73)
- Mistura Ar/Combustível
- Pressão de Injecção
- Tempo de Injecção
- Pré-Injecções (motores Multi - jet do grupo Fiat)
- Pressão de sobrealimentação
- Regulação da geometria variável do turbo
- Limitadores de velocidade
- EGR

rpm mm ³ /cyc	Avanço (rpm, m(comb))/graus															
	2000	2250	2500	2750	3000	3250	3500	3750	3900	4000	4200	4400	4600	4800	5000	5300
0.0	8.9998	8.9998	9.0936	10.2888	10.4998	10.9920	11.9763	12.9841	13.6872	13.9919	14.9997	16.0075	17.0153	18.0231	19.4293	20.9996
5.0	8.9998	8.9998	8.9998	10.2888	10.4998	10.9920	11.9763	12.9841	13.6872	13.9919	14.9997	16.0075	17.0153	18.0231	19.4293	20.9996
10.0	4.8983	6.7030	7.8983	8.2967	10.4998	10.9920	12.2341	13.2419	13.9450	14.2497	15.2575	16.2653	17.2731	18.2809	19.7340	21.4214
15.0	4.1952	5.6952	7.7108	8.2967	10.4998	10.9685	12.4919	13.4997	14.2028	14.5075	15.5153	16.5231	17.5309	18.5387	20.2027	21.9839
20.0	4.1952	5.3905	7.5936	8.2967	10.4998	11.1091	12.7497	13.7575	14.4606	14.7653	15.7731	16.7809	17.7887	18.7965	20.6949	22.5230
25.0	4.4062	5.5077	8.1092	8.2967	10.4998	11.2732	13.0075	14.0153	14.7184	15.0231	16.0309	17.0387	18.0465	19.3121	21.4683	23.0854
30.0	4.4999	5.9061	8.2967	8.2967	10.4998	11.5310	13.2653	14.2731	14.9762	15.2809	16.2887	17.4606	18.5621	19.8277	22.1480	23.5307
35.0	4.8046	6.4920	8.5076	8.2967	10.4998	11.7888	13.5231	14.5309	15.2341	15.5387	16.5465	17.8121	19.0777	20.3433	22.6636	24.1635
40.0	5.2030	6.7967	8.5076	8.2967	10.4998	12.0232	13.7810	14.8825	15.4919	15.8668	16.8981	18.3277	19.5933	20.9058	23.2261	24.6557
45.0	5.5077	6.7967	8.6014	8.2967	10.4998	12.2107	13.9919	15.1403	15.9137	16.2418	17.3199	18.8199	20.0855	21.6324	23.6948	25.0073
49.6	4.7108	5.7889	7.4998	8.2967	10.4998	12.2107	13.9919	15.4215	16.2184	16.7106	17.8356	19.2652	20.6011	22.2417	23.9995	25.0073
55.0	2.5078	4.4999	6.4920	8.2967	10.4998	12.2107	13.9919	15.6794	16.5934	17.1793	18.3512	19.8277	21.2339	22.7339	23.9995	25.0073
60.0	2.5078	4.4999	6.4920	8.2967	10.4998	12.2107	13.9919	15.7965	16.8981	17.5074	18.7027	20.2027	21.7495	22.9917	23.9995	25.0073
65.0	2.5078	4.4999	6.4920	8.2967	10.4998	12.2107	13.9919	15.7965	16.8981	17.5074	18.7027	20.2027	22.0073	22.9917	23.9995	25.0073
70.0	2.5078	4.4999	6.4920	8.2967	10.4998	12.2107	13.9919	15.7965	16.8981	17.5074	18.7027	20.2027	22.0073	22.9917	23.9995	25.0073
75.0	2.5078	4.4999	6.4920	8.2967	10.4998	12.2107	13.9919	15.7965	16.8981	17.5074	18.7027	20.2027	22.0073	23.0620	24.0229	25.0073

Figura 73: Mapa Avanço de injeção do BMW X5 3.5d 286cv

4.5.4- Parâmetros objecto de estudo

O trabalho aqui apresentado vai abordar o sistema de injeção mais recente e actualmente o mais utilizado pelos fabricantes de automóveis, o common rail.

Referido anteriormente (ponto 4.5.3), os parâmetros que permitem otimizar a injeção deste tipo de sistema são: o caudal, o avanço, a pressão e o tempo de injeção. É sobre estes parâmetros que incidirá o estudo com vista a recuperar as perdas de potência proporcionadas pelo uso do biodiesel. O principal objectivo deste estudo consiste na procura de uma gestão electrónica do motor que permita obter níveis de potência com o biodiesel, semelhantes aos conseguidos com o gasóleo.

4.5.4.1- Tempo de injeção

O tempo de injeção é dos parâmetros mais importantes no sistema common rail e este tem na gestão electrónica vários mapas que regem a sua coordenação.

Os principais mapas do tempo de injeção são grandes matrizes compreendidas de 16x16 até 40x16. Este parâmetro é normalmente especificado em micro segundos e é definido em função de dois parâmetros que são o caudal de injeção e a pressão de injeção.

bar mm ³ /inj	Tempo de Injecção(p(rail),m(comb))/us																
	0	121	250	400	600	1000	1400	1800	1802	1804	1806	1801	1803	1805	1807		
0.00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
0.01	0	0	95	95	95	95	95	95	95	95	95	95	95	95	95	95	
0.20	0	0	325	305	241	206	184	171	167	165	163	162	161	161	161	161	
0.70	0	0	477	443	353	262	218	199	197	195	193	190	187	187	187	187	
1.00	0	0	549	507	397	285	238	215	212	210	206	201	197	197	197	197	
1.50	0	0	664	608	455	322	269	248	233	229	225	221	218	218	218	218	
2.00	0	0	735	673	508	366	294	269	252	243	236	231	226	226	226	226	
3.00	0	0	837	768	579	432	342	299	279	263	255	248	241	241	241	241	
5.00	0	0	998	917	699	512	422	376	341	303	284	267	251	251	251	251	
7.00	0	0	1147	1051	786	576	468	417	380	349	313	293	272	272	272	272	
10.00	0	0	1315	1205	903	656	527	463	421	385	360	332	304	304	304	304	
15.00	0	0	1569	1438	1090	789	629	541	487	443	414	387	361	361	361	361	
20.00	0	0	1844	1684	1273	918	724	622	552	512	474	441	407	407	407	407	
25.00	0	0	2121	1933	1455	1038	819	694	617	564	528	492	456	456	456	456	
32.00	0	0	2494	2270	1711	1214	947	802	714	647	594	556	518	518	518	518	
40.00	0	0	2914	2650	2004	1414	1100	917	818	745	675	631	587	587	587	587	
50.00	0	0	3438	3125	2370	1665	1288	1073	952	862	788	732	675	675	675	675	
60.00	0	0	3962	3600	2736	1916	1477	1226	1080	983	888	832	777	777	777	777	
70.00	0	0	4487	4076	3102	2167	1665	1379	1210	1097	987	923	859	859	859	859	
90.00	0	0	5535	5026	3833	2669	2042	1684	1468	1326	1186	1105	1024	1024	1024	1024	

Figura 74: Mapa do tempo de injeção Fiat Bravo 1.6 MJet 105cv

A figura 74 apresenta um mapa do tempo de injeção do Fiat Bravo 1.6 MJet de 105cv.

Diogo Ramos demonstrou que para a mesma pressão e tempo de injeção o caudal de biodiesel é inferior ao do gasóleo. Deste modo o aumento do tempo de injeção permitirá compensar este défice de combustível e assim aumentar as prestações do motor. O estudo da alteração deste parâmetro será um dos objectivos deste trabalho.

Perante a análise feita concluí-se que o aumento varia consoante a pressão de injeção porque quanto maior for a pressão menor é o tempo de injeção necessário para igualar os caudais.

4.5.4.2- Pressão de injeção

A pressão de injeção é um parâmetro fundamental no sistema common rail tendo este vários mapas para as variadas condições de utilização do motor e condução.

Os principais mapas da pressão de injeção são matrizes normalmente de 16x16 podendo haver mais pequenas. Os valores são apresentados em unidades de pressão bar e vêm expressos em função do caudal de injeção e rotação do motor.

rpm mm ³ /inj	p(rail) (rpm,m(comb))/bar															
	500	850	950	975	1000	1250	1500	1750	2000	2250	2500	3000	3500	4000	4500	5000
0.00	300	300	300	300	315	325	340	360	380	405	430	500	600	680	700	700
2.50	300	300	300	300	330	358	373	391	410	434	458	523	615	680	700	700
7.50	300	300	300	300	345	390	405	423	440	463	485	545	630	680	700	700
10.00	300	300	300	300	365	430	450	465	480	503	525	580	670	730	750	750
15.00	300	300	300	300	390	455	470	488	505	530	555	630	720	790	870	870
20.00	300	300	300	300	430	490	510	533	555	583	610	700	795	870	990	990
25.00	300	300	300	400	450	550	600	630	660	685	710	780	870	975	1150	1150
30.00	300	300	300	450	500	640	680	715	750	775	800	870	970	1070	1300	1300
35.00	300	300	300	500	525	755	790	820	850	883	915	1000	1105	1230	1450	1450
40.00	300	300	300	545	545	920	950	975	1000	1035	1070	1170	1265	1410	1600	1600
45.00	300	300	300	545	545	920	1000	1050	1100	1150	1200	1350	1460	1600	1600	1600
50.00	300	300	300	545	545	920	1020	1100	1180	1265	1350	1600	1600	1600	1600	1600
60.00	300	300	300	545	545	920	1040	1135	1230	1350	1450	1600	1600	1600	1600	1600
70.00	300	300	300	545	545	920	1040	1150	1230	1350	1450	1600	1600	1600	1600	1600
80.00	300	300	300	545	545	920	1040	1150	1230	1350	1450	1600	1600	1600	1600	1600
90.00	300	300	300	545	545	920	1040	1150	1230	1350	1450	1600	1600	1600	1600	1600

Figura 75: Mapa da pressão de injeção Fiat Bravo 1.6 MJet 105cv

A figura 75 mostra um mapa da pressão de injeção do Fiat Bravo 1.6 MJet de 105cv.

O aumento da pressão de injeção pode, também, ser a chave para este estudo pois Diogo Ramos constatou que aumentando a pressão de injeção se consegue igualar os caudais de injeção e o calor fornecido pela combustão.

Os aumentos necessários não são constantes e variam consoante o tempo e o caudal de injeção e valores da casa dos 50 a 100 bar de aumento deverão ser praticados.

4.5.4.3- Avanço de injeção

O avanço de injeção é um parâmetro com elevada importância pois o momento em que se proporciona a injeção vai ser preponderante no rendimento, potências e binários atingidos pelo motor.

rpm mm ³ /inj	Avanço (rpm,m(comb))/graus															
	500	850	950	975	1000	1250	1500	1750	2000	2250	2500	3000	3500	4000	4500	5000
0.00	-20.0	-30.0	-30.0	-30.0	-30.0	-27.5	-25.0	-24.5	-23.0	-23.0	-21.0	-14.0	-8.0	8.0	10.0	10.0
2.50	-20.0	-30.0	-30.0	-30.0	-30.0	-27.5	-25.0	-24.5	-23.0	-23.0	-21.0	-14.0	-8.0	8.0	10.0	10.0
7.50	-20.0	-30.0	-30.0	-30.0	-30.0	-27.5	-25.0	-24.5	-23.0	-23.0	-21.0	-14.0	-8.0	8.0	10.0	10.0
10.00	-20.0	-30.0	-30.0	-30.0	-30.0	-25.5	-23.0	-22.5	-21.0	-20.0	-19.0	-12.0	-6.0	8.0	10.5	10.5
15.00	-20.0	-30.0	-30.0	-25.0	-20.0	-17.0	-17.0	-16.5	-16.0	-14.0	-12.0	-6.0	-1.0	9.0	12.5	12.5
20.00	-12.0	-20.0	-20.0	-16.0	-12.0	-13.0	-14.5	-13.0	-12.5	-9.0	-6.0	-1.0	2.0	11.0	15.0	15.0
25.00	-5.0	-16.0	-16.0	-10.0	-7.0	-10.0	-12.0	-9.5	-9.0	-5.0	-2.0	1.5	5.0	13.0	17.0	17.0
30.00	-2.0	-10.0	-10.0	-5.0	2.0	-8.0	-10.0	-6.5	-6.0	-2.5	0.0	4.0	8.0	15.0	19.0	19.0
35.00	0.0	-5.0	-5.0	-5.0	2.0	-5.0	-8.0	-4.5	-4.0	-0.5	2.5	6.0	10.5	17.0	22.0	22.0
40.00	0.0	0.0	0.0	0.0	2.0	-1.5	-6.0	-4.0	-2.5	1.0	4.0	8.5	12.5	19.0	25.0	25.0
45.00	0.0	0.0	0.0	0.0	2.0	2.0	-5.0	-3.0	-1.0	2.0	5.0	10.0	14.0	20.5	25.0	25.0
50.00	0.0	0.0	0.0	0.0	2.0	2.0	-4.0	-2.0	0.0	3.0	6.0	11.0	15.5	22.0	25.0	25.0
60.00	0.0	0.0	0.0	0.0	2.0	2.0	-4.0	0.0	2.0	5.0	7.5	12.0	17.0	22.0	25.0	25.0
70.00	0.0	0.0	0.0	0.0	2.0	2.0	-4.0	0.0	4.0	6.5	9.0	12.0	17.0	22.0	25.0	25.0
80.00	0.0	0.0	0.0	0.0	2.0	2.0	-4.0	0.0	4.0	6.5	9.0	12.0	17.0	22.0	25.0	25.0
90.00	0.0	0.0	0.0	0.0	2.0	2.0	-4.0	0.0	4.0	6.5	9.0	12.0	17.0	22.0	25.0	25.0

Figura 76: Mapa avanço de injeção Fiat Bravo 1.6 MJet 105cv

A figura 76 mostra um mapa de avanço de injeção do Fiat Bravo MJet de 105cv.

As gestões electrónicas dos motores normalmente têm vários mapas para o avanço de injeção que facilmente passam a casa das dezenas. Estes mapas vêm expressos em função do caudal de injeção e rotação do motor. O avanço, após conveniente conversão vem expresso em unidade de graus.

O ponto de injeção é fundamental para o rendimento do motor sendo muito importante saber o ponto óptimo ou próximo dele onde a angulação é mais proveitosa para as condições momentâneas de funcionamento do motor.

O valor de avanço não é constante e este vai variando consoante e dependentemente dos valores de caudal de injeção e rotação do motor. Um aumento ou decréscimo excessivo dos valores de avanço originam obrigatoriamente numa perda de potência e até uma possível danificação do motor.

A optimização conveniente deste parâmetro para o combustível em questão, pode contribuir para a recuperação da potência perdida e pode ser uma possível solução para este estudo.

O comportamento dentro de valores limite deste parâmetro no gasóleo em efeitos práticos, define-se como: aumentando o avanço implica um aumento de potência e vice-versa.

4.6- Máquina de programação

A optimização da gestão electrónica é normalmente efectuada através da leitura dos dados originais do automóvel, a optimização desses dados e por fim a escrita do novo ficheiro com os parâmetros optimizados, no interior da memória da centralina. Este processo é feito através de máquinas de programação e neste trabalho vai ser utilizada a máquina da CMD Technologies srl, modelo CMD Flash OBD / BDM tool (fig.77).



Figura 77: Hardware CMD flash

A CMD flash é actualmente uma das melhores máquinas de programação de automóveis existentes no mercado mundial destacando-se pelo variado ramo de aplicações e tipo de veículos que consegue intervir: automóveis, motociclos, camiões, autocarros, barcos, tractores agrícolas, kartings, etc. Todos os principais métodos de programação estão ao alcance deste módulo sendo eles OBD , BDM (fig.79) e boot mode.

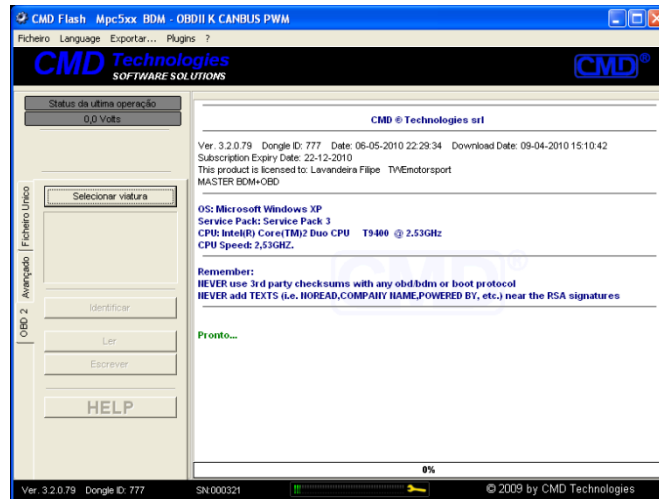


Figura 78: Software CMD flash

A figura 78 ilustra o ambiente principal do software da máquina de programação CMD flash. Os ficheiros das gestões electrónicas têm em quase todos os casos o checksum associado e como tal ao ser feito um novo ficheiro na base do original tem obrigatoriamente de ser recalculado o checksum.

Nas centralinas mais actuais do grupo Bosch (modelos edc16 e edc17) para além de precisarem do recálculo do checksum necessitam também do recálculo do RCA, sendo o método normalmente efectuado pelo software que se utiliza para a modificação e optimização do ficheiro.

O método de funcionamento desta máquina vai ao ponto de ela própria fazer esse recálculo e que portanto, o software de modificação do ficheiro poderá nem possuir essa opção que posteriormente a CMD flash fará esse trabalho.



Figura 79: Método de programação por BMD

A lista de aplicação deste hardware é muito extensa no campo dos veículos mas as suas funcionalidades também são várias e para além das já anunciadas destaca-se o facto de esta puder ler e programar, processadores e immobilizadores das centralinas. Ler e programar immobilizadores pode ser muito útil no âmbito diário em que se um veículo tiver problemas na centralina e tiver que a substituir, a CMD flash consegue alterar o immobilizador da centralina antiga para a nova e assim o veículo funcionará devidamente bem.

4.7- Banco de potência

Os testes para o biodiesel foram feitos em banco de potência de marca Maha LPS2000 (fig.80), constituído por 2 eixos, frontal e traseiro que permite testes a automóveis com 2 ou 4 rodas motrizes, propriedade de Autoperformance.

No mundo dos bancos de potência existem dois grandes tipos quanto ao seu método de funcionamento, de inércia e de freio. Os bancos de inércia são mais susceptíveis a erros de medição devido à sua fraca precisão enquanto que os de freio são mais fiáveis e com leituras rigorosas e precisas.



Figura 80: Banco de potência Maha LPS2000

O banco em questão tem uma capacidade de leitura de até 700cv à roda, mede parâmetros como a temperatura e pressão atmosféricas, factores essenciais para o posterior cálculo da potência normalizada. Outros dados que são fornecidos por um teste efectuado são um gráfico de potência, rotação do motor e binário com discriminação da potência normal, potência do motor, potência á roda, potência de perda, binário máximo, rpm máxima etc.

4.8- Veículo

O veículo para o ensaio dos vários testes para a análise do biodiesel foi uma escolha ponderada, entrando sempre em conta a condição obrigatória de ser possuidor do sistema de injeção common rail. Perante tais requisitos optou-se por um Fiat Bravo 1.6 JTD MJet de 105cv do ano 2008 (fig.81) devido ao seu sistema de injeção common rail muito evoluído, com uma pressão máxima de injeção de 1600 bar, sistema de pré-injecções, filtro de partículas, baixa cilindrada, potência modesta, gestão electrónica e sistema de injeção da vanguarda (Bosch).



Figura 81: Fiat Bravo 1.6 JTD MJet 105cv

4.8.1- Dados do Fabricante

Na tabela 13 vão ser descritas os dados fornecidos pelo fabricante sobre o veículo em questão:

Tabela 13: Dados técnicos Fiat Bravo 1.6 JTD MJet 105cv

Motor

Combustível	Gasóleo
Localização	Dianteiro
Orientação	Transversal
Disposição	Linha
Número de cilindros	4
Cilindrada (cc)	1 598
Distribuição	Dupla árvore de cames à cabeça
Nº de Válvulas por cilindro	4
Potência Máxima (cv)	105
Regime potência máxima (rpm)	4 000
Binário Máximo (Nm)	290
Regime binário máximo (rpm)	1 500
Filtro de Partículas	Sim

Turbo

Tipo	Geometria variável
Marca	Garrett
Modelo	GTB1446SZ
Referência	766891-0001
Controlo da Wastegate	Vácuo
Pressão Máxima (bar)	1,63

Transmissão

Tracção	Dianteira
Tipo de caixa	Manual
Número de velocidades	6

Travões

Dianteiros	Discos ventilados
Traseiros	Discos

Direcção

Tipo	Pinhão e cremalheira
Diâmetro de viragem entre passeios (m)	10,4

Chassis

Dimensões	
Comprimento (mm)	4 336
Largura (mm)	1 792
Altura (mm)	1 498
Distância entre eixos (mm)	2 600
Pesos	
Tara (kg)	1 320
Capacidade	
Mala (l)	400
Depósito (l)	58
Pneus	
Dianteiros	205/55R16
Traseiros	205/55R16

Prestações

Performance	
Velocidade máxima (km/h)	187
Aceleração dos 0-100 km/h (seg)	11,3
Consumos	
Urbano (l/100km)	6,3
Extra-Urbano (l/100km)	4,1
Combinado (l/100km)	4,9
Emissões CO ₂ (g/km)	119

4.8.2- E.C.U. (Centralina)

A centralina deste automóvel (fig.82) é outro dos pontos fortes pois mesmo não sendo o modelo mais actual da Bosch é a mais desenvolvida do grupo Fiat e é uma versão de elevada

precisão, fiabilidade, muito completa a nível de mapas, tamanho do ficheiro da gestão do motor de 2048kb, sendo este o tamanho dos ficheiros dos carros actuais com as centralinas mais desenvolvidas.

Na tabela 14 são expostas algumas características desta centralina:

Tabela 14: Dados técnicos da centralina Fiat Bravo 1.6 JTD MJet 105cv

Centralina	
Marca	Bosch
Modelo	EDC16C39
Código Fiat	51829421
Hardware	0281015401
Software	1037395323
Método de comunicação	OBD / BDM
Tamanho ficheiro da gestão electrónica	2 048 kb
Máquina utilizada para a programação	CMD flash 43min
Tempo de leitura do ficheiro	50seg
Tempo de escrita do ficheiro	1min 5seg

O trabalho de leitura e programação foi feito por OBD, ficha de comunicação ISO que neste automóvel se encontra no interior do habitáculo por baixo do volante ao lado esquerdo.

Este método de comunicação permite que as programações sejam rápidas e seguras enquanto que o método BDM é ainda mais seguro mas em contrapartida o tempo de preparação para a leitura e programação é muito mais demorado. Curiosamente neste automóvel a leitura feita por BDM é bem mais rápida que por OBD e os tempos de escrita por OBD e BDM são aproximadamente iguais.

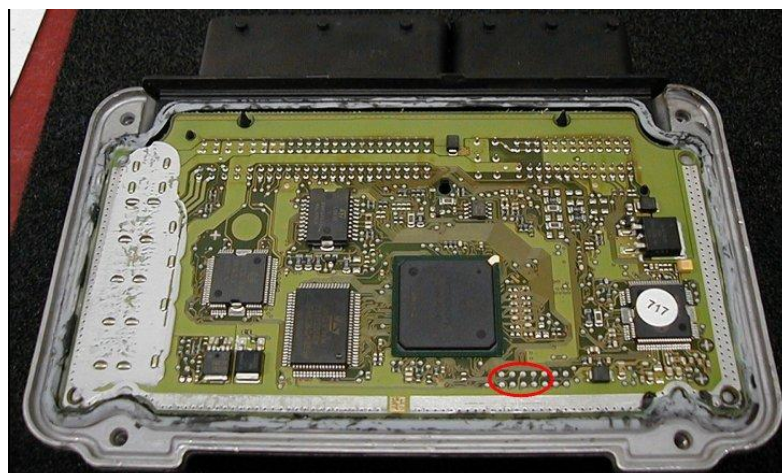


Figura 82: Centralina do Fiat Bravo 1.6 JTD MJet 105cv

5- Resultados e sua discussão

5.1- Mapeamento inicial

A análise dos testes realizados e identificados anteriormente permitiu definir, quais as modificações ou correcções a efectuar na gestão electrónica original de forma a aumentar a potência obtida com a pela utilização do biodiesel.

Ao nível do tempo de injeção verifica-se que com o biodiesel para o mesmo tempo, o caudal de injeção é inferior em cerca de 5%. Para ter um caudal de biodiesel semelhante ao gasóleo será necessário ter um aumento de pressão de injeção de aproximadamente 50 bar. Este aumento deve-se ao facto do biodiesel ter uma viscosidade cinemática cerca três vezes superior ao gasóleo. Na tentativa de obter o mesmo nível de potência foi decidido aumentar em 5% e 50 bar o tempo e pressão de injeção respectivamente.

A modificação destes dois parâmetros, apenas entra em conta com os factores já descritos mas não tendo em consideração o facto de o biodiesel ter um PCI 11% inferior ao do gasóleo. Apesar de este facto ser muito importante, começou-se por fazer um mapeamento apenas com as considerações iniciais de 5% de tempo de injeção (fig.83) e 50 bar a mais na pressão de injeção (fig.84) para se verificar se há aproximação aos valores de potência obtidos utilizando o gasóleo.

bar mm ³ /inj	Tempo de Injecção(p(rail),m(comb))/us																			
	0	120	121	200	250	400	600	800	1000	1200	1400	1600	1800	1801	1802	1803	1804	1805	1806	1807
0.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.20	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.70	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1.00	0.0	0.0	0.0	4.9	4.7	4.9	4.6	4.6	4.7	4.7	4.8	4.9	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5
1.50	0.0	0.0	0.0	4.9	4.8	4.9	4.8	4.8	4.7	4.8	4.8	4.9	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5
2.00	0.0	0.0	0.0	4.9	4.9	4.9	4.7	4.8	4.7	4.9	4.6	4.7	4.8	4.8	4.8	4.8	4.8	4.8	4.8	4.8
3.00	0.0	0.0	0.0	4.9	4.8	4.8	4.9	4.6	4.6	4.9	4.7	4.8	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9
5.00	0.0	0.0	0.0	4.9	4.8	4.8	4.9	4.7	4.9	4.9	4.9	4.8	4.7	4.7	4.7	4.7	4.7	4.7	4.7	4.7
7.00	0.0	0.0	0.0	4.9	4.9	4.8	4.9	4.7	5.0	4.8	4.7	4.7	4.7	4.7	4.7	4.7	4.7	4.7	4.7	4.7
10.00	0.0	0.0	0.0	4.9	4.9	4.8	4.9	4.9	4.9	4.9	5.0	4.8	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9
15.00	0.0	0.0	0.0	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9	4.8	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9
20.00	0.0	0.0	0.0	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9	4.8	4.8	4.8	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9
25.00	0.0	0.0	0.0	4.9	4.9	4.9	4.8	4.8	4.8	4.8	4.9	4.9	4.8	4.8	4.8	4.8	4.8	4.8	4.8	4.8
32.00	0.0	0.0	0.0	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9	4.8	4.8	4.8	4.8	4.8	4.8	4.8	4.8	4.8	4.8
40.00	0.0	0.0	0.0	4.9	4.9	4.9	5.0	4.9	4.8	4.9	4.8	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9
50.00	0.0	0.0	0.0	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9	4.8	4.8	4.8	4.8	4.8	4.8	4.8
60.00	0.0	0.0	0.0	5.0	4.9	4.9	4.9	4.9	5.0	4.9	4.9	4.9	4.9	4.8	4.8	4.8	4.8	4.8	4.8	4.8
70.00	0.0	0.0	0.0	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9	4.8	4.8	4.8	4.8	4.8	4.8	4.8
90.00	0.0	0.0	0.0	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9

Figura 83: Mapa de incrementos de 5% no Tempo de Injecção

rpm mm ³ /inj	p(rail)(rpm,m(comb))/bar															
	500	850	950	975	1000	1250	1500	1750	2000	2250	2500	3000	3500	4000	4500	5000
0.00	0	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
2.50	0	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
7.50	0	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
10.00	0	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
15.00	0	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
20.00	0	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
25.00	0	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
30.00	0	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
35.00	0	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
40.00	0	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
45.00	0	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
50.00	0	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
60.00	0	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
70.00	0	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
80.00	0	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
90.00	0	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50

Figura 84: Mapa de incrementos de 50 bar na Pressão de Injecção

5.2- Resultados dos vários mapeamentos

Os testes, como já foi referido anteriormente (ponto 4.7), foram feitos em banco de potência e vão ser analisados seguidamente ensaio a ensaio sendo identificadas e descritas todas as intervenções efectuadas na gestão electrónica e os consequentes resultados práticos.

Os testes foram realizados com condições atmosféricas praticamente constantes pois durante os dois dias de ensaios a temperatura e pressão atmosférica praticamente não variaram rondando sempre os 18° e 22° de temperatura mínima e máxima respectivamente e de 996 mbar e 1002 mbar de pressão atmosférica mínima e máxima respectivamente.

5.2.1- Teste com gasóleo

O primeiro teste efectuado foi com a gestão electrónica com os parâmetros originais e com combustível gasóleo comum das bombas de abastecimento (gasóleo) (resultado em anexo Nr. Placa: Diesel).

A análise deste teste permite constatar que os dados anunciados pelo fabricante se revelam um pouco conservadores pois esta viatura revelou ter mais 10cv e 11Nm. O valor onde o binário máximo surge (1500rpm) é um pouco optimista devido ser necessária uma elevada pressão de sobrealimentação e consequentemente o turbo teria que conseguir atingir elevadas rotações onde nesse regime os níveis de caudal de gases de escape são baixos.

Ao longo deste e dos testes seguintes o binário máximo surge sempre por volta das 2000rpm com nenhuma situação registada abaixo desse valor.

A curva da potência à roda revela uma concavidade negativa acentuada o que demonstra um bom desempenho nos baixos regimes mas comprometedor nos elevados, sendo a partir das

4000rpm um regime medíocre sendo muito complicado ultrapassar as 4300rpm devido à curva de potência dissipada quase igualar a da potência à roda.

Futuramente e independentemente dos valores de potência e binário atingidos procurou-se manter a mesma metodologia de ensaio e como tal, foi estipulado não ser efectuadas mais de 4400rpm por teste.

O valor de potência máxima surge às 3470rpm mas ao ser feita uma análise cuidada, esse valor de rotação é pouco relevante pois o valor de potência máxima praticamente se mantém entre as 3000rpm e as 4000rpm.

Os ensaios desde o primeiro até ao último teste foram sempre feitos na 2ª rampa de teste, isto é, a rampa mais longa.

5.2.2- Teste com biodiesel

O segundo teste foi manter a gestão electrónica original mas com o combustível biodiesel após ter sido efectuada a devida limpeza do depósito e circuito de combustível. Os resultados são apresentados nos anexos Nr. placa: Biodiesel original.

O resultado após toda a informação já conhecida pela apresentação nos pontos transactos confirmou as expectativas das perdas do biodiesel. Ao longo de todo o regime houve perda de potência que variou entre os 3.5% e os 11% sendo curioso constatar-se que essa perda é praticamente constante das 2000 às 4000rpm (10%) (fig.85).

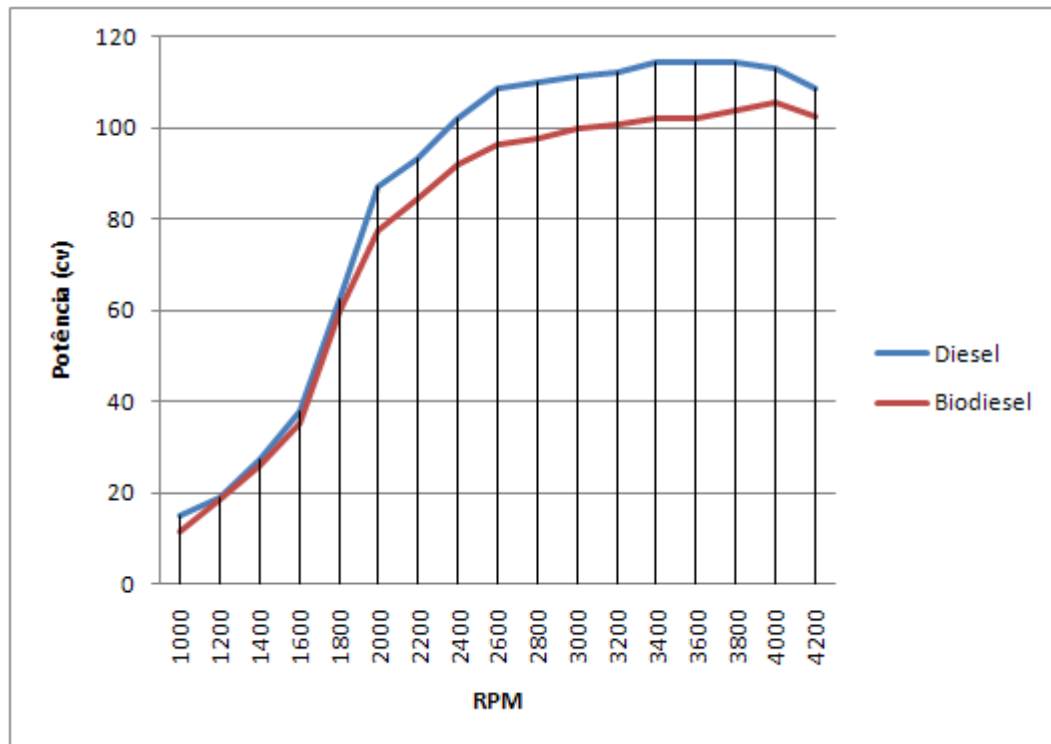


Figura 85: Comparação gráfica de potências entre Gasóleo e biodiesel

Tabela 15: Comparação numérica de potências entre Gasóleo e biodiesel

rpm	Potência(cv)			
	Gasóleo	Biodiesel	Perdas	Perdas (%)
1000	14,96	11,56	3,4	22,73
1200	19,04	18,36	0,68	3,57
1400	27,2	25,84	1,36	5,00
1600	38,08	35,36	2,72	7,14
1800	62,56	59,84	2,72	4,35
2000	87,04	77,52	9,52	10,94
2200	93,16	84,32	8,84	9,49
2400	102	91,8	10,2	10,00
2600	108,8	96,56	12,24	11,25
2800	110,16	97,92	12,24	11,11
3000	111,52	99,96	11,56	10,37
3200	112,2	100,64	11,56	10,30
3400	114,24	102	12,24	10,71
3600	114,24	102	12,24	10,71
3800	114,24	104,04	10,2	8,93
4000	112,88	105,4	7,48	6,63
4200	108,8	102,68	6,12	5,63

Segundo a tabela 15 o valor de potência máxima revelou-se idêntico ao anunciado pelo fabricante, aproximadamente 105 cv e o valor de binário máximo demonstrou-se bem inferior. Resumidamente, com o biodiesel perdeu-se 10cv no regime de potência máxima e 30 Nm de binário máximo. A nível prático, os 10 cv no regime elevado são relevantes mas os 30 Nm de perda são de maior importância e completamente notórios numa condução diária prejudicando muito a agradabilidade de condução, aumento do esforço do motor, necessidade de uso de maiores rotações, maior recurso á caixa de velocidades, consumos prejudicados, etc.

O valor de binário máximo ocorre aproximadamente 200 rpm mais tarde que o original fazendo todo o sentido devido ao facto que anteriormente se constatar que para as mesmas pressões e tempos de injeção com o biodiesel, há uma injeção inferior de combustível face ao gasóleo causando uma diminuição do calor gerado por combustão, diminuição do caudal de gases de escape, inferiores rotações atingidas pelo turbo, diminuição da rapidez e enchimento do turbo e como consequência a obrigatória o menor valor de binário máximo e aumento da rotação do motor onde este máximo ocorre.

A potência máxima é atingida às 3960rpm e não deixando de ser curioso o facto de que após as 4000rpm existir uma pequena recuperação mas nunca igualando o gasóleo.

No final do teste verifica-se a aproximação e eminente cruzamento das curvas de potência á roda e dissipada revelando um péssimo comportamento do biodiesel nesses regimes.

No dia seguinte foi efectuado outro teste nas mesmas condições de gestão electrónica mas agora com o biodiesel mais quente, isto é, o teste anterior possivelmente o biodiesel não devia estar a uma temperatura uniforme e ideal pois este foi efectuado logo após a introdução do biodiesel. O teste é apresentado em anexos Nr. placa: Biodiesel Original 2.

O aumento de potência e binário foi verificado sendo uma diferença significativa onde se obteve mais 2 cv e um ligeiro aumento de binário mas com um pormenor curioso de este

ocorrer mais “cedo” (2030rpm) talvez devido ao facto de o biodiesel estar mais quente, logo mais líquido e uma fluidez superior prejudicando inferiormente o caudal de injeção.

5.2.3- 1º Mapeamento

O primeiro mapeamento foi com os incrementos propostos no ponto 4 que entrava em consideração com o decréscimo de caudal de injeção e o necessário aumento de pressão de injeção. Os resultados para o aumento do tempo de injeção em 5% e da pressão de injeção em 50 bar passando a pressão máxima de 1600 bar para 1650 bar, são apresentados em anexos Nr. placa: Biodiesel Prog 1.

As modificações neste primeiro mapeamento não atingiram os valores do gasóleo mas recuperaram grande parte das perdas embora que nos baixos regimes (<2000rpm) não surgiram grandes melhorias como pode ser constatado na figura 86.

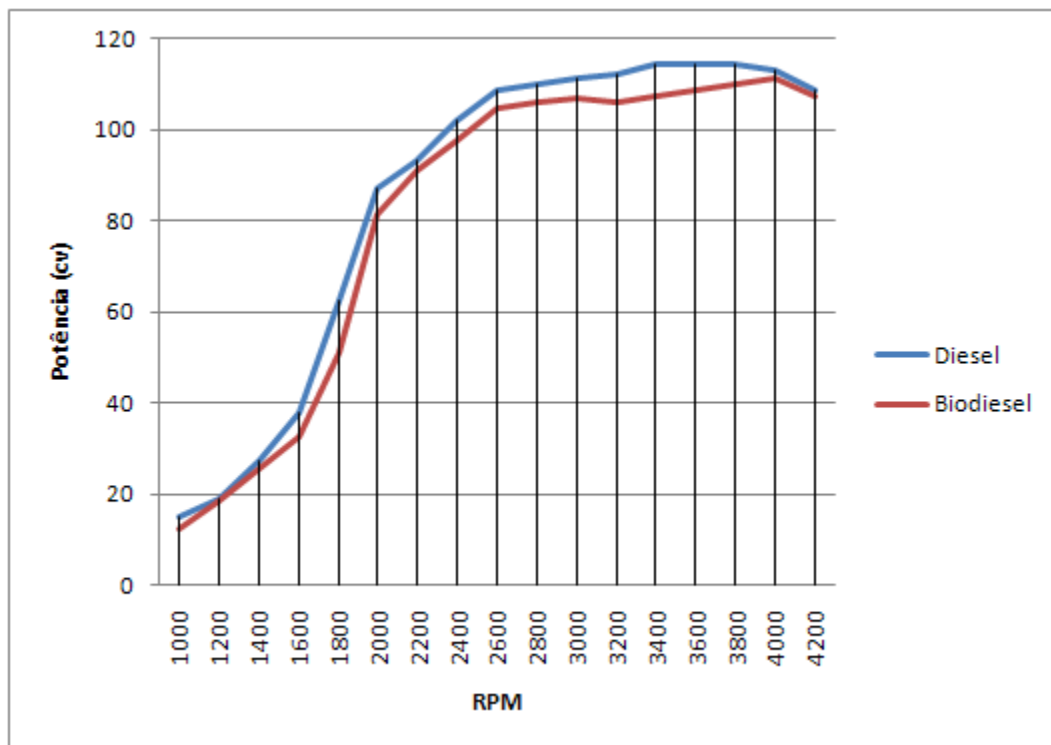


Figura 86: Comparação gráfica de potências entre Gasóleo e biodiesel Prog 1

Tabela 16: Comparação numérica de potências entre Gasóleo e biodiesel Prog 1

rpm	Potência(cv)			
	Gasóleo	Biodiesel	Perdas	Perdas (%)
1000	14,96	12,24	2,72	18,18
1200	19,04	18,36	0,68	3,57
1400	27,2	25,5	1,7	6,25
1600	38,08	32,64	5,44	14,29
1800	62,56	51	11,56	18,48
2000	87,04	81,6	5,44	6,25
2200	93,16	91,12	2,04	2,19
2400	102	97,92	4,08	4,00
2600	108,8	104,72	4,08	3,75
2800	110,16	106,08	4,08	3,70
3000	111,52	106,76	4,76	4,27
3200	112,2	106,08	6,12	5,45
3400	114,24	107,44	6,8	5,95
3600	114,24	108,8	5,44	4,76
3800	114,24	110,16	4,08	3,57
4000	112,88	111,52	1,36	1,20
4200	108,8	107,44	1,36	1,25

Analisando a tabela 16 os valores de perdas poucas vezes ultrapassaram os 5% das 2000rpm até ao final do teste demonstrando que neste regime metade das perdas foram recuperadas. Os menores ganhos nos baixos regimes indicam que nesta faixa vai ser a parte mais complicada para obter ganhos de potência principalmente devido á dificuldade de fluidez, menor caudal e menor PCI do biodiesel pois neste regime inicial é onde a pressão de injeção, caudais de injeção e pressão de sobrealimentação são mais baixos.

A comparação entre o teste anterior (tabela 15) e este é visível uma grande melhoria nos regimes médios e altos (>2000 rpm) e uma pequena melhoria nos baixos regimes (<2000 rpm) derivado possivelmente, ao facto da parte sensorial dos motores estar toda interligada entre si e como tal, os parâmetros estão na globalidade dependentes uns dos outros. Explicando melhor, a gestão rege da seguinte forma: os parâmetros lidos pelo conjunto dos sensores agem dependentemente uns dos outros e como tal o parâmetro que tiver menor valor vai ser o que vai condicionar todos os outros e é por este facto que as melhorias foram inferiores nos baixos regimes e melhores nos restantes.

Porquê piores resultados em baixos regimes?

O biodiesel tem uma viscosidade superior em cerca de 3 vezes face ao gasóleo o que implica maiores dificuldades de fluidez. Além desse facto os caudais de injeção são inferiores assim como o PCI. O resultado destes factos traduz-se na prática, em menores caudais de injeção implicando menores caudais de gases de escape e como tal diminui o enchimento do turbo e este passa a ser um dos condicionadores para aumentos de potência em baixos regimes. O turbo sendo mais lento a encher provocando uma menor pressão de sobrealimentação vai

implicar menor caudal de ar aspirado pelo motor registado pelo medidor de massa de ar. O medidor de massa de ar está directamente relacionado com o caudal de injeção e com a sonda lambda e como tal para menores valores de caudal de ar correspondem menores valores de injeção.

Resumidamente nos baixos regimes temos dois problemas causados pelo biodiesel que são as suas características físicas e químicas que provocam perdas de potência e para além disso criam o fenómeno de défice a nível sensorial acima descrito.

Porquê melhores resultados em médios e elevados regimes?

Ao serem atingidos estes regimes os valores pressão de injeção são superiores, parâmetro fundamental para a fluidez do biodiesel e os valores de pressão de turbo pretendidos já foram atingidos e como tal o problema a nível sensorial é muito atenuado. Neste regime só existe fundamentalmente a agravante dos factores físicos e químicos do biodiesel para serem analisados e posteriormente recuperados com devida parametrização da gestão electrónica.

Os resultados foram os esperados já que os valores de incremento não iriam recuperar todas as perdas pois não foi entrado em consideração inicialmente, um factor preponderante do biodiesel ter um PCI muito inferior ao gasóleo.

O valor de potência máxima surge a um regime mais tardio face ao gasóleo, factor já esperado pois no teste primário do biodiesel o mesmo se verificou. O motor com estas características vinca a um motor pontudo em vez de redondo como é pretendido.

O binário máximo surge sensivelmente á mesma rotação que o original com biodiesel mas com um valor superior (mais 14 Nm) e este facto reside essencialmente no parâmetro tempo de injeção pois no mapeamento foi incrementado 5%. Em baixas rotações o valor da temporização é muito superior ao de elevadas rotações e como tal o valor de incremento (5%) também se torna maior.

Verifica-se a característica de irregularidades nas curvas de potências úteis demonstradas no teste original com biodiesel face ao gasóleo. Este facto prejudica a agradabilidade de condução e rendimentos do automóvel a regimes baixos e intermédios.

5.2.4- 2º Mapeamento

O segundo mapeamento consistiu no aumento da temporização de injeção em 8% e a pressão de injeção em 100 bar relativamente ao mapeamento original, ambos em todo o regime e os resultados estão descritos em anexos no teste Nr. placa: Biodiesel Prog 2.

As primeiras impressões observadas na figura 87 são os valores de potência e binários máximos praticamente iguais aos do gasóleo com ligeira inferioridade para o biodiesel e os valores de rotação onde estes dois pontos máximos surgem são idênticos aos do primeiro mapeamento (ponto 5.2.3).

As irregularidades das curvas úteis de potência continuam a verificar-se.

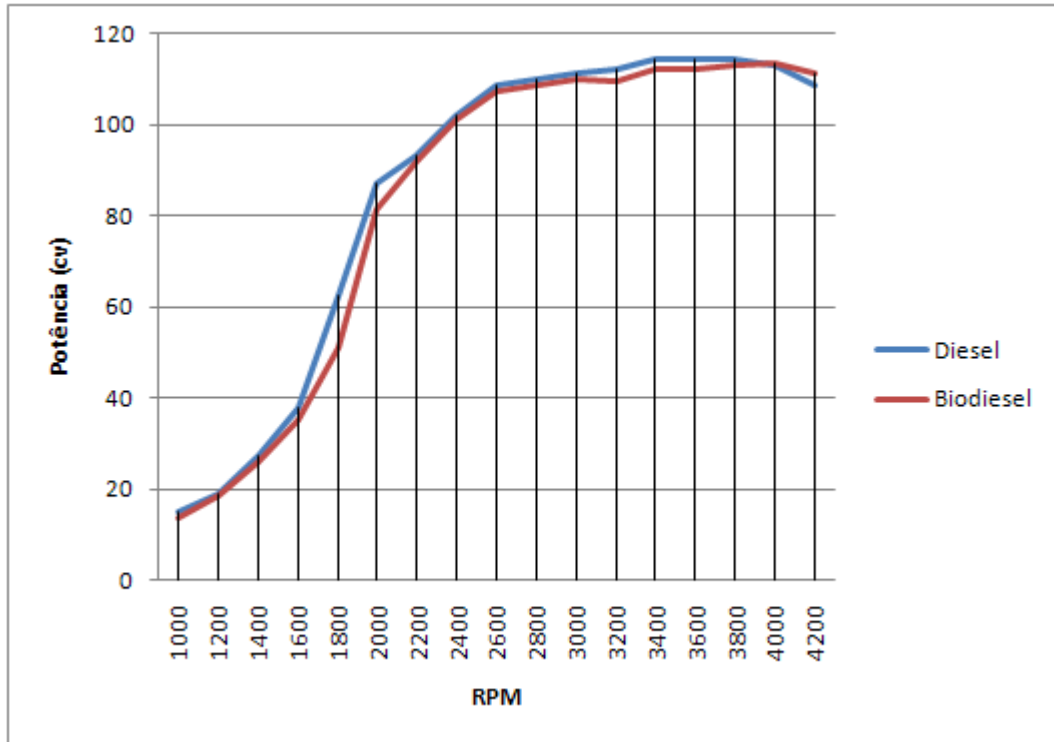


Figura 87: Comparação gráfica de potências entre Gasóleo e biodiesel Prog 2

Tabela 17: Comparação numérica de potências entre Gasóleo e biodiesel Prog 2

PROG2 rpm	Potência(cv)			Perdas (%)
	Gasóleo	Biodiesel	Perdas	
1000	14,96	13,6	1,36	9,09
1200	19,04	18,36	0,68	3,57
1400	27,2	25,84	1,36	5,00
1600	38,08	35,36	2,72	7,14
1800	62,56	51	11,56	18,48
2000	87,04	81,6	5,44	6,25
2200	93,16	91,8	1,36	1,46
2400	102	101,32	0,68	0,67
2600	108,8	107,44	1,36	1,25
2800	110,16	108,8	1,36	1,23
3000	111,52	110,16	1,36	1,22
3200	112,2	109,48	2,72	2,42
3400	114,24	112,2	2,04	1,79
3600	114,24	112,2	2,04	1,79
3800	114,24	112,88	1,36	1,19
4000	112,88	113,56	-0,68	-0,60
4200	108,8	111,52	-2,72	-2,50

Analisando a tabela 17 as perdas em baixos regimes (<2000 rpm) são ainda significativas mas com melhorias face ao mapeamento anterior.

Os valores de potência e binário após as 2000 rpm foram praticamente recuperados e igualados ao gasóleo verificando-se que para além das 4000 rpm o biodiesel possui melhores prestações que o diesel.

A conclusão principal extraída deste mapeamento face ao primeiro é na medida em que os ganhos a nível de binário foram inferiores aos ganhos de potência máxima facto esse explicado pelo incremento de temporização de injeção ter sido inferior ao valor de aumento da pressão de injeção. Perante estes parâmetros de aumento os baixos regimes foram menos favorecidos que os elevados pois o incremento global de tempo de injeção privilegia mais os baixos regimes e a pressão de injeção os elevados.

5.2.5- 3º Mapeamento

O terceiro mapeamento (fig. 83) incidiu essencialmente no objectivo de alcançar o valor de binário máximo do gasóleo.

As alterações na parametrização foram o aumento do tempo de injeção em 10% face ao original e a pressão de injeção manteve-se nos 1700 bar obtendo-se os resultados em anexos no teste Nr. placa: Biodiesel Prog 3.

Algumas irregularidades das curvas de potência úteis foram verificadas.

O valor de binário máximo surge agora acima do pretendido assim como o valor de potência máxima visto a temporização de injeção ter sido aumentada em toda faixa de rotação. Comparativamente aos testes anteriores devido á ausência de aumento de pressão de injeção face ao 2º mapeamento e apenas aumentando a temporização de injeção, os ganhos de binário (+ 8Nm) foram superiores aos de potência máxima (+ 2,7cv).

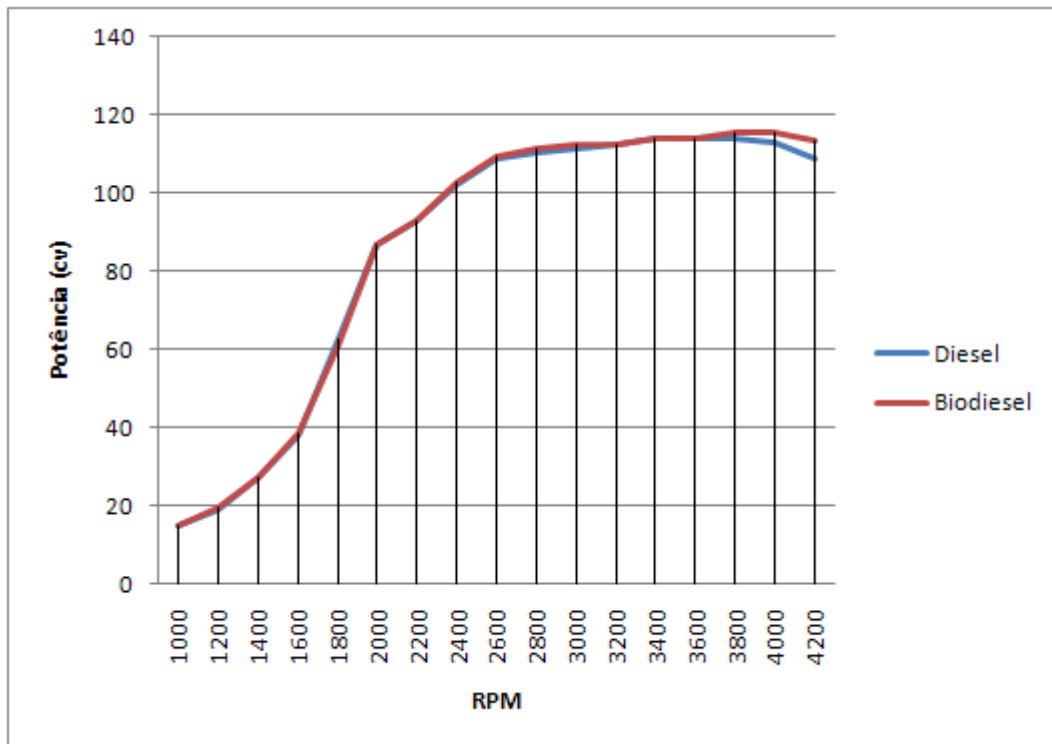


Figura 88: Comparação gráfica de potências entre Gasóleo e biodiesel Prog 3

Tabela 18: Comparação numérica de potências entre Gasóleo e biodiesel Prog 3

PROG3 rpm	Potência(cv)			
	Gasóleo	Biodiesel	Perdas	Perdas (%)
1000	14,96	14,96	0	0,00
1200	19,04	19,72	-0,68	-3,57
1400	27,2	27,2	0	0,00
1600	38,08	38,76	-0,68	-1,79
1800	62,56	61,2	1,36	2,17
2000	87,04	86,7	0,34	0,39
2200	93,16	93,16	0	0,00
2400	102	102,68	-0,68	-0,67
2600	108,8	109,48	-0,68	-0,62
2800	110,16	111,52	-1,36	-1,23
3000	111,52	112,2	-0,68	-0,61
3200	112,2	112,2	0	0,00
3400	114,24	114,24	0	0,00
3600	114,24	114,24	0	0,00
3800	114,24	115,6	-1,36	-1,19
4000	112,88	115,6	-2,72	-2,41
4200	108,8	113,56	-4,76	-4,37

Na análise da tabela 18 verifica-se que todas as perdas foram recuperadas, com uma pequena excepção às 1800 rpm, porém em termos práticos (condução diária) são perdas praticamente insensíveis.

No regime após as 2000 rpm constata-se que os valores de potência do biodiesel são sempre superiores aos do gasóleo.

Apesar de não ser esta nem a anterior a solução que iguala o gasóleo, pode-se facilmente concluir que do misto das duas se obtém praticamente o comportamento do gasóleo, isto é, aproveitando o terceiro mapeamento até as 2000 rpm e uma parametrização intermédia entre os dois mapeamentos para o regime após as 2000 rpm. Resumidamente, com 100 bar a mais de pressão de injeção e 9% de temporização de injeção consegue-se o resultado pretendido.

O terceiro mapeamento foi onde se conseguiu ultrapassar as performances do gasóleo e então, decidiu-se imediatamente a seguir executar um teste com os parâmetros originais para observar o comportamento do motor após algum tempo de estudos e obteve-se o resultado em anexos no teste Nr. placa: Biodiesel Original 3.

O que se previa demonstrou-se, isto é, o automóvel encontrava-se há algum tempo em testes de banco de potência e muito provavelmente estivesse demasiado quente afectando a eficiência do motor. Os piores resultados foram obtidos neste teste o que prova que numa situação em condições menos severas, o terceiro mapeamento tivesse resultados superiores aos registados na figura 89 e tabela 19.

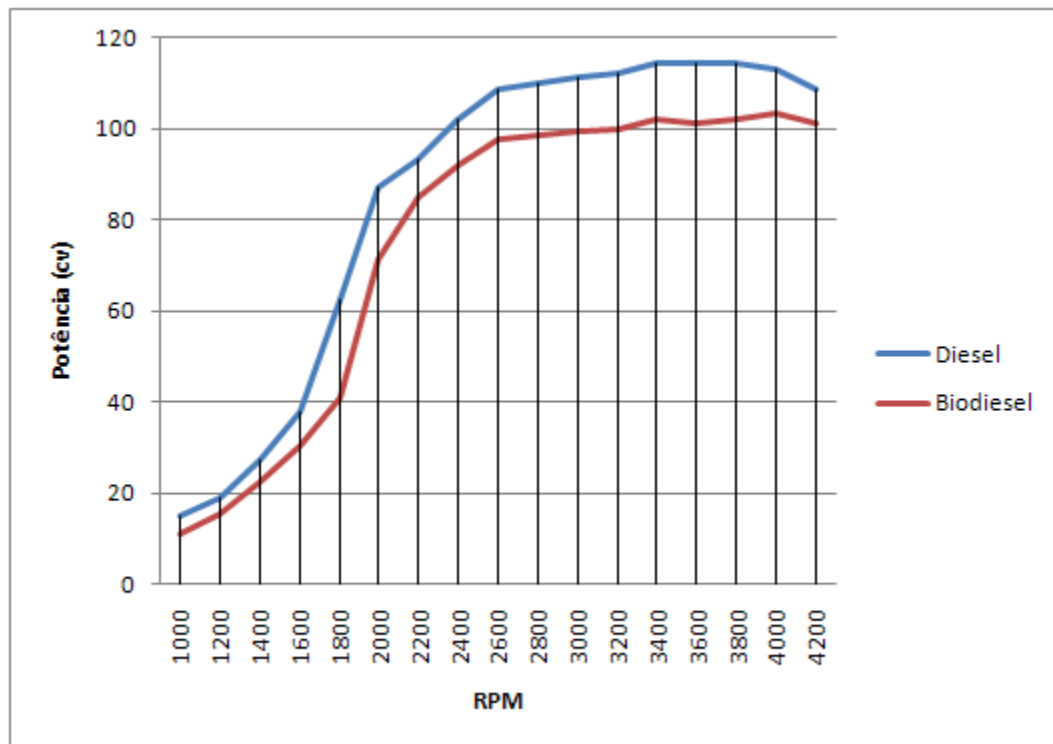


Figura 89: Comparação gráfica de potências entre Gasóleo e biodiesel Original 3

Tabela 19: Comparação numérica de potências entre Gasóleo e biodiesel Original 3

rpm	Potência(cv)			
	Gasóleo	Biodiesel	Perdas	Perdas (%)
1000	14,96	10,88	4,08	27,27
1200	19,04	15,3	3,74	19,64
1400	27,2	22,44	4,76	17,50
1600	38,08	30,6	7,48	19,64
1800	62,56	40,8	21,76	34,78
2000	87,04	71,4	15,64	17,97
2200	93,16	85	8,16	8,76
2400	102	91,8	10,2	10,00
2600	108,8	97,92	10,88	10,00
2800	110,16	98,6	11,56	10,49
3000	111,52	99,28	12,24	10,98
3200	112,2	99,96	12,24	10,91
3400	114,24	102	12,24	10,71
3600	114,24	101,32	12,92	11,31
3800	114,24	102	12,24	10,71
4000	112,88	103,36	9,52	8,43
4200	108,8	101,32	7,48	6,88

5.2.6- 4º Mapeamento

O quarto mapeamento incidiu na modificação de um parâmetro novo, o avanço.

O biodiesel teve um estudo aprofundado e encontra-se agora bem caracterizado mas o ponto de inflamação óptimo do mesmo é desconhecido e provavelmente será diferente do gasóleo. Uma devida optimização no ponto de injeção pode ser um dos caminhos de recuperação das perdas de potência.

O mapeamento basicamente consistiu no uso incremental dos parâmetros do primeiro (ponto 5.2.3), 5% de tempo de injeção e 50 bar de pressão de injeção mas agora em conjunto com 15% de avanço, correspondente a um intervalo que varia entre 0,5º a 4º consoante o regime e cargas do motor. A menor angulação ocorre para rotações e cargas mais baixas e por volta das 4500 rpm com carga máxima surge o valor máximo de avanço, 4º.

Os resultados estão devidamente discriminados em anexos no teste Nr. placa: Biodiesel Prog 4 e estes foram muito semelhantes aos do primeiro mapeamento muito por causa do incremento de avanço ter sido efectuado para caudais de injeção muito elevados e devido aos limitadores de injeção originais diminuírem o caudal de injeção em grande quantidade a partir das 3000 rpm, os incrementos não provocaram efeito prático no funcionamento e rendimento do motor.

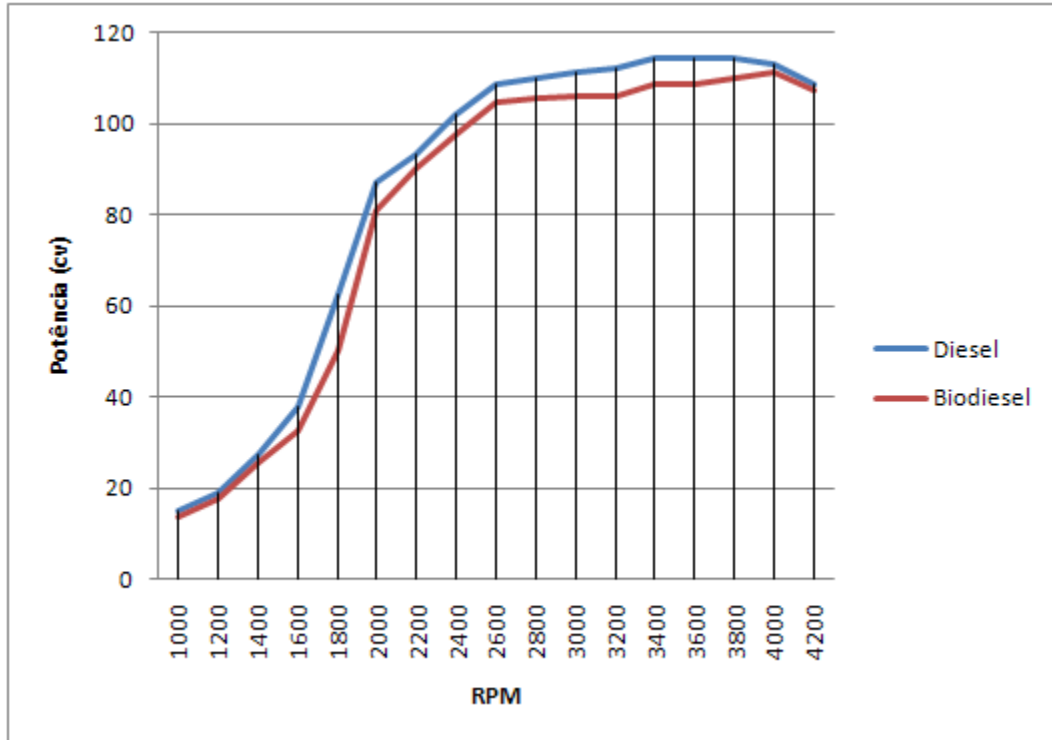


Figura 90: Comparação gráfica de potências entre Gasóleo e biodiesel Prog 4

A figura 90 representa a comparação gráfica de potência entre gasóleo e o biodiesel com a quarta programação.

Tabela 20: Comparação numérica de potências entre Gasóleo e Prog 4

PROG4 rpm	Potência(cv)			Perdas (%)
	Gasóleo	Biodiesel	Perdas	
1000	14,96	13,6	1,36	9,09
1200	19,04	17,68	1,36	7,14
1400	27,2	25,5	1,7	6,25
1600	38,08	32,64	5,44	14,29
1800	62,56	50,32	12,24	19,57
2000	87,04	80,92	6,12	7,03
2200	93,16	90,44	2,72	2,92
2400	102	97,92	4,08	4,00
2600	108,8	104,72	4,08	3,75
2800	110,16	105,74	4,42	4,01
3000	111,52	106,08	5,44	4,88
3200	112,2	106,08	6,12	5,45
3400	114,24	108,8	5,44	4,76
3600	114,24	108,8	5,44	4,76
3800	114,24	110,16	4,08	3,57
4000	112,88	111,52	1,36	1,20
4200	108,8	107,44	1,36	1,25

A tabela 20 representa a comparação numérica de potência entre gasóleo e o biodiesel com a quarta programação.

5.2.7- 5º Mapeamento

O quinto mapeamento foi efectuado com o intuito de observar a influência do parâmetro avanço de injeção, isto é, como não é conhecido o ponto de inflamação do biodiesel desconhece-se se ao fazer um aumento ou diminuição do avanço se ocorrem perdas ou ganhos de potência.

A parametrização foi feita agora utilizando a mesma base do primeiro mapeamento com a introdução de uma diminuição de 25% de avanço correspondente a uma variação compreendida entre $-0,5^\circ$ para menores regimes e cargas a -7° para elevados regimes e cargas.

O défice de avanço foi agora efectuado para todo o caudal de injeção útil o que significa que agora este parâmetro irá fazer efeitos práticos e visíveis tendo-se obtido os resultados apresentados em anexos no teste Nr. placa: Biodiesel Prog 5.

O resultado no biodiesel acompanha a teoria do gasóleo na medida em que, a diminuição de avanço de injeção traduz-se num decréscimo de potência e consequente pior rendimento do motor.

5.2.8- 6º Mapeamento

O mapeamento anterior serviu para testar e conhecer a reacção do biodiesel face à optimização do parâmetro avanço de injeção e nesta fase o mesmo vai ser incrementado em 30% em todo o regime, o que corresponde na prática a um intervalo de ângulos entre $0,58^\circ$ e $8,4^\circ$. O tempo de injeção e pressão de injeção são mantidos os incrementos de 5% e 50 bar respectivamente.

Os resultados do teste de potência deste mapeamento estão apresentados em anexos no teste Nr. placa: Biodiesel Prog 6.

A primeira diferença observada analisando o gráfico é o facto de agora as irregularidades serem inferiores e curvas mais cheias havendo mais linearidade e harmonia, podendo ser um bom indicador de um motor redondo.

Os valores máximos de potência e binário estão muito próximos do gasóleo com apenas um défice de 2 cv e 7 Nm respectivamente.

Anteriormente a característica pontuda do biodiesel estava presente em todos os testes mas agora esse comportamento não se revela. A curva de potência norma e motor está mais cheia nos médios e elevados regimes tornando assim o motor mais redondo.

A potência máxima surge agora 500 rpm mais “cedo” que no teste anterior e sensivelmente à mesma rotação que no gasóleo para além de que este valor se mantém praticamente constante

durante 1000 rpm (das 3000 ás 4000 rpm). Esta conclusão é mais uma prova e consequência da conclusão obtida no parágrafo anterior.

Ao ser efectuada uma comparação entre o teste com gasóleo e este (fig. 91), observa-se que a nível de curvatura das curvas ambas têm comportamentos idênticos, sendo esta uma solução muito próxima da óptima com o principal défice a necessidade de recuperar ainda um pouco os baixos regimes e elevar um pouco as curvas de potência motor e norma por todo para que os valores de binário e potência estejam nos valores pretendidos.

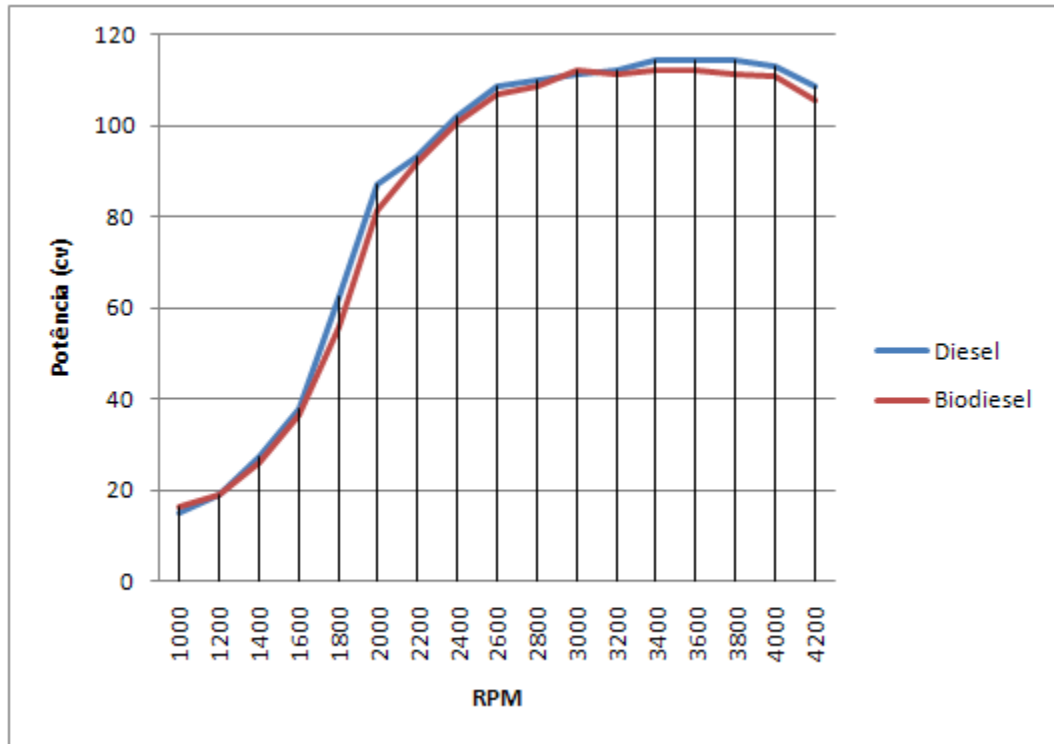


Figura 91: Comparação gráfica de potências entre Gasóleo e biodiesel Prog 6

Tabela 21: Comparação numérica de potências entre Gasóleo e Prog 6

rpm	Potência(cv)			
	Gasóleo	Biodiesel	Perdas	Perdas (%)
1000	14,96	16,32	-1,36	-9,09
1200	19,04	19,04	0	0,00
1400	27,2	25,84	1,36	5,00
1600	38,08	36,72	1,36	3,57
1800	62,56	55,76	6,8	10,87
2000	87,04	81,6	5,44	6,25
2200	93,16	91,8	1,36	1,46
2400	102	100,64	1,36	1,33
2600	108,8	107,1	1,7	1,56
2800	110,16	108,8	1,36	1,23
3000	111,52	112,2	-0,68	-0,61
3200	112,2	111,52	0,68	0,61
3400	114,24	112,2	2,04	1,79
3600	114,24	112,2	2,04	1,79
3800	114,24	111,52	2,72	2,38
4000	112,88	110,84	2,04	1,81
4200	108,8	105,4	3,4	3,13

Na tabela 21 são apresentados os valores de potência por pontos de rotação e constata-se que em pelo menos um ponto de regime do motor surgiram melhorias face ao gasóleo. O regime onde esta melhoria surge é as 3000 rpm e era certamente um dos pontos primários onde o biodiesel iria superar o gasóleo na medida em que é nessa rotação onde a pressão máxima de injeção inicia e mantém-se constante até ao final do regime do motor.

No intervalo entre as 3000 rpm até ao final do regime onde surge o maior incremento de temporização de injeção é no início do mesmo (3000 rpm) e este parâmetro em conjunto com a pressão máxima de injeção faz com que este ponto seja o primeiro regime de supremacia do biodiesel.

5.2.9- 7º Mapeamento

No sétimo mapeamento foram efectuadas as maiores combinações de vários e importantes parâmetros e os incrementos resumem-se da seguinte forma:

- 5 % de tempo de injeção;
- 50 bar de pressão de injeção;
- 30 % de avanço de injeção correspondente a um intervalo de 0,58° a 8,4°;
- 2,5 mg de caudal de combustível;
- Mistura ar / combustível enriquecida em 0,1;
- 25 Nm nos limitadores de binário;

A conjugação destes parâmetros optimizados originou os resultados apresentados em anexos no teste Nr. placa: Biodiesel Prog 7.

O aspecto e as formas das curvas de potência são excelentes com praticamente nenhuma irregularidade, sendo muito cheias e lineares conferindo ao motor um comportamento redondo.

Os valores máximos de potência e binário foram claramente superados com imensas melhorias face ao teste anterior sendo a potência e binário superiores e a potência máxima surgir um pouco mais tarde.

A nível prático e teórico esta é sem dúvida a solução ideal para o biodiesel (exceptuando as 1800 rpm) estando este panorama bem superior ao inicial gasóleo tanto na forma curvas, linearidade das curvas, valores de potência, valores de binário, agradabilidade de condução, comportamento a qualquer regime, etc.

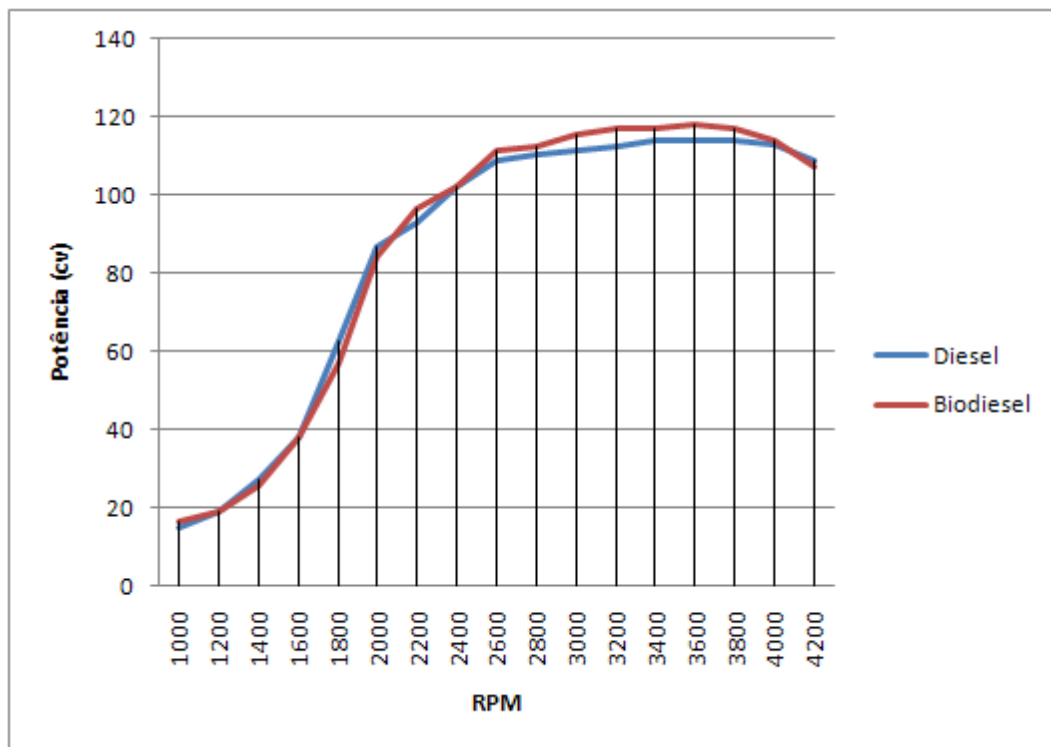


Figura 92: Comparação gráfica de potências entre Gasóleo e biodiesel Prog 7

A figura 92 representa a comparação gráfica de potência entre gasóleo e o biodiesel com a sétima programação.

Tabela 22: Comparação numérica de potências entre Gasóleo e Prog 7

rpm	Potência(cv)			Perdas (%)
	Gasóleo	Biodiesel	Perdas	
1000	14,96	16,32	-1,36	-9,09
1200	19,04	19,04	0	0,00
1400	27,2	25,5	1,7	6,25
1600	38,08	38,08	0	0,00
1800	62,56	57,12	5,44	8,70
2000	87,04	84,32	2,72	3,13
2200	93,16	96,56	-3,4	-3,65
2400	102	102	0	0,00
2600	108,8	111,52	-2,72	-2,50
2800	110,16	112,2	-2,04	-1,85
3000	111,52	115,6	-4,08	-3,66
3200	112,2	116,96	-4,76	-4,24
3400	114,24	116,96	-2,72	-2,38
3600	114,24	118,32	-4,08	-3,57
3800	114,24	116,96	-2,72	-2,38
4000	112,88	114,24	-1,36	-1,20
4200	108,8	107,44	1,36	1,25

A tabela 22 vem provar pormenorizadamente e em grandeza de potência como foram superadas as performances do biodiesel face ao gasóleo.

Os valores de incremento de enriquecimento da mistura foram fundamentais e vieram conferir os valores de potência e binário necessários para alcançar o desempenho do gasóleo chegando mesmo a ultrapassá-lo.

Analisando o gráfico e atendendo aos incrementos efectuados constata-se que após as 2000 rpm, 0,05 de enriquecimento da mistura seriam suficientes para igualar o gasóleo.

5.2.10- 8º Mapeamento

Nesta fase não foi efectuado apenas um mas sim vários mapeamentos com o intuito de explorar todas as potencialidades do biodiesel. A cargo desse trabalho continuou a TWEmotorsport com a sua experiência tentar chegar a resultados superiores com uma optimização mais detalhada e elaborada.

Optimizou-se não só os parâmetros de injeção mas sim todos os convenientes e necessários para se conseguir resultados muito superiores dos quais entrou um principal: sobrealimentação.

O objectivo era provar que o biodiesel pode ser um combustível com boas performances e que com uma gestão bem optimizada consegue-se resultados muito positivos e foram então efectuados quatro novos tipos de parametrização da gestão electrónica apresentados em

anexos nos testes Nr. placa: Biodiesel Prog 8, Biodiesel Prog 9, Biodiesel Prog 10 e Biodiesel Prog 11.

Os testes revelam valores de potência e binário excelentes com valores muito próximos em todos eles, salientando que não foram efectuados incrementos exagerados de parâmetros no intuito de obter potência. Houve e sempre há um cuidado acrescido pela TWE motorsport na preservação do motor nos veículos que optiza e nestes mapeamentos a pressão de sobrealimentação foi sempre a mesma com um incremento de 5.7% o que corresponde a um aumento de 0,15 bar no ponto de pressão máxima que ocorre sensivelmente entre as 2000 e as 2750 rpm, passando o valor de 1.63 bar para 1,78 bar.

Além dos valores de potência e binário sofrerem ganhos muito positivos, o que é evidente também é a qualidade, regularidade e linearidade das curvas de potência, prova da harmonia da combustão gerada com estes parâmetros ao longo de toda a rotação útil do motor.

O único senão aponta-se no último teste em que nos elevados regimes observa-se algumas irregularidade nas curvas, muito provavelmente pela bomba de combustível ter algumas dificuldades em manter uma temporização de injeção mais elevada (incremento de 20%) aliada a uma pressão máxima de injeção de 1750 bar. Neste último teste os valores de temporização e pressão de injeção foram muito elevados para observar o comportamento da mecânica e do combustível concluindo-se que não surgiram ganhos correspondentes ao grau de incremento que foi efectuado e por esse facto constata-se duas possíveis conclusões: ou o combustível atingiu o seu ponto limite de optimização ou limitações mecânicas como a bomba de combustível chegaram á sua eficiência máxima e a partir daí não haverá ganhos mas sim perdas. No final deste teste a gestão electrónica entrou em modo de protecção e acusou o erro da bomba de combustível o que aponta a causa do limite de progressos para a segunda conclusão obtida na frase anterior.

5.3- Comparação de Resultados

Após todas as experiencias realizadas pode-se agora proceder á comparação dos vários resultados e retirar daí algumas elações. O gráfico da figura 94 vai ajudar a concluir as mesmas.

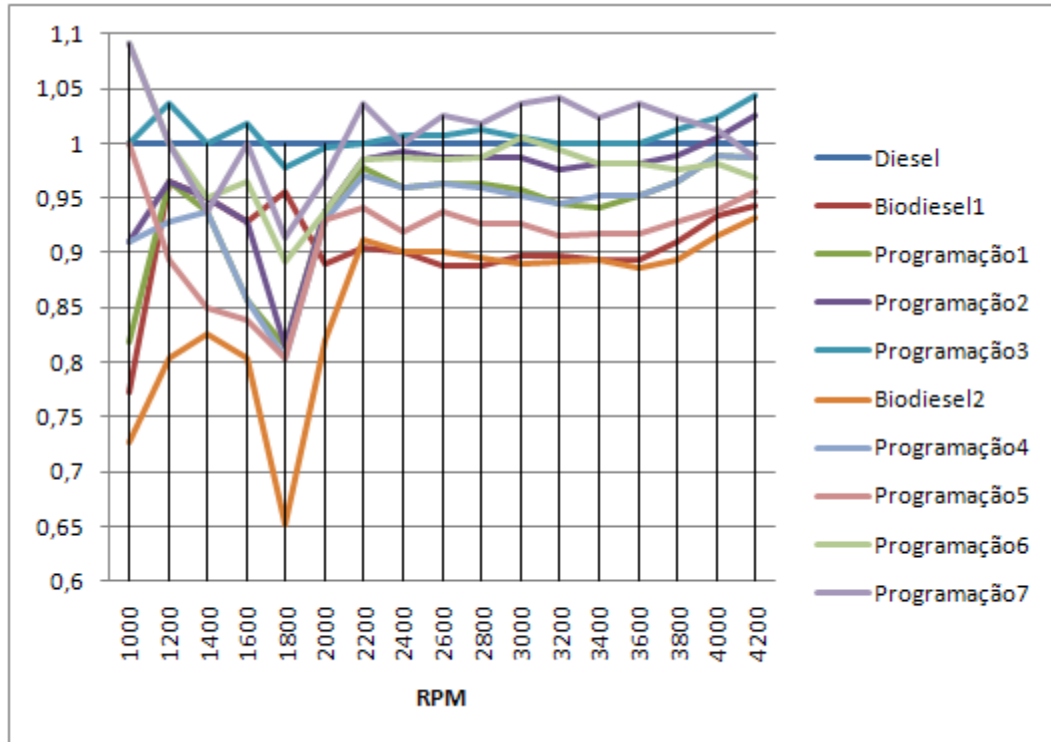


Figura 93: Biodiesel normalizado em relação ao diesel

Facilmente constata-se que a programação 3 e 7 são as que mais se igualam ao gasóleo com uma diferença positiva significativa da programação 7 após as 2000rpm.

Este resultado vem demonstrar que a optimização de vários parâmetros com menores incrementos em vez de apenas um ou dois com incrementos elevados, vem proporcionar ganhos de potência superiores à excepção dos baixos regimes em que um significativo aumento de temporização e pressão de injeção conferem a obtenção de bons resultados, superiores aos do gasóleo.

Outro ponto curioso é o facto de o teste realizado originalmente com biodiesel logo após a sua introdução ter obtido resultados bem superiores comparativamente às mesmas condições mas efectuando o teste após algumas horas de uso de biodiesel. Esse facto pode-se justificar por variados factores dos quais saliento o facto de apesar de todo o circuito de alimentação ter sido devidamente drenado podem eventualmente ficar resíduos de gasóleo em partes inacessíveis. Um outro factor pode ser a adaptação dos vários sensores ao novo combustível, isto é, ao início a gestão electrónica não estaria 100% adaptada nem teria “reconhecido” devidamente as propriedades do biodiesel daí conferir resultados superiores ao início.

Às 1800 rpm surge um facto importante sendo este o ponto mais crítico e negativo do biodiesel face ao gasóleo. Repare-se que na segunda medição original com biodiesel observa-se uma perda de potência superior a 20cv, tendo sido este o ponto mais complicado de recuperação de optimização devido a este extremo diferencial. O binário máximo deste motor surge originalmente a esta rotação sensivelmente pois é o ponto onde surge o pico máximo de pressão sobrealimentação e a quebra de potência pode estar directamente relacionada. O biodiesel devido às dificuldades de escoamento aliadas ao menor PCI pode originar a uma quebra de aumento de rotação do turbo dificultado assim que o pico de pressão pretendido se efectue, comprometendo assim o nível de potência atingido nessa faixa. Saliente-se que após

as 1800rpm o diferencial de potência diminuiu significativamente devido ao facto de que com o biodiesel o pico de pressão de turbo surge mais tarde cerca de 400 rpm.

6- Conclusões

Através da análise dos resultados obtidos juntamente com análise da revisão bibliográfica obtiveram-se as seguintes conclusões:

- O biodiesel pode conferir aos motores a gasóleo semelhantes ou superiores valores de potência se houver um conveniente ajuste e afinação dos parâmetros da gestão electrónica.
- O modo mais incompleto e directo para a recuperação de potência do biodiesel face ao gasóleo passa pelo ajuste dos tempos e pressões de injeções.
- O caminho mais racional e homogéneo da recuperação da potência não passa por apenas ajustar dois parâmetros mas sim um conjunto mais completo de parâmetros que como resultado final, se necessita apenas de pequenos incrementos em cada um deles para se conseguirem resultados que superam os objectivos propostos.
- A optimização da gestão electrónica para o biodiesel utilizando parâmetros como o tempo de injeção, pressão de injeção, avanço de injeção, caudal de combustível, rácio da mistura ar/ combustível, limitadores de binário, etc é originadora de curvas de potência com poucas irregularidades, mais suaves, mais cheias, tornando assim os motores com um comportamento mais redondo.
- Os baixos regimes são a parte mais difícil de se recuperar e ganhar potência.
- A principal razão das perdas de potência nos baixos regimes serem superiores deve-se ao facto de nessa faixa a pressão de injeção ser inferior dificultando assim o facto de o biodiesel ter uma viscosidade cinemática 3 vezes superior ao gasóleo. Esse facto vai criar um fenómeno mais acentuado na dificuldade de injeção acontecendo assim um menor caudal de injeção que vai provocar também um menor caudal de gases de escape. O conjunto destes dois decréscimos provoca no turbo uma resposta mais lenta, maiores dificuldades de enchimento e conseqüentemente menos pressão de sobrealimentação face á pressão objectivo. A pressão de sobrealimentação sendo inferior provoca menores caudais de ar admitidos pelo motor que porventura vão ser lidos pelo sensor de massa de ar. O sensor de massa de ar está directamente ligado á quantidade de combustível e este rege sempre o seu funcionamento em função de uma boa mistura, ao ler valores inferiores de caudais de ar admitidos corrige esse facto diminuindo o caudal de injeção. Estão então, presentes duas agravantes para o caudal de injeção que são as características físicas do biodiesel e o fenómeno relatado acima.
- A par do gasóleo, o biodiesel é também mais sensível ao tempo de injeção para ganhar binário máximo e à pressão de injeção para ter ganhos na potência máxima.

- A par do gasóleo, o biodiesel é também sensível ao parâmetro avanço de injeção, perdendo potência de este for atrasado e ganhando se for aumentado, até determinados valores úteis.
- A introdução do biodiesel no motor sem qualquer ajuste a nível da gestão electrónica, além de criar perdas de potência em todo o regime, torna o motor menos redondo e mais pontudo.
- A gestão electrónica se for ajustada e parametrizada com elevado grau de pormenor e recorrendo também á parte da optimização da sobrealimentação consegue-se obter resultados de potência e binário excelentes e muito superior face á gestão com os parâmetros originais utilizando gasóleo.

7- Referências

- Martins, Jorge (2006). Motores de Combustão Interna, 2ª edição. Publindústria.
- Bernard Challen, Rodica Baranescu (2003). Diesel Engine Reference Book, second edition. Elsevier.
- Silva, Edson (2006) Injecção Electrónica de Motores Diesel.
- Moreira, Sérgio (2008). Influência do Biodiesel nas emissões Poluentes de um Motor Turbo Diesel, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Pimenta, Daniel (2008). Estudo da Influência do Biodiesel no Funcionamento de um Motor Diesel, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- A Comprehensive Analysis of Biodiesel Impacts on Exhaust Emissions*, United States Environmental Protection Agency, 2002.
- Felizardo, Pedro (2003). *Produção de Biodiesel a Partir de Óleos Usados de Fritura*. Instituto Superior Técnico.
- Cairão, António (2004). Desgaste e gripagem na bomba de injeção, de um sistema “Common Rail” em motores Diesel.
- <http://www.reunidasmotores.com.br/imagens/dicas10.jpg>, consultado em 10/01/2009
- "Automotive Fuels And Fuel Systems, Volume 2: Diesel" By T.K. Garrett, Pentech Press, London, 1991.
- <http://jcwinnie.biz/wordpress/imageSnag/pom1.jpg>, consultado em 10/01/2009
- "Diesel Fuel Injection" first edition published June 1994. ISBN 1-56091-542-0.
- <http://www.langleyvw.ca/tech/pd.html>, consultado em 10/01/2009
- EMA-Engine manufacturers Association**. Technical Statement on the use of biodiesel fuel in compression ignition engines, 2005.
- <http://www.joseclaudio.eng.br/Imagens/image018.jpg>, consultado em 10/01/2009
- Incalculavel, Soluções de Energia Renovável.
- http://www.globaldenso.com/en/technology/product/powertrain/files/common_rail_e.pdf, consultado em 11/01/2009
- <http://europa.eu/scadplus/leg/pt/lvb/l28186.htm> consultado em 25/01/2009
- AJUSTE DE EQUAÇÕES PARA A VISCOSIDADE CINEMÁTICA DE PRODUTOS DE PETRÓLEO EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA, 2004, Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás – IBP.**
- U.S.Department of Energy – Energy Efficiency and Renewable Energy, 2006. Biodiesel Handling and Use Guidelines – third edition.
- Automotive fuels Diesel fuel Requirements and test methods English version of DIN EN 590, 2004.

8- Anexos