



UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR
Engenharia

Otimização dos Mapas de Injeção e Ignição Eletrónica de um Motor

André Almeida D'Amil

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Eletromecânica
(2º ciclo de estudos)

Orientador: Prof. Doutor Francisco Miguel Ribeiro Proença Brójo

Covilhã, outubro de 2016

Agradecimentos

Ao Professor Doutor Francisco Miguel Ribeiro Proença Brójo, pelos conhecimentos transmitidos, pela sua disponibilidade, orientação e sugestões. Também pela sua ajuda no fabrico de alguns componentes, essenciais ao bom funcionamento do motor e sistemas eletrónicos que o equipam.

Aos meus pais, José e Dina D'Amil, por terem apoiado e proporcionado o meu percurso académico. Um agradecimento em especial ao meu pai, que me transmitiu conhecimentos que contribuíram para a elaboração deste trabalho.

À minha namorada, Liliana Barroso, pelo apoio e motivação ao longo do percurso de elaboração desta dissertação.

Aos meus amigos, João Ferreira e Daniel Diogo, pela sua ajuda na componente experimental e realização dos ensaios.

Resumo

A otimização dos mapas de controlo da injeção e da ignição eletrónica, assim como a fiabilidade do funcionamento dos sistemas eletrónicos que equipam o motor Honda GX120 foram o objeto de trabalho desta dissertação.

Foram melhorados os suportes de alguns sensores, assim como alterada a sua localização. Alguns componentes foram substituídos devido a avarias, sendo que o mais relevante foi a unidade de comando eletrónico.

Obtiveram-se os mapas base, e, procedeu-se à otimização do mapa de injeção, criando-se dois mapas finais. Estes dois mapas finais, consistiram numa versão em que se pretendia um binário e potência elevados, e noutra versão, onde se pretendia diminuir o consumo, não comprometendo demasiado o desempenho. O mapa de ângulo de avanço de ignição não foi otimizado, e conseqüentemente não foi testado, devido a atrasos provocados por avarias.

Por fim foram realizados os ensaios, respetivos ao mapa base e aos dois mapas finais, comparando-se os resultados. Verificou-se que os dois mapas afinados cumpriram a sua finalidade, apresentando curvas de desempenho típicas, e consumos, que confirmam o comportamento esperado no momento do seu desenvolvimento. É importante referir que o binário foi adimensionalizado, devido à falta de precisão do dinamómetro, e que, seria possível otimizar ainda mais os mapas, implementado uma sonda *Lambda wideband* no escape do motor, permitindo uma leitura exata da mistura ar-combustível.

Palavras-chave

Injeção, ignição, motor, desempenho, consumo, otimização, unidade de comando eletrónico.

Abstract

The optimization of the electronic injection and ignition control maps, as well as the reliability of the operation of the electronic systems that equip the Honda GX120 engine, were the goals of the present work.

The mounting of some of the sensors was improved, and the localization of some others was changed. Other components had to be changed, due to malfunctions, being the electronic control unit the most important.

Obtained the base maps, the optimization of the injection map was held, giving result to two final maps. These two final maps, consisted on a first version, where high torque and power were desired, and on another version, where fuel consumption was the priority, but without compromising the performance too much. The ignition advance angle map was not optimized, and thereafter not tested, due to delays caused by malfunctions.

At last, the experimental tests were performed, using the base injection map and the two final maps, and the results were compared. Both the optimized maps fulfilled their purpose, presenting typical performance curves, and fuel consumption, that confirmed the planned behavior at their development. It's important to say that torque was put on dimensionless form, due to the lack of precision of the dynamometer, and that, it would be possible to obtain better optimization of the maps by installing a wideband Lambda sensor, which would provide better air-fuel ratio readings.

Keywords

Injection, ignition, engine, performance, fuel economy, optimization, electronic control unit.

Índice

Agradecimentos	iii
Resumo	v
Abstract	vii
Lista de Figuras.....	xi
Lista de Tabelas	xiii
Lista de Acrónimos	xv
Nomenclatura.....	xvii
1. Introdução	19
1.1. Perspetiva geral.....	19
1.2. Revisão bibliográfica	19
1.3. Objetivos da dissertação	20
1.4. Visão geral e organização da dissertação	21
2. O funcionamento de um motor com injeção e ignição eletrónica	23
2.1. O motor de combustão interna.....	23
2.1.1. Principais componentes de um motor de combustão interna	23
2.1.2. Ciclo de Otto ideal	25
2.1.3. Funcionamento de um motor a quatro tempos	26
2.1.4. Combustão	27
2.1.5. Formação da mistura ar-combustível	28
2.1.6. Sistema de injeção eletrónica.....	30
2.1.7. Sistema de ignição eletrónica	31
2.1.8. Emissões de acordo com a relação ar-combustível.....	34
2.2. A unidade de comando eletrónico do motor (UCE)	35
2.2.1. Descrição e funcionamento	36
2.2.2. Mapas	36
2.3. Parâmetros de desempenho	37
2.3.1. Taxa de compressão	37
2.3.2. Razão ar-combustível	37
2.3.3. Fator de excesso de ar, <i>Lambda</i>	38
2.3.4. Rendimento volumétrico	39
2.3.5. Binário e potência útil	39
2.3.6. Consumo específico de combustível	40
2.3.7. Pressão	41
3. Componente experimental	43

3.1.	Especificações do motor.....	43
3.2.	Preparações iniciais e substituição da UCE <i>Haltech</i>	44
3.2.1.	Calibração do <i>trigger angle</i>	49
3.3.	A UCE <i>MegaSquirt 2</i>	51
3.3.1.	Sensor MAP.....	52
3.3.2.	Sensor de temperatura do óleo	52
3.3.3.	Sensor de temperatura do ar de admissão	53
3.3.4.	Sensor de posição da borboleta	54
3.3.5.	Sensor de rotação/posição do motor (Efeito de Hall).....	54
3.3.6.	Sonda <i>Lambda</i>	54
3.4.	Obtenção dos mapas base.....	56
3.5.	Realização dos ensaios.....	58
3.6.	Otimização do mapa de injeção	60
3.6.1.	Comparação entre os mapas obtidos.....	63
4.	Resultados	65
4.1.	Curvas de desempenho e consumo - análise e discussão	66
5.	Conclusão	73
5.1.	Sugestões para trabalhos futuros	74
6.	Referências Bibliográficas	75

Lista de Figuras

Figura 2-1: Vista em corte de um motor de combustão interna (Ganesan, 2003).	25
Figura 2-2: Ciclo ideal de Otto em coordenadas pressão-volume específico (à esquerda) e temperatura-entropia (à direita) (Pulkrabek, 1997).	26
Figura 2-3: Os quatro tempos de um motor de quatro tempos (Blair, 1999).	26
Figura 2-4: Vários tipos de injeção (Sendyka & Noga, 2013).	31
Figura 2-5: Influência do avanço de ignição nas emissões e no consumo de combustível (Denton, 2004).	34
Figura 2-6: Variação das emissões com a razão de equivalência num motor de ignição por faísca (Stone, 1992).	34
Figura 2-7: Esquema de um dinamômetro (Martins, 2011).	40
Figura 3-1: Curvas de potência e binário (Honda Engines, 2016).	44
Figura 3-2: Montagem do sensor de posição da borboleta (fotografia de autoria própria).	44
Figura 3-3: Montagem do sensor de Hall (fotografia de autoria própria).	45
Figura 3-4: Depósito de combustível (fotografia de autoria própria).	45
Figura 3-5: Cabo de vela (à esquerda) e bobine de ignição (à direita) (fotografias de autoria própria).	46
Figura 3-6. Manômetro para medição da pressão no circuito hidráulico do dinamômetro (fotografia de autoria própria).	46
Figura 3-7: A UCE <i>MegaSquirt 2</i> (fotografia de autoria própria).	47
Figura 3-8: Menu de configurações do motor e injeção.	47
Figura 3-9: Menu de configurações gerais.	48
Figura 3-10: Menu de configuração da ignição e do sensor de rotação/posição do motor.	49
Figura 3-11: Interface do <i>Picoscope</i>	50
Figura 3-12: Sistema de admissão (fotografia de autoria própria).	52
Figura 3-13: Sensor de temperatura do óleo (fotografia de autoria própria).	53
Figura 3-14: Sensor de temperatura do ar da admissão.	53
Figura 3-15: Instalação da sonda <i>Lambda</i> (fotografia de autoria própria).	55
Figura 3-16: Curva de transferência da sonda <i>Lambda narrowband</i> (Robert Bosch GmbH, 2016).	56

Figura 3-17: Mapa base de rendimento volumétrico (VE).	56
Figura 3-18: Mapa base de razão ar-combustível alvo (AFR).	57
Figura 3-19: Dados inseridos no gerador do mapa do ângulo de avanço de ignição (MegaSquirt, 2016).	58
Figura 3-20: Mapa base do ângulo de avanço de ignição.	58
Figura 3-21: Montagem experimental (fotografia de autoria própria).	59
Figura 3-22: Dinamómetro (fotografias de autoria própria).	59
Figura 3-23: Interface gráfico do <i>datalogger</i> da <i>MegaSquirt</i>	60
Figura 3-24: Identificação dos vários regimes de funcionamento no mapa VE.	61
Figura 3-25: Mapa otimizado para maior binário.	62
Figura 3-26: Mapa otimizado para binário intermédio e menor consumo.	62
Figura 3-27: Representação em 3D do mapa base.	63
Figura 3-28: Representação 3D do mapa utilizado no segundo ensaio.	63
Figura 3-29: Representação 3D do mapa utilizado no terceiro ensaio.	64
Figura 4-1: Curva de Binário e Potência Útil Adimensionais obtida no ensaio 1.	66
Figura 4-2: Curva de Consumo de Combustível obtida no ensaio 1.	67
Figura 4-3: Curva de Binário e Potência Útil adimensionais obtida no ensaio 2.	68
Figura 4-4: Curva de Consumo de Combustível obtida no ensaio 2.	69
Figura 4-5: Curva de Binário e Potência Útil Adimensionais obtida no ensaio 3.	70
Figura 4-6: Curva de consumo de combustível obtida no ensaio 3.	71

Lista de Tabelas

Tabela 1: Condições de λ para mistura, rica, pobre e estequiométrica (Rech, 2002). 38

Tabela 2: Especificações do motor (Honda Engines, 2016)..... 43

Lista de Acrónimos

<i>IF</i>	<i>Ignição por faísca</i>
<i>IC</i>	<i>Ignição por compressão</i>
<i>PMI</i>	<i>Ponto morto inferior</i>
<i>PMS</i>	<i>Ponto morto superior</i>
<i>PV</i>	<i>Pressão-volume</i>
<i>TS</i>	<i>Temperatura-entropia</i>
<i>OHV</i>	<i>Overhead Valve</i>
<i>UCE</i>	<i>Unidade de comando eletrónico</i>
<i>VE</i>	<i>Volumetric efficiency</i>
<i>AFR</i>	<i>Air/Fuel ratio</i>

Nomenclatura

V_c - Volume varrido (cilindrada) [m^3]

V_d - Volume da câmara de combustão [m^3]

r_c - Razão de compressão

m_a - Massa de ar [kg]

\dot{m}_a - Caudal mássico de ar [kg/s]

m_f - Massa de combustível [kg]

\dot{m}_f - Caudal mássico de combustível [kg/s]

λ - Fator de excesso de ar

Φ - Razão de equivalência

\dot{m}_a - Caudal mássico de ar introduzido no cilindro por ciclo [kg/s]

$\rho_{i,a}$ - Massa específica do ar de admissão [kg/m^3]

V_d - Volume deslocado pelo pistão [m^3]

N - Velocidade de rotação do motor [rot/s]

T - Binário [N.m]

F - Força [N]

b - Braço [m]

P - Potência útil [J]

SFC - Consumo específico de combustível [g.kW/s]

1. Introdução

1.1. Perspetiva geral

A criação de legislação para a diminuição de emissões de gases poluentes e a subida dos preços dos combustíveis, levou a que fosse necessário implementar sistemas mais eficientes nos motores de combustão interna. De modo a respeitar a legislação foi necessário desenvolver uma solução que permitisse calcular e medir o valor exato de combustível a injetar num motor. Surgiu assim a injeção eletrónica, que utilizada com um controlador eletrónico, a UCE (Unidade de Comando Eletrónico), permitiu que esses valores exatos fossem introduzidos na memória do controlador, sendo assim possível respeitar a regulação de emissões, e ao mesmo tempo diminuir o consumo de combustível.

Um outro sistema que foi desenvolvido, com o objetivo de aumentar o rendimento dos motores foi a ignição eletrónica, também controlada pela UCE, que permitiu que o avanço da ignição fosse o máximo possível, sem ocorrência de detonação, para cada situação de funcionamento de um motor (tendo em conta a carga e a velocidade do motor). Esta solução permitiu maior flexibilidade na variação do ângulo do avanço de ignição, algo que os sistemas anteriores, controlados mecanicamente, não permitiam.

Tendo em conta estas duas tecnologias, foi realizado por um antigo aluno da Universidade da Beira Interior um processo de alteração do motor Honda GX 120, cujo sistema de admissão de fábrica consiste num carburador, e o sistema de ignição é controlado por magneto. Nesta dissertação, o motor referido, convertido então para injeção e ignição eletrónica, será utilizado como base de trabalho, e serão otimizados os respetivos mapas de controlo eletrónico.

1.2. Revisão bibliográfica

Foi realizada uma pesquisa bibliográfica, de modo a estudar e analisar trabalhos realizados anteriormente, na mesma área de estudo.

É assim importante referir o trabalho de Fábio Teixeira (2014), intitulado “Adaptação de Injeção Eletrónica em Motor Alternativo de Carburador - Cálculo do Consumo Específico, Binário e Potência”. Neste trabalho, o autor realizou as adaptações mecânicas de carburador para injeção eletrónica e instalou a unidade de controlo eletrónico. O objetivo foi a diminuição do consumo específico, meta que foi concluída como atingida. Este trabalho consiste na base para a presente dissertação, pois esta consiste numa otimização do trabalho anteriormente desenvolvido.

O autor Luís Fernandes (2015), com a dissertação de tema “Otimização do Sistema de Injeção Eletrónica de um Motor de Combustão Interna”, testou o comportamento e analisou os parâmetros de desempenho do motor Honda GX 120, enriquecendo ou empobrecendo o mapa de injeção estequiométrico em valores de +10%, -10% e -20%. O autor concluiu que os melhores resultados se verificaram para um empobrecimento de 10%.

Ricardo Protásio (2012), realizou a dissertação com o tema “Implementação de um Sistema de Injeção e Ignição Eletronicamente controlados num Motor de Combustão Interna” teve como objetivo controlar um motor Honda GX25, equipado de fábrica com carburador e ignição por magneto, utilizando uma unidade de comando eletrónico. Foi necessário converter o sistema de injeção de carburador para injeção eletrónica, por meio de um injetor, e o sistema de ignição para ignição eletrónica. Quando se passou ao momento de comparar o motor eletronicamente controlado com o motor original os resultados foram pouco conclusivos, devido a problemas com o banco de ensaio, no entanto, o funcionamento dos sistemas de injeção e ignição eletrónica foi assegurado.

Charles Rech (2002) desenvolveu o tema “Estudo Experimental da Relação Ar/Combustível para Máxima Potência em um Motor de Combustão Interna, utilizando diversos Combustíveis”, com o objetivo de estudar, a partir de dados experimentais, a influência do fator *Lambda* na potência efetiva do motor. Os valores de *Lambda* para os quais foi obtida maior potência ficaram entre 0,85 e 0,90. É importante referir que a componente experimental foi realizada num banco de ensaios, utilizando um motor de quatro cilindros, e que foi utilizada e programada injeção eletrónica, de modo a ser possível variar a relação ar/combustível.

O estudo da dissertação intitulada “Detonação em Motores de Pistão”, realizada por Pedro Dias (2016), com o objetivo de analisar e detetar de que forma a detonação ocorre e quais os regimes de trabalho mais propícios à sua ocorrência também se verifica importante no âmbito da realização deste documento. O motor Honda GX120 foi um dos utilizados na componente experimental da referida dissertação, e verificou-se que começa a ocorrer detonação a partir de um ângulo de avanço de ignição de 50°, valor a ter em conta na otimização dos mapas de ângulo de avanço de ignição.

1.3. Objetivos da dissertação

Os objetivos desta dissertação consistem na otimização dos mapas e sistemas de injeção e ignição eletrónica do motor Honda GX120, de modo a melhorar o seu desempenho, e também no melhoramento da fiabilidade do funcionamento de todo o sistema. Os parâmetros que

serão determinados e os quais se pretende melhorar são o binário, a potência e o consumo específico.

1.4. Visão geral e organização da dissertação

O presente trabalho está organizado em cinco capítulos. O primeiro capítulo consiste numa apresentação e enquadramento do tema.

Por sua vez, o capítulo dois, consiste numa revisão bibliográfica, realizada de modo a apresentar ao leitor os conhecimentos necessários à compreensão da componente experimental e conclusões.

No capítulo três são descritos o procedimento e a realização da componente experimental, assim como dos ensaios. A obtenção dos mapas base, análise das especificações do motor e unidade de comando eletrónico utilizados também são tratados neste capítulo.

A análise dos resultados e das curvas de desempenho, obtidos na componente experimental, estão presentes no capítulo quatro.

Por fim, no capítulo cinco, são apresentadas as conclusões retiradas da realização do presente trabalho e são também apresentadas sugestões para realização de trabalhos futuros.

2. O funcionamento de um motor com injeção e ignição eletrónica

2.1. O motor de combustão interna

Para ser possível uma melhor compreensão do trabalho descrito neste documento, torna-se necessário proceder a um estudo bibliográfico incidente no funcionamento e nos sistemas constituintes de um motor de combustão interna.

Existem dois tipos principais de motores de combustão interna, mais concretamente, motores de ignição por faísca (IF) e de ignição por compressão (IC). Vulgarmente são designados por motor a gasolina (ou motor de Otto) e motor a gasóleo (ou motor Diesel). No primeiro caso, a ignição é despoletada por uma faísca, enquanto que no segundo, o aumento da temperatura e da pressão durante a compressão, leva a uma ignição espontânea do combustível. Estes dois tipos de motores podem ainda ser divididos em motores de dois ou quatro tempos, nos quais um ciclo decorre em uma ou duas rotações da cambota, respetivamente (Stone, 1992).

Para a realização deste trabalho, o motor utilizado foi de ignição por faísca, a quatro tempos, com injeção e ignição eletrónica, portanto será o funcionamento deste tipo de motor que será aprofundado.

2.1.1. Principais componentes de um motor de combustão interna

De modo a ser possível um melhor entendimento do funcionamento de um motor de combustão interna de ignição por faísca, que será descrito mais à frente neste capítulo, torna-se necessário conhecer os seus principais componentes, que segundo Ganesan (2003), e Jorge Martins (2011) são:

- Bloco de cilindros: Componente de suporte principal, fabricado em ferro fundido ou ligas leves onde existem cavidades, denominadas por cilindros, e que aloja a estruturas de suporte à cambota e à cabeça do motor. Na parte inferior do bloco é acoplado o cárter;

- Cilindro: Cavidade cilíndrica, como o próprio nome indica, onde circula o pistão;
- Pistão: Peça cilíndrica que se movimenta dentro do cilindro. Este conjunto constitui um limite variável, com o movimento oscilante, do sistema de combustão, transmitindo a pressão dos gases à biela;
- Biela: União entre o pistão e a cambota. Contribui na transformação do movimento alternativo do pistão em rotativo, em conjunto com a cambota;
- Coletor de admissão: Tubo que liga o sistema de admissão à válvula de admissão;
- Coletor de escape: Tubo que liga o sistema de escape à válvula de escape;
- Válvulas de admissão e de escape: Regulam a entrada de ar ou mistura ar-combustível e saída de gases resultantes da combustão, no cilindro;
- Vela: Peça que inicia a combustão, produzindo uma faísca, em motores de ignição por faísca;
- Cambota: Converte o movimento alternativo do pistão em rotativo, que em seguida será transmitido à saída do eixo, onde se encontra o volante de inércia. É constituída por contrapesos que equilibram o movimento rotativo, localizados nos braços das manivelas;
- Árvore de cames: Veio que controla a abertura e fecho das válvulas;
- Cárter: Tampa inferior do bloco do motor, que serve como reservatório de óleo;
- Volante de inércia: Utilizado de modo a garantir uma distribuição uniforme do binário no veio de saída.

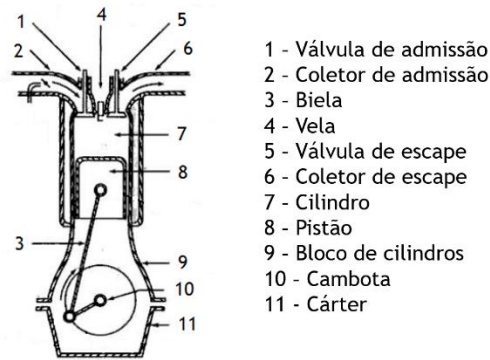


Figura 2-1: Vista em corte de um motor de combustão interna (Ganesan, 2003).

2.1.2. Ciclo de Otto ideal

O ciclo ideal de Otto é uma aproximação do ciclo real de um motor de 4 tempos naturalmente aspirado, utilizado para análise. Consiste em seis processos termodinâmicos:

- 6 - 1: Admissão de ar a pressão constante. A válvula de admissão está aberta e a válvula de escape fechada;
- 1 - 2: Compressão isentrópica de ar e combustível, com a movimentação do pistão desde o PMS para o PMS. Todas as válvulas estão fechadas;
- 2 - 3: Adição de calor a volume constante, devido à ignição da mistura, ocorrendo a combustão. Todas as válvulas permanecem fechadas;
- 3 - 4: Expansão isentrópica, havendo movimentação do pistão desde o PMS para o PMI, produzindo-se assim trabalho. As válvulas encontram-se ainda fechadas;
- 4 - 5: Rejeição de calor a volume constante que acaba no PMI. Válvula de escape aberta e válvula de admissão fechada;
- 5 - 6: Escape a pressão constante. Válvula de escape aberta e válvula de admissão fechada (Pulkrabek, 1997).

Os processos termodinâmicos referidos estão representados pelos gráficos PV e TS da figura 2.

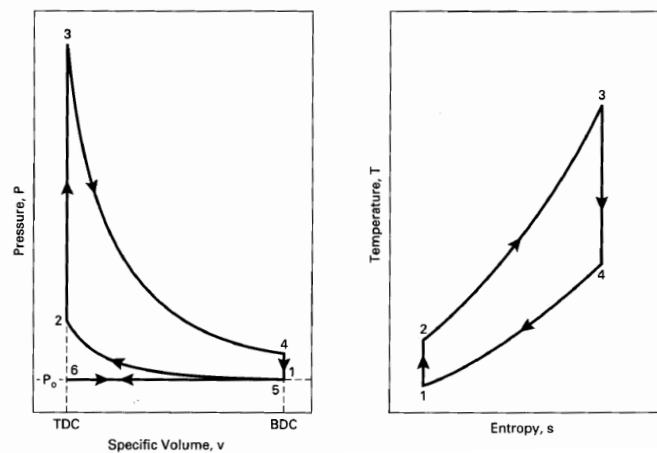


Figura 2-2: Ciclo ideal de Otto em coordenadas pressão-volume específico (à esquerda) e temperatura-entropia (à direita) (Pulkrabek, 1997).

2.1.3. Funcionamento de um motor a quatro tempos

Um motor a quatro tempos funciona num ciclo mecânico, que para facilidade de análise é aproximado do ciclo termodinâmico de Otto, apresentado anteriormente. Este ciclo mecânico está dividido nos seguintes tempos:

- Admissão (representado por (A) na figura 3);
- Compressão (representado por (B) na figura 3);
- Expansão (representado por (C) na figura 3);
- Escape (representado por (D) na figura 3).

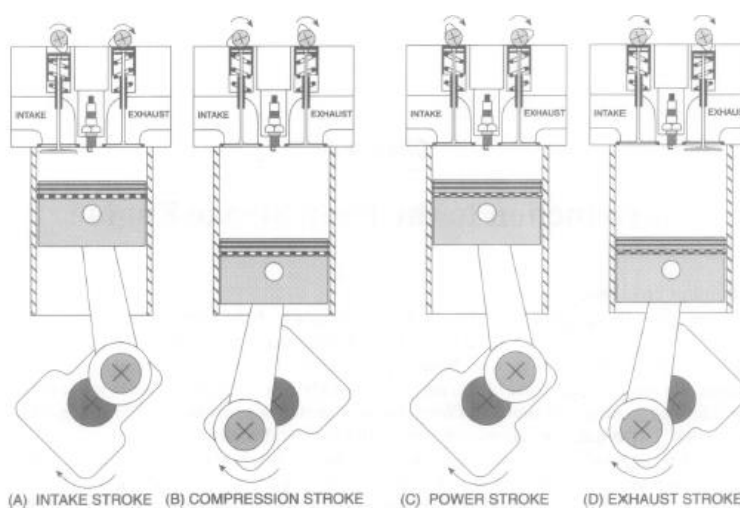


Figura 2-3: Os quatro tempos de um motor de quatro tempos (Blair, 1999).

Inicialmente ar é introduzido no motor, no tempo de admissão, em que o pistão desce do PMS para o PMI, aumentando o volume do cilindro. Nesta situação a válvula de admissão encontra-se aberta, enquanto que a válvula de escape se encontra fechada. Junto com o ar vem a quantidade de combustível pretendida, por meio de um injetor ou um carburador. Seguidamente, tanto a válvula de escape como a de admissão estão fechadas, e, decorre compressão, devida à transição do pistão de PMI para PMS, passando o volume do cilindro de máximo para mínimo. O combustível vaporiza devido ao aumento da temperatura e pressão do ar.

Enquanto a compressão termina, a vela emite uma faísca, provocando a combustão, aumentando a pressão e a temperatura rapidamente. Ocorre então, conseqüentemente a expansão, que consiste na passagem do pistão do PMS para o PMI, devida ao aumento da pressão, transmitindo binário à cambota. Por fim o pistão desloca-se novamente do PMI para o PMS, a válvula de admissão continua fechada e a válvula de escape abre, idealmente no PMI, e com o movimento do pistão os produtos da combustão são expulsos do motor (Blair, 1999).

2.1.4. Combustão

Nos motores de ignição por faísca convencionais o combustível e o ar são misturados no sistema de admissão e introduzidos no cilindro, onde são misturados com gás residual e depois comprimidos. Em condições de funcionamento normais, a combustão será iniciada perto do fim do tempo de compressão, na zona da vela de ignição, provocada por uma descarga elétrica. A partir do momento em que a mistura entra em combustão, é produzida uma chama, que se propaga até às paredes do cilindro e por fim se extingue.

O evento de combustão deve ocorrer no momento adequado, localizado relativamente ao ponto morto superior, de modo a obter máxima potência ou binário. Normalmente a combustão começa antes do fim do tempo da compressão, continua até à parte inicial do tempo de expansão e acaba depois do ponto do ciclo em que ocorre a pressão de pico no cilindro. A sua duração é de tipicamente 30 a 90 graus da cambota (Heywood, 1988).

O tipo de combustão acima descrito é denominado de combustão normal, no entanto, a combustão também pode ocorrer anormalmente, tomando a forma de pré-ignição e/ou autoignição.

A pré-ignição é causada pela ignição da mistura, antes ou depois da faísca da vela, resultante do contacto com uma superfície quente, como por exemplo, a válvula de escape. Por vezes

é caracterizada pelo fato de mesmo desligando o sistema de ignição o motor continuar a funcionar. Outra causa de pré-ignição poderão ser depósitos de produtos de combustão incandescentes. Este tipo de ignição anormal leva a que haja um aumento do trabalho no momento da compressão, ou seja, provoca oposição ao movimento ascendente do pistão, resultando numa diminuição da potência e num aumento da pressão na câmara de combustão, o que pode causar detonação.

Já a autoignição, é caracterizada pelo facto de as temperaturas e pressões de mistura não queimada serem elevadas ao ponto de causar ignição espontânea. Esta ignição espontânea leva a que a energia química da mistura até ao momento não queimada seja libertada muito rapidamente, provocando um rápido aumento da pressão e a propagação de ondas de pressão de elevada amplitude, causando ressonâncias dos produtos contidos na câmara de combustão, que são caracterizadas pelo ruído metálico chamado detonação.

A pré-ignição pode provocar autoignição e vice-versa (Stone, 1992).

A combustão anormal levanta preocupações, pois quando é elevada pode causar danos graves no motor e torna-se uma fonte de ruídos anormais (Heywood, 1988).

2.1.5. Formação da mistura ar-combustível

A formação da mistura tem de ser realizada de modo a esta satisfazer as necessidades de combustível e ar do motor no seu regime de operação. Como será de esperar, a relação ar-combustível ideal é aquela que permite que o motor funcione com a máxima potência e o mais baixo consumo possível, mantendo um funcionamento suave e fiável. Na realidade, tal fato não se verifica tão linear, sendo necessário considerar as regulamentações de emissões, dependendo também da velocidade e da carga de funcionamento do motor (Heywood, 1988). Normalmente a mistura é analisada ou quantificada através da razão ar-combustível e do fator de excesso de ar (λ), discutidos no capítulo 4.

Existem três tipos de misturas: mistura estequiométrica, mistura rica e mistura pobre. A mistura estequiométrica é aquela em que existe a quantidade de ar exatamente necessária para a completa combustão do combustível. No caso da mistura rica, a quantidade de ar será inferior à estequiométrica enquanto que no caso da mistura pobre a quantidade de ar será superior à necessária para queimar o combustível na sua totalidade.

As necessidades de relação ar/combustível requeridas por um motor variam de acordo com três tipos de funcionamento. Mais concretamente são o funcionamento ao ralenti, a velocidade de cruzeiro e em aceleração.

No funcionamento ao ralenti o motor funciona sem carga e com a borboleta de admissão praticamente fechada. Neste caso será necessária uma mistura rica, devido ao fato de haver reentrada de gás de escape no cilindro, causada pelas condições de pressão na câmara de combustão e na admissão. A pressão na admissão será muito inferior à atmosférica, devido à restrição na entrada de ar, e então, no momento da abertura da válvula de admissão a diferença de pressões entre a câmara de combustão e o coletor de admissão provoca um regresso dos gases de escape ao cilindro. Este regresso dos gases de escape é acentuado pelo movimento descendente do pistão, no momento de admissão. Estes gases de escape irão juntar-se à mistura admitida, dificultando o contato entre as partículas de combustível e o ar, o que provoca uma combustão fraca. Tal fato deve-se a haver menos ar na câmara de combustão do que se a borboleta estivesse totalmente aberta, sendo a quantidade de gás de escape que reentra muito superior à de ar. Consequentemente a potência é diminuída, sendo necessário introduzir mais partículas de combustível, ou seja, enriquecer a mistura, o que aumenta a probabilidade de contato entre as partículas de combustível e o ar, melhorando assim a combustão.

Por sua vez, no funcionamento em velocidade de cruzeiro, o problema da diluição do ar com o gás de escape, provocada pela sua reentrada, torna-se insignificante, pois a borboleta encontra-se numa posição que permite uma maior entrada de ar. Nesta situação é pretendida preferencialmente uma melhor economia de combustível, a mistura tem de ser empobrecida e mais aproximada da estequiometria.

Finalmente, em aceleração, a borboleta está aberta ao máximo e será requerida novamente uma mistura mais rica. Como é pretendida mais potência substitui-se a relação ar/combustível que permite um funcionamento mais económico por uma que permite uma potência máxima ou próxima de máxima, dependendo do propósito do motor. Utilizar uma mistura mais rica contribuirá para prevenir o sobreaquecimento da válvula de escape ou da área em volta, já que a temperatura de chama e do cilindro será inferior, prevenindo danos na válvula e combustão anormal. Como no funcionamento em velocidade de cruzeiro a massa de carga será inferior, a tendência de sobreaquecimento da válvula de escape também será inferior (Ganesan, 2003).

Para uma completa combustão da gasolina, a mistura teórica correta (estequiométrica) é 14,7 partes de ar para 1 parte de combustível, o que equivale a $\lambda=1$. Se por exemplo $\lambda=0.9$, a mistura será 10% mais rica, e se $\lambda=1.1$, a mistura será 10% mais pobre. Geralmente, misturas que sejam fora do intervalo de $\lambda=0.8$ e $\lambda=1.2$ (11.76:1 até 17.6:1) não irão arder completamente. Acima de $\lambda=1.25$ e abaixo de $\lambda=0.4$ (18:1 e 5:1, respetivamente) a ignição por faísca dificilmente ocorre com fiabilidade. De notar que os valores apresentados não são totalmente precisos, pois a ignição também é afetada pela velocidade de movimento da

carga de entrada e pela proximidade da temperatura de compressão à temperatura de autoignição (Garret, 1991).

Num motor, a formação da mistura é controlada pelo sistema de admissão, que, normalmente, consiste numa borboleta para regulação da entrada de ar, um coletor de admissão e um carburador ou injetores.

2.1.6. Sistema de injeção eletrónica

Nas últimas décadas, a configuração da injeção nos motores mudou de carburador para injeção monoponto, e, mais tarde para injeção multiponto. Tal fato deveu-se à necessidade de ter um maior controlo da relação ar/combustível, de modo a respeitar a legislação relativa às emissões e a diminuir o consumo de combustível. (Solomon, Anderson, Najt, & Zhao, 2000).

Como se referiu anteriormente, no motor utilizado a admissão de combustível é realizada através de um injetor. A injeção é eletrónica, isto é, é controlada pela UCE. Neste tipo de sistema uma bomba de combustível força a entrada de gasolina sob pressão no injetor (Crouse & Anglin, 1995).

Um injetor consiste num bocal que injeta um *spray* de combustível que é misturado com o ar proveniente da admissão. O combustível é impedido de sair na zona do bico do injetor e está sujeito a alta pressão. Quando o momento certo chegar o bico do injetor é aberto, através de um sinal fornecido pela UCE, durante o tempo necessário para a quantidade pretendida de combustível sair, empurrado pela pressão exercida pela bomba (Pulkrabek, 1997).

No caso da injeção monoponto, os injetores são colocados no coletor de admissão, antes da borboleta do acelerador, enquanto que, no caso da injeção multiponto, é colocado um injetor em cada entrada de admissão na cabeça do motor, para cada cilindro (Crouse & Anglin, 1995). No caso do motor ensaiado, o tipo de injeção utilizada é a injeção multiponto.

Um outro tipo de injeção, a injeção direta, na qual o injetor se encontra em contato com a câmara de combustão, apresenta muito potencial no aumento da eficiência e da potência dos motores de combustão interna de ignição por faísca (Solomon, Anderson, Najt, & Zhao, 2000).

Como a mistura ar/combustível é formada diretamente na câmara de combustão, existe um melhor arrefecimento da mesma, podendo o motor trabalhar com maior compressão, o que

permite uma melhor eficiência e a redução do consumo de combustível, assim como uma melhoria na dinâmica da condução (Robert Bosch GmbH, 2016).

Um motor equipado com este tipo de injeção tem potencial para obter uma economia de combustível superior à de um motor diesel a cargas parciais e para ter um desempenho superior ao de um motor de ignição por faísca a cargas elevadas (Kume, et al., 1996).

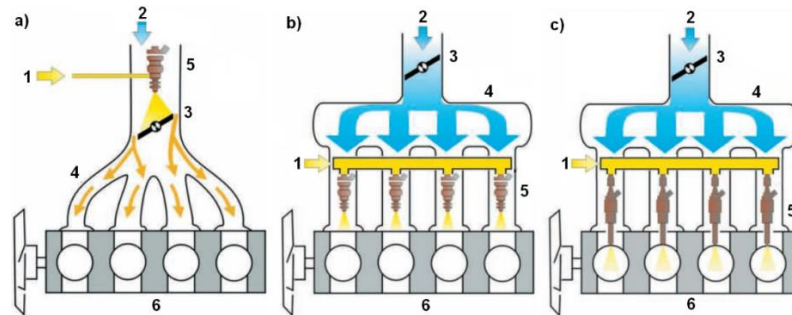


Figura 2-4: Vários tipos de injeção (Sendyka & Noga, 2013).

Na figura 2-4 podem observar-se três tipos de injeção eletrônica:

- a) Monoponto;
- b) Multiponto;
- c) Direta.

Os componentes dos sistemas de injeção na figura 4 são:

- 1. Alimentação de gasolina;
- 2. Admissão de ar;
- 3. Borboleta de admissão;
- 4. Coletor de admissão;
- 5. Injetor de combustível;
- 6. Motor.

2.1.7. Sistema de ignição eletrônica

O sistema de ignição tem como função a produção de uma faísca dentro do cilindro, perto do momento final do tempo de compressão, acendendo a mistura ar-combustível presente.

A maioria dos sistemas de ignição têm um princípio de funcionamento semelhante, no qual um enrolamento da bobina é ligado e desligado, induzindo uma alta-tensão num segundo enrolamento, com maior número de espiras. A referida alta-tensão permite a produção de uma faísca através dos elétrodos da vela de ignição (Denton, 2004).

Existem vários sistemas de ignição eletrônica:

1. Com distribuidor e avanço mecânico centrífugo e a vácuo;
2. Com distribuidor e avanço eletrônico;
3. Sem distribuidor com várias bobinas de ignição;
4. Sem distribuidor e com uma bobina de ignição para cada vela (eliminam-se os cabos de vela).

O motor Honda GX120 utilizado na componente experimental deste trabalho está equipado com o terceiro tipo, no entanto só utiliza uma bobina, pois o motor é monocilíndrico. Neste sistema cada bobina pode fazer disparar duas velas em simultâneo, correspondentes a pistões que estão na mesma posição, apesar de um se encontrar no tempo de compressão e o outro no tempo de escape.

Estes sistemas são constituídos por um circuito primário, de baixa tensão, e um circuito secundário, de alta tensão. Normalmente o circuito secundário é semelhante em todos, sendo o primário o que apresenta maiores diferenças.

As variações no circuito primário podem ser observadas no tipo de comutador primário. O comutador primário é um dispositivo que liga e desliga a corrente no primário, e esta ação pode ser despoletada por uma bobina de captação magnética, um comutador por efeito de Hall ou um sensor ótico. O sinal do comutador é enviado para um módulo de comando ou para a UCE, de modo a abrir o circuito primário.

Na ignição eletrônica sem distribuidor e com bobina, um sensor (por exemplo, sensor de Hall) deteta a posição da cambota e informa a UCE ou módulo de controlo. Por sua vez, a UCE ou o módulo irá distribuir e comutar no momento adequado a transmissão de alta tensão até às velas de ignição (Crouse & Anglin, 1995).

A utilização de ignição eletrônica permite um controlo dos momentos de ignição com precisão, para aplicações sob um conjunto de determinadas condições de funcionamento. Para além da carga e da velocidade do motor, torna-se possível utilizar entradas como a temperatura do ar ambiente e do fluido refrigerante e ter a detonação em conta. A UCE será o sistema responsável por controlar a ignição, através do mapa de ângulo de avanço de

ignição. Atualmente a maior parte dos sistemas eletrônicos utiliza transistores em vez de contadores, para comutar, e geradores de pulsos para enviar o sinal temporizador (Denton, 2004).

2.1.7.1. Avanço de ignição

Para se obter uma eficiência ótima, o ângulo de ignição deve ser tal que a pressão máxima de combustão ocorra a cerca de 10° depois do PMS. No entanto, o tempo de ignição ideal depende de dois fatores principais, a velocidade e a carga do motor. Caso a velocidade do motor seja aumentada, será necessário um avanço do tempo de ignição. A altas velocidades do motor o tempo para que o pistão se desloque entre o PMS e o PMI diminui, e, como normalmente o tempo necessário para a mistura arder é constante (cerca de 2ms), um avanço do disparo da faísca permite que uma queima total ocorra.

Em situações de carga no motor também será necessário alterar o tempo de ignição, já que uma mistura mais pobre utilizada numa condição de reduzida carga irá arder a uma taxa mais lenta. Será então necessário um avanço do tempo de ignição. Contrariamente, numa situação de maior carga e mistura mais rica, a queima será mais rápida, sendo necessária uma diminuição do avanço de ignição.

Chega-se à conclusão de que para determinada condição de funcionamento será necessário determinar um avanço de ignição ideal, de modo a que se assegure que a pressão máxima é atingida no cilindro, pouco depois do PMS. Terá de se ter em conta que a temperatura do motor pode ser influenciada, assim como o risco de detonação aumentado (Denton, 2004).

Os motores equipados com ignição eletrônica normalmente dispõem de avanço de ignição eletrônico. O avanço de ignição eletrônico é controlado pela UCE ou módulo de controlo de acordo com as leituras efetuadas por vários sensores. A UCE irá determinar o avanço necessário através de um mapa de avanço ignição e enviar um sinal que faz com que o primário abra e a vela dispare no momento pretendido (Crouse & Anglin, 1995).

O ângulo de avanço da ignição também irá influenciar a forma como a combustão ocorre e, consequentemente, a emissão de poluentes (ver figura 2-5).

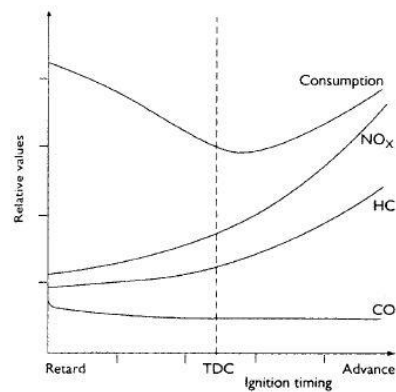


Figura 2-5: Influência do avanço de ignição nas emissões e no consumo de combustível (Denton, 2004).

2.1.8. Emissões de acordo com a relação ar-combustível

As emissões de poluentes contêm normalmente em maioria monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrogénio (NO_x) e hidrocarbonetos não queimados (HC). Estas emissões irão ser diferentes de acordo com o motor em causa, e dependem de variáveis como os tempos de ignição, a carga e a velocidade do motor, e em particular com a relação ar-combustível, no caso do motor de ignição por faísca.

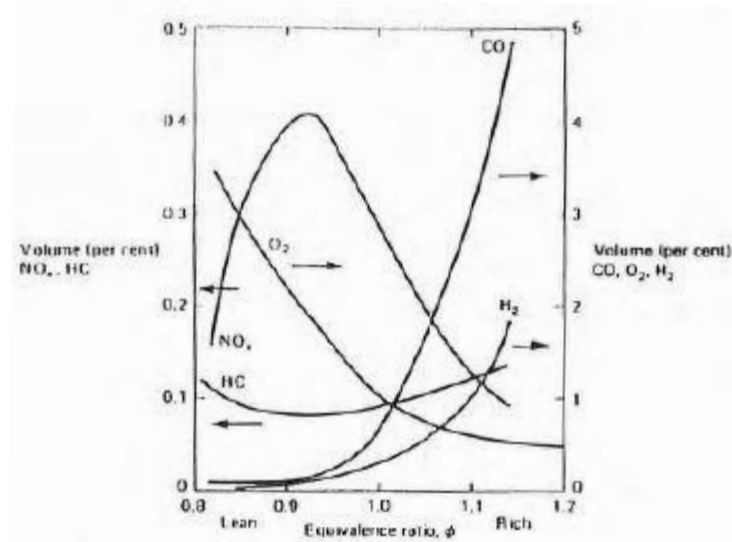


Figura 2-6: Variação das emissões com a razão de equivalência num motor de ignição por faísca (Stone, 1992).

Para melhor entender a figura 2-6, torna-se necessário consultar a equação (2.4), relativa à razão de equivalência, Φ , de modo a perceber como esta se relaciona com a razão ar combustível. É importante referir que, uma razão de equivalência superior a 1 corresponde a uma mistura rica, e uma razão de equivalência inferior a 1 corresponde a uma mistura pobre.

O monóxido de carbono estará mais concentrado em misturas ricas, pois irá ocorrer combustão incompleta, enquanto que com misturas pobres a sua presença é diminuída graças às temperaturas de combustão. As emissões de hidrocarbonetos são diminuídas com o excesso de ar, ou seja, mistura pobre, até ao ponto em que a reduzida inflamabilidade da mistura acaba por causar um aumento das emissões. As emissões de óxidos de azoto aumentam com a temperatura de chama, o que implicaria que tal fato aconteceria em misturas ligeiramente ricas. No entanto, a formação de óxidos de azoto também depende da velocidade de chama. Uma mistura pobre aliada à baixa velocidade de chama dará mais tempo para que os óxidos de azoto se formem. Uma velocidade de motor reduzida também contribui para a formação de NO_x .

As emissões de CO e HC podem ser reduzidas utilizando misturas pobres, no entanto a potência do motor é reduzida. Utilizando, como alternativa, catalisadores do gás de escape permite-se que o processo de oxidação seja completo.

Para reduzir as emissões de NO_x existem mais soluções seja por redução da temperatura de chama ou da duração da queima. Diminuir o avanço de ignição é muito efetivo, mas tem como desvantagem o fato de contribuir para uma diminuição da potência do motor e aumentar os consumos. A utilização de recirculação dos gases de escape diminui a velocidade e a temperatura de chama, permitindo reduções de emissões significativas. Os catalisadores também podem ser utilizados para reduzir os NO_x em oxigénio e azoto, no entanto a oxidação de CO e HC em simultâneo dificulta o processo e é necessária a utilização de misturas próximas da estequiometria (Stone, 1992).

2.2. A unidade de comando eletrónico do motor (UCE)

Os sistemas de injeção e ignição eletrónica necessitam de ser controlados e regulados. Deste modo, a maioria dos sistemas eletrónicos automóveis incluem um módulo de controlo eletrónico, comumente conhecido como unidade de comando eletrónico, UCE. É possível, por este meio, controlar sistemas do motor, da transmissão de potência e de informação ao condutor.

Esta tecnologia permite um maior controlo e diminuição das emissões de poluentes, assim como faz com que o motor funcione com a maior economia de combustível possível. Apesar destas restrições, o motor poderá atingir a sua potência máxima sempre que necessário (Crouse & Anglin, 1995).

2.2.1. Descrição e funcionamento

Um sistema de controlo eletrónico é construído por três partes básicas, dispositivos de entrada, como por exemplo botões e sensores, dispositivos de controlo, como é o caso do microprocessador, e, dispositivos de saída, que podem ser, por exemplo, atuadores e *relays*. Um atuador é um dispositivo que converte energia hidráulica, elétrica ou pneumática, usualmente em movimento mecânico. Por sua vez, um *relay* é um dispositivo eletrónico que abre ou fecha um circuito mediante a receção de um sinal de tensão elétrica.

Deste modo, a UCE recebe informação de vários sensores instalados no motor, e em seguida responde, enviando sinais que irão permitir o controlo de outros circuitos elétricos ou sistemas mecânicos (Crouse & Anglin, 1995).

2.2.2. Mapas

Os tempos de injeção e ângulos de ignição são armazenados na UCE na forma de mapas. Os mapas consistem em tabelas, nas quais, as rotações do motor e a carga estão contempladas nos eixos. Torna-se assim importante definir o conceito de carga: consiste na atual massa de ar que entra no cilindro, dividida pela massa ideal que poderia ser introduzida no mesmo. A massa ideal, em condições de pressão de 1 bar e a uma temperatura de 0°C corresponde à cilindrada do motor (Ecotrons LLC).

No caso do mapa de injeção, serão os tempos de injeção a estar representados na tabela, em função das rotações do motor e da carga. Já no caso do mapa de ignição, será o ângulo de avanço de ignição que será contemplado, em função das rotações do motor e da carga (Haltech).

2.3. Parâmetros de desempenho

De modo a melhor entender o cálculo dos mapas e a conseguir analisar os resultados obtidos no capítulo da componente experimental, é necessário definir os parâmetros de desempenho tipicamente utilizados.

2.3.1. Taxa de compressão

A taxa de compressão consiste na razão entre o volume do cilindro quando o pistão se encontra no ponto morto inferior e o volume quando o pistão se encontra no ponto morto superior (Heywood, 1988). Uma taxa de compressão elevada irá corresponder a um maior rendimento do motor, no entanto, é necessário ter em conta o aumento da possibilidade de ocorrência de combustão anormal, mais concretamente detonação. A ocorrência de detonação influencia negativamente o rendimento do motor, provoca diminuição de potência e causa danos no pistão e no cilindro (Pulkrabek, 1997).

$$r_c = \frac{V_{PMI}}{V_{PMS}} = \frac{V_c + V_d}{V_c} \quad (2.1)$$

V_c - Volume varrido (cilindrada) [m^3]

V_d - Volume da câmara de combustão [m^3]

r_c - Razão de compressão

2.3.2. Razão ar-combustível

A energia que faz um motor funcionar provém da combustão de combustível. Para poder haver combustão é necessário ar, que irá fornecer oxigénio, essencial para a reação química ocorrer. Os valores adequados de oxigénio e combustível têm de ser garantidos, de modo a ser possível que a reação de combustão se realize.

A razão ar-combustível é um parâmetro utilizado para descrever a razão de mistura (Pulkrabek, 1997):

$$\frac{A}{F} = \frac{m_a}{m_f} = \frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_f} \quad (2.2)$$

Em que:

m_a - Massa de ar [kg]

\dot{m}_a - Caudal mássico de ar [kg/s]

m_f - Massa de combustível [kg]

\dot{m}_f - Caudal mássico de combustível [kg/s]

2.3.3. Fator de excesso de ar, *Lambda*

Consiste no quociente entre a relação ar-combustível real e a relação ar-combustível estequiométrica. A relação ar-combustível estequiométrica será aquela em que existe exatamente a quantidade de oxigênio necessária para a combustão completa do combustível. Normalmente situa-se entre 0,6, correspondente a mistura rica, e 1,5, correspondente a mistura pobre.

Tabela 1: Condições de λ para mistura, rica, pobre e estequiométrica (Rech, 2002).

Mistura	λ
Rica	< 1
Pobre	> 1
Estequiométrica	$= 1$

O quociente *Lambda* tem uma grande influência na potência, nas emissões e no consumo de combustível (Martyr & Plint, 2007).

Lambda (λ) será representado pela seguinte equação:

$$\lambda = \frac{(A/F)_{real}}{(A/F)_s} \quad (2.3)$$

Lambda será também igual ao inverso da razão de equivalência, Φ :

$$\Phi = \frac{(A/F)_s}{(A/F)_{real}} \quad (2.4)$$

2.3.4. Rendimento volumétrico

O rendimento volumétrico é o parâmetro que permite medir a eficácia do processo de indução de um motor. O sistema de admissão de um motor, para uma dada cilindrada, irá restringir a quantidade de ar que o motor pode induzir. Por definição, o rendimento volumétrico consiste no quociente entre o caudal mássico de ar na admissão e a taxa de volume de ar que é movimentado pelo pistão (Heywood, 1988):

$$\eta_v = \frac{2\dot{m}_a}{\rho_{i,a}V_dN} \quad (2.5)$$

Em que:

\dot{m}_a - Caudal mássico de ar introduzido no cilindro por ciclo [kg/s]

$\rho_{i,a}$ - Massa específica do ar de admissão [kg/m³]

V_d - Volume deslocado pelo pistão [m³]

N - Velocidade de rotação do motor [rot/s]

2.3.5. Binário e potência útil

Usualmente, o binário é medido pelo meio de um dinamómetro. O motor é colocado num banco de ensaio e acoplado ao dinamómetro, que irá “travar” o motor a uma certa velocidade ou com um determinado binário. O dinamómetro é constituído por um rotor ligado ao motor e por um estator apoiado em rolamentos e travado sobre uma célula de carga, colocada a uma distância b e resultando numa força F , medida pela célula (Martins, 2011). O binário será o resultado da seguinte equação:

$$T = F \times b \quad (2.6)$$

Em que:

T - Binário [N.m]

F - Força [N]

b - Braço [m]

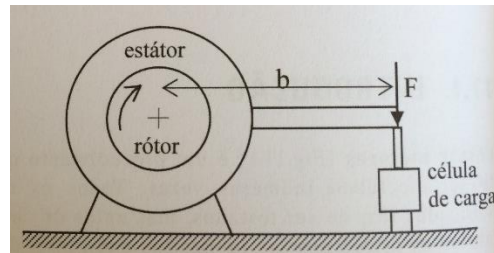


Figura 2-7: Esquema de um dinamômetro (Martins, 2011).

Por sua vez, a potência útil, consiste no produto do binário do motor com a velocidade do mesmo (Heywood, 1988):

$$P = 2\pi NT \quad (2.7)$$

Em que:

P - Potência útil [J]

N - Rotações [rot/s]

T - Binário [N.m]

2.3.6. Consumo específico de combustível

Em testes de motores, o consumo específico de combustível é o parâmetro medido para determinar a eficiência com que o motor está a utilizar o combustível fornecido, para produzir trabalho. É definido como o caudal mássico a dividir pela potência efetiva e é expressa em g/kW.s (Heywood, 1988).

$$SFC = \frac{\dot{m}_f}{P} \quad (2.8)$$

Em que:

SFC - Consumo específico de combustível [g.kW/s]

\dot{m}_f - Caudal mássico de combustível introduzido no cilindro por ciclo [g/s]

P - Potência [kW]

2.3.7. Pressão

A pressão p , gerada dentro de um circuito fechado, exercendo uma força F num cilindro com área de contato A , é dada pela equação (Majumdar, 2003):

$$p = \frac{F}{A} \quad (2.9)$$

Em que:

p - Pressão [N/m²]

F - Força [N]

A - Área de contato [m²]

3. Componente experimental

Para a realização da componente experimental deste trabalho foi utilizado um motor Honda GX120, equipado com sistemas de injeção e ignição eletrônica, controlados por uma UCE *MegaSquirt 2*, com os sensores necessários ao seu funcionamento.

Foram realizadas algumas alterações à instalação encontrada no início da realização desta dissertação, tendo em vista uma melhor fiabilidade do motor e da UCE, fatores que também contribuem para o bom desempenho pretendido.

Por fim realizaram-se ensaios, que permitiram chegar a mapas de controlo otimizados e fornecer os dados necessários para a análise dos parâmetros de desempenho do motor.

3.1. Especificações do motor

As especificações do motor utilizado são apresentadas na tabela seguinte:

Tabela 2: Especificações do motor (Honda Engines, 2016).

Tipo de motor	Arrefecido a ar, 4 tempos, OHV, monocilíndrico
Diâmetro x curso	60 x 42 mm
Cilindrada	118 cm ³
Potência útil/rotação	3.5 HP (2.6kW) @ 3600 rpm
Binário útil	5.4 lb.ft (7.7N.m) @ 2500 rpm
Rotação do eixo de transmissão	Sentido anti-horário (do lado do eixo de transmissão)
Taxa de compressão	8.5:1 (alterada para 10.0:1)
Carburador	Borboleta
Sistema de ignição	Magneto transistorizado
Sistema de arranque	Manual (retráctil)
Sistema de lubrificação	Por salpico
Regulador de velocidade	Mecânico
Capacidade de óleo do cárter	0.56 L
Combustível recomendado	Gasolina sem chumbo 86 ou superior
Peso seco	13 kg
Dimensões (CxLxA)	297x346x329 [mm]

A seguinte figura apresenta as curvas de potência e binário do motor:

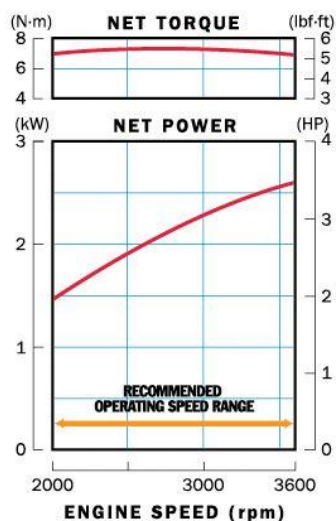


Figura 3-1: Curvas de potência e binário (Honda Engines, 2016).

3.2. Preparações iniciais e substituição da UCE Haltech

Apesar dos componentes necessários ao funcionamento da UCE já se encontrarem montados em trabalhos realizados anteriormente, foi necessário proceder a algumas alterações.

Para a eventualidade de ser necessário utilizar um mapa de enriquecimento de injeção no momento de uma aceleração rápida, e para servir como parâmetro de referência nos *datalogs*, foi necessário montar o sensor de posição da borboleta. Foi simultaneamente instalado um novo carburador, para funcionar como corpo de admissão e construído um suporte que permite a sua união com o sensor de posição da borboleta.



Figura 3-2: Montagem do sensor de posição da borboleta (fotografia de autoria própria).

Por sua vez, o sensor de *Hall*, que estava anteriormente montado do lado de transmissão, foi mudado para o lado do motor de arranque, sendo fabricado um novo veio de suporte da cremalheira do motor de arranque. Este novo veio alojaria dois ímanes que, seriam detetados pelo sensor de Hall, permitindo à UCE a contagem de rotações e determinar o momento de ignição. Este veio teve de ser alterado posteriormente, de modo a alojar o número de ímanes, e respetivo distanciamento radial, necessários ao funcionamento da nova UCE.



Figura 3-3: Montagem do sensor de Hall (fotografia de autoria própria).

Foi também construído um novo depósito de gasolina, devido ao anteriormente utilizado ser necessário para outro trabalho. Este novo depósito pode ser observado na figura 3.4.



Figura 3-4: Depósito de combustível (fotografia de autoria própria).

Ao verificar o sistema de ignição eletrónica, verificou-se que a bobina estava avariada, e procedeu-se à instalação de uma nova. O cabo de vela encontrava-se em mau estado, e foi também substituído.



Figura 3-5: Cabo de vela (à esquerda) e bobine de ignição (à direita) (fotografias de autoria própria).

O manómetro de medição de pressão do circuito hidráulico teve de ser substituído, devido a avaria. Foi necessário encontrar um manómetro com a escala adequada à gama de valores a serem medidos, mas que também tivesse margem de manobra para resistir a alguns aumentos repentinos de pressão que se aproximassem do fim da escala. Foram testados vários manómetros até chegar ao adequado. Após cada troca de manómetro o circuito hidráulico foi purgado, de modo a garantir o melhor funcionamento e melhores medições possíveis.



Figura 3-6. Manómetro para medição da pressão no circuito hidráulico do dinamómetro (fotografia de autoria própria).

No início do procedimento experimental a UCE *Haltech* avariou, sendo necessário proceder à sua substituição. Realizou-se assim a instalação da UCE *MegaSquirt 2*, que tem como vantagens a utilização de um *software* mais recente, com melhores ferramentas e *interface*.



Figura 3-7: A UCE *MegaSquirt 2* (fotografia de autoria própria).

Como a UCE *MegaSquirt 2* não inclui sensores (exceto o sensor MAP), decidiu-se utilizar os sensores provenientes da UCE *Haltech*. Para tal, foi necessário consultar os diagramas de ligações de ambas as UCE's, de modo a conseguir identificar todos os cabos e realizar as adaptações necessárias.

Terminadas e confirmadas as ligações, procedeu-se à inicialização do *software TunerStudio MS*, no qual se definiram as configurações iniciais, relativas ao motor, injetor e ao tipo de sensor de rotação/posição do motor.

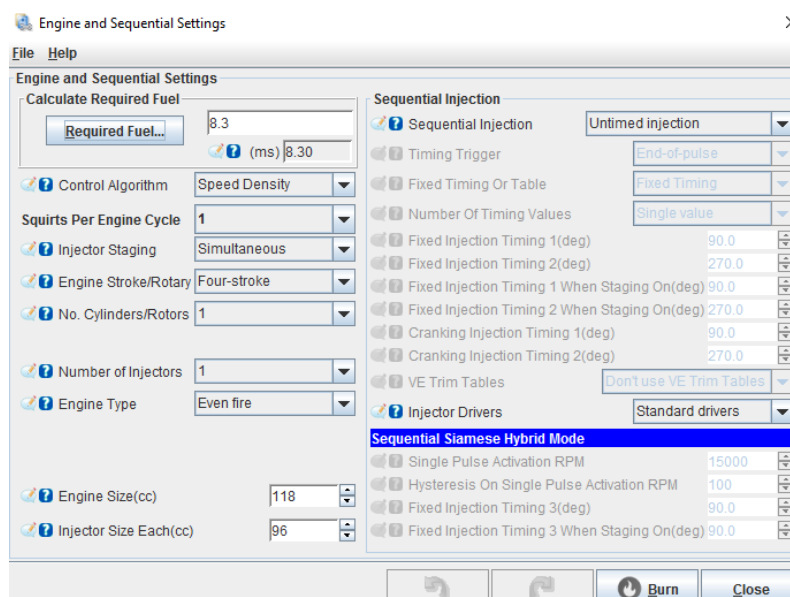


Figura 3-8: Menu de configurações do motor e injeção.

Na figura 3-8 pode observar-se o menu onde se introduzem os dados relativos ao motor e ao injetor utilizado. São definidas as opções de um cilindro e de um injetor, assim como introduzida a cilindrada do motor e o caudal do injetor. Como neste caso a injeção não é sequencial, é escolhida a opção “*untimed injection*”. Em seguida, clicando na opção “*Required fuel*”, é calculado o tempo em milissegundos que o injetor terá de estar aberto numa situação de combustão estequiométrica e eficiência volumétrica de 100%.

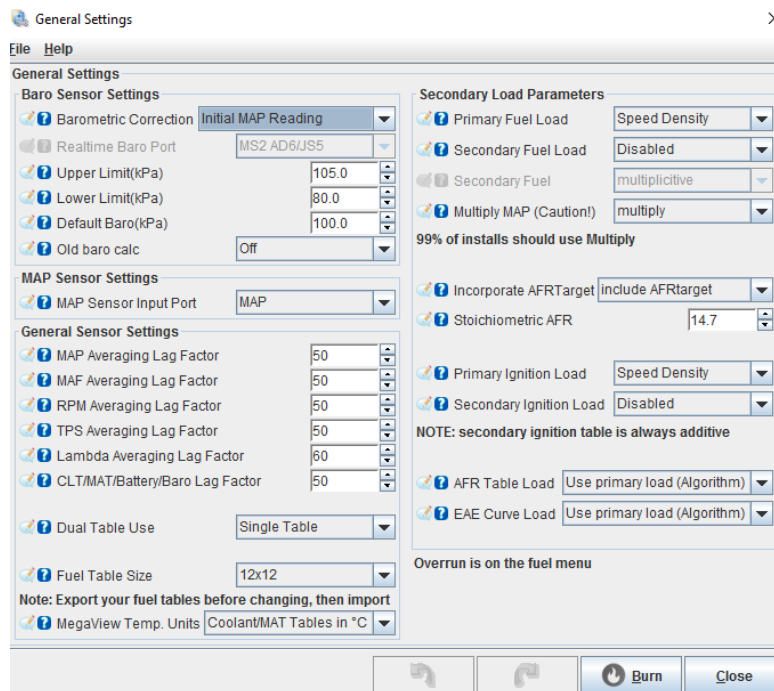


Figura 3-9: Menu de configurações gerais.

As configurações gerais são definidas no menu apresentado na figura 3-9. As definições essenciais a definir neste menu consistem no tipo de medição de carga, que neste caso é por sensor MAP. Este sensor mede a pressão absoluta na admissão. A carga pelo meio do sensor MAP é definida no menu pela opção “*speed density*”.

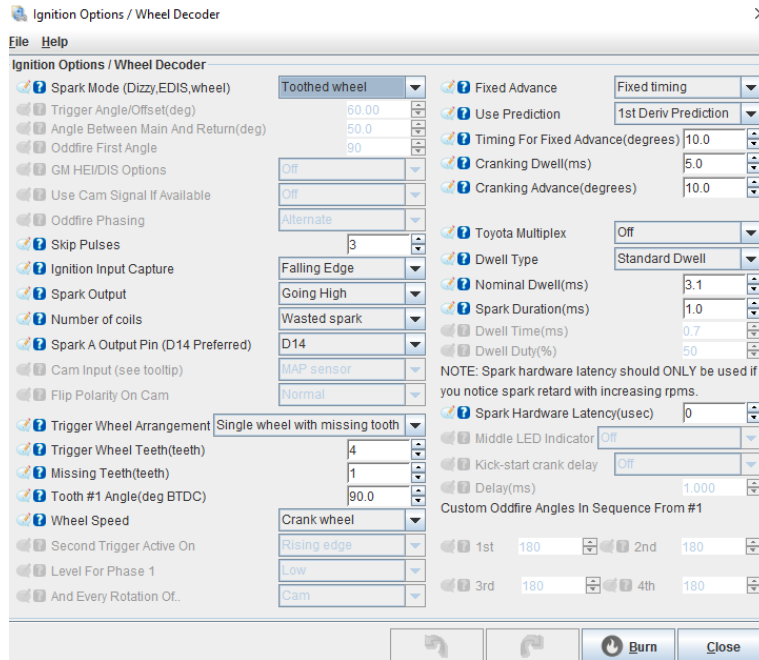


Figura 3-10: Menu de configuração da ignição e do sensor de rotação/posição do motor.

O menu representado na figura 3-10 tem como opções mais relevantes a definição do tipo de sensor de rotação e posição do motor, assim como a definição de um ângulo de avanço de ignição fixo ou mapa de ângulo de avanço de ignição.

Foi utilizado como sensor uma aproximação a uma roda dentada típica, na qual falta um dente e é por aí que a UCE consegue determinar a posição e velocidade do motor. Esta aproximação consistiu numa roda com três ímanes e um espaço onde estaria um quarto íman (figura 3-3). O espaçamento entre os três ímanes e o local onde estaria o quarto é de 90°, e este sistema funciona como uma roda dentada de quatro dentes, com um em falta. O sensor Hall deteta a passagem dos três ímanes, que a UCE interpreta como dentes.

3.2.1. Calibração do *trigger angle*

No campo *Tooth #1 angle BTDC*, do menu representado na figura 3-10, coloca-se a localização, do íman que tem de ser considerado o dente número 1. A maneira mais simples de saber qual o valor deste ângulo consiste na utilização do *Picoscope*, um osciloscópio.

Ligando um canal ao cabo de vela do sistema de ignição por magneto que equipa originalmente o motor, e, ligando o segundo canal ao cabo de vela do sistema de ignição eletrónica, é possível visualizar a tensão que passa em cada cabo.

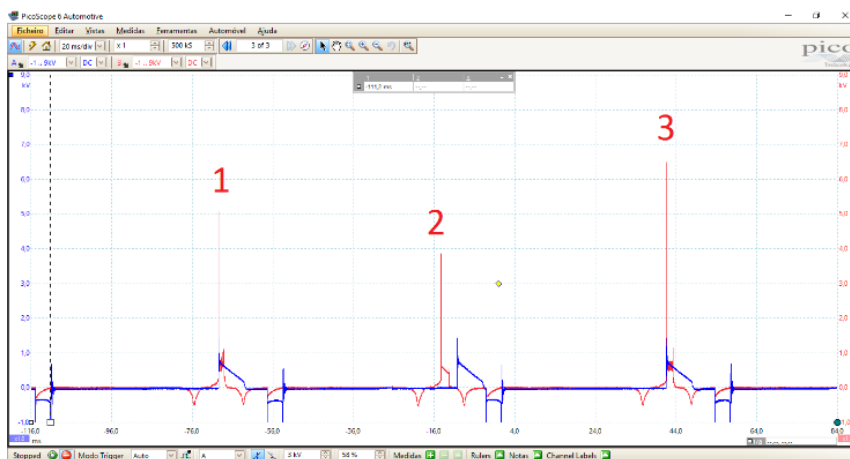


Figura 3-11: Interface do Picoscope.

O objetivo consiste em colocar um valor de ângulo, no campo *Tooth #1 angle BTDC*, que permita que os maiores picos de tensão que passam em cada cabo de vela, ocorram no mesmo instante, já que, inicialmente, estes picos normalmente se encontram desfasados. Os picos correspondem ao disparo da faísca da vela de ignição e na figura 3-11 pode verificar-se o seu sincronismo, após a determinação do ângulo correto.

Foi possível determinar o ângulo, medindo com as devidas ferramentas do *software* do Picoscope, o intervalo de tempo entre os pontos 1 e 3 da figura 3-11, que correspondem ao disparo executado pelo sistema de ignição por magneto (onda vermelha) nos PMS em que ocorre combustão (este intervalo corresponde também a um ciclo completo do funcionamento do motor). Em seguida, mediu-se o intervalo de tempo entre o pico número 1 e o pico mais alto da onda azul, correspondente ao disparo do sistema de ignição eletrónica.

Com os valores dos dois intervalos, e sabendo que um ciclo completo do motor se realiza em 360°, foi possível determinar o ângulo da diferença entre os dois primeiros picos de ambos os sistemas de ignição, valor esse, correspondente a 206° e que permitiu assim, o sincronismo.

O pico número 2 da figura 3-11, corresponde a um disparo no tempo de escape. Este disparo deve-se ao fato de o motor ser a 4 tempos, passando o magneto duas vezes pela bobine em cada ciclo, existindo, portanto, um disparo no tempo correto e outro durante a fase de escape (*wasted spark*). Este disparo pode ser removido, com a utilização da ignição eletrónica, escolhendo a opção adequada no menu representado na figura 3-10.

Como o sincronismo do momento de ignição do sistema eletrónico foi acertado pelo valor do ângulo de ignição por defeito no motor, que corresponde a 25° antes do PMS, será necessário, antes de aplicar o mapa de ângulo de avanço de ignição, subtrair esse valor aos 206°, de modo ao ângulo de ignição de referência para o mapa ser de 0° (*MegaSquirt*).

Verificou-se que a onda do pulso gerado pela ignição eletrónica não tem a forma correta. Antes de cada pico é necessário haver um período de tempo de carga da bobina, o qual não se observa na figura 3-11. Este comportamento pode ser causado por avaria da bobina, ou definição errada do tempo de carga (*dwell time*), no menu da figura 3-10. O término do tempo disponível para a realização desta dissertação, não permitiu a resolução deste problema.

3.3. A UCE *MegaSquirt 2*

A UCE *MegaSquirt 2* permite a programação de mapas de rendimento volumétrico, que controla os tempos de injeção, do mapa de relação ar-combustível alvo e do mapa de avanço do ângulo de ignição. Também é possível programar mapas de correção, como por exemplo:

- Enriquecimento da mistura de acordo com a temperatura do refrigerante;
- Ajuste da mistura de acordo com a temperatura do ar;
- Correção da mistura de acordo com a tensão da bateria;
- Acelerador no mínimo;
- Acelerador no máximo.

Existe também a possibilidade de programar mapas de correção do ângulo de avanço de ignição:

- Avanço da cambota;
- Atraso/avanço de acordo com a temperatura do refrigerante;
- Atraso/avanço de acordo com temperatura do ar.

É possível programar um limite de rotações e corte de injeção ao deixar de acelerar, assim como funcionamento em malha fechada (*closed loop*), de acordo com as leituras da sonda *Lambda* e com o mapa de relação ar-combustível alvo (*MegaSquirt*).

3.3.1. Sensor MAP

O sensor MAP (*Manifold Air Pressure*) é utilizado para converter a pressão no coletor de admissão num sinal elétrico, que a UCE poderá utilizar. O sensor trabalha com pressões absolutas, portanto a sua calibração não é afetada por alterações da pressão barométrica. Para o funcionamento deste sensor, é ligado um tubo à admissão, depois da borboleta. A outra ponta do tubo é ligada ao sensor, e, quando a borboleta está completamente fechada cria-se vácuo. A abertura da borboleta é proporcional à carga sobre a qual o motor está a trabalhar, diminuindo o vácuo conforme se acelera. A UCE utiliza um sinal elétrico como referência da carga. Para o caso de um motor, normalmente aspirado, o sensor mede pressões entre 0kPa (vácuo) e 100kPa (pressão atmosférica). A ligação do tubo à admissão pode ser observada na figura 3-12, a outra extremidade é colocada no sensor, dentro da UCE.



Figura 3-12: Sistema de admissão (fotografia de autoria própria).

3.3.2. Sensor de temperatura do óleo

Normalmente, para se consultar a temperatura de funcionamento do motor, seria utilizado um sensor de temperatura do líquido refrigerante. Como o motor utilizado é refrigerado a ar, um sensor de temperatura do óleo, instalado no cárter, torna-se necessário para o conhecimento da temperatura de funcionamento do motor. Tal situação está contemplada no manual da UCE.

A utilização deste sensor permite determinar correções de acordo com a temperatura lida, sendo ajustada a mistura de combustível e também é criada uma proteção contra sobreaquecimentos.



Figura 3-13: Sensor de temperatura do óleo (fotografia de autoria própria).

3.3.3. Sensor de temperatura do ar de admissão

Este sensor é utilizado para compensar alterações na densidade do ar, devida à temperatura. Como o ar frio é mais denso do que o ar quente, será então necessário maior volume de combustível, de modo a que a relação ar/combustível pretendida seja respeitada. O sensor pode ser observado na figura 3-14.



Figura 3-14: Sensor de temperatura do ar da admissão.

3.3.4. Sensor de posição da borboleta

O sensor de posição do acelerador é montado no veio da borboleta de admissão. A sua função é medir a rotação da borboleta, de modo a que a UCE possa determinar a sua posição. Num momento em que o acelerador esteja fechado, a UCE irá ler uma posição de 0%. Valores superiores, até um máximo de 100%, serão lidos à medida que se acelera. O sensor pode ser observado na figura 3-2, do subcapítulo 3.2.

3.3.5. Sensor de rotação/posição do motor (Efeito de Hall)

Como o nome indica, o sensor de rotação permite à UCE determinar o número de rotações por minuto a que o motor está a funcionar num dado momento. No caso da UCE *Haltech E6M*, tal função é realizada por meio de um sensor de Hall.

O sensor Hall produz uma onda quadrada, que será importante para que a UCE possa controlar o sistema de ignição eletrónica. Cada onda quadrada será interpretada pela UCE como um dente de uma roda dentada.

O seu princípio de funcionamento, tendo em conta a atual aplicação, é o seguinte: três ímanes irão passar pelo sensor, consecutivamente, e, o sensor irá mudar de estado, cada vez que um novo íman passar, fazendo assim transições de alto para baixo ou de baixo para alto, produzindo a referida onda quadrada. No momento em que passa o local onde estaria instalado um quarto íman, a UCE apercebe-se que a cambota já deu uma volta completa, sendo assim possível a contagem de rotações e o conhecimento da posição do motor. O número de ímanes pode ser diferente, dependendo da roda dentada utilizada. O sensor encontra-se representado na figura 3-3, no subcapítulo 3.2.

3.3.6. Sonda *Lambda*

A utilização de uma sonda *Lambda*, ou sensor de oxigénio, permite verificar o estado da mistura ar-combustível. Existem dois tipos de sonda *Lambda*, *narrowband* (mais antiga) e *wideband* (mais moderna). A primeira, aplicada na instalação experimental utilizada na realização deste trabalho, apenas permite saber se a relação se encontra rica, estequiométrica ou pobre, a segunda, permite uma exata determinação da relação ar-combustível real.

Como as condições de estequiometria variam de acordo com as circunstâncias a que o motor está a trabalhar, pode ser necessário realizar pequenas correções de modo a que seja

injetado o combustível necessário, a consumindo-se todo o oxigênio admitido na câmara de combustão. É também importante que não fique nenhum combustível por queimar após a combustão.

Utilizando uma sonda *Lambda wideband*, é possível utilizar a função de controle por malha fechada, que permite à UCE adaptar os mapas de injeção a pequenas variações da qualidade do combustível e do funcionamento do dia-a-dia, conduzindo a uma melhor economia e menores emissões. Com uma sonda *narrowband* também pode utilizar-se a função de controle de malha fechada, no entanto esta só pode funcionar em situações onde se pretenda uma relação ar-combustível estequiométrica.

O sensor é colocado no escape, e lê um valor de tensão de acordo com a quantidade de oxigênio presente nos gases de escape.



Figura 3-15: Instalação da sonda *Lambda* (fotografia de autoria própria).

Mais concretamente, devido ao fato de ser o tipo de sensor utilizado na componente experimental, pode observar-se na figura 3-15 a curva de transferência de um sensor *narrowband*. Na presença de uma mistura rica é lida uma tensão de cerca de 1 V. Na presença de um excesso de oxigênio, o sensor lê um valor próximo dos 0 V, enquanto que uma tensão de 0.5 V corresponde a uma mistura estequiométrica (Haltech).

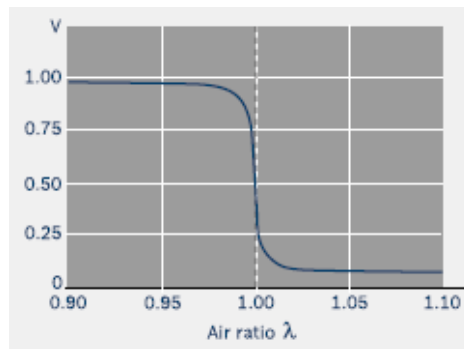


Figura 3-16: Curva de transferência da sonda *Lambda narrowband* (Robert Bosch GmbH, 2016).

3.4. Obtenção dos mapas base

Para obter os mapas base de injeção e de avanço de ignição recorreu-se ao *software* e às ferramentas disponibilizadas pela *MegaSquirt*, mais concretamente o *software TunerStudio* e um gerador de mapas de ignição *online*.

O *Tunerstudio* é um *software* que permite programar centralinas da *MegaSquirt*. Através da introdução de dados do motor em questão, obtém-se o mapa base do rendimento volumétrico, VE, e o mapa base de razão ar-combustível alvo, AFR.

O mapa VE base obtido encontra-se na figura 3-17:

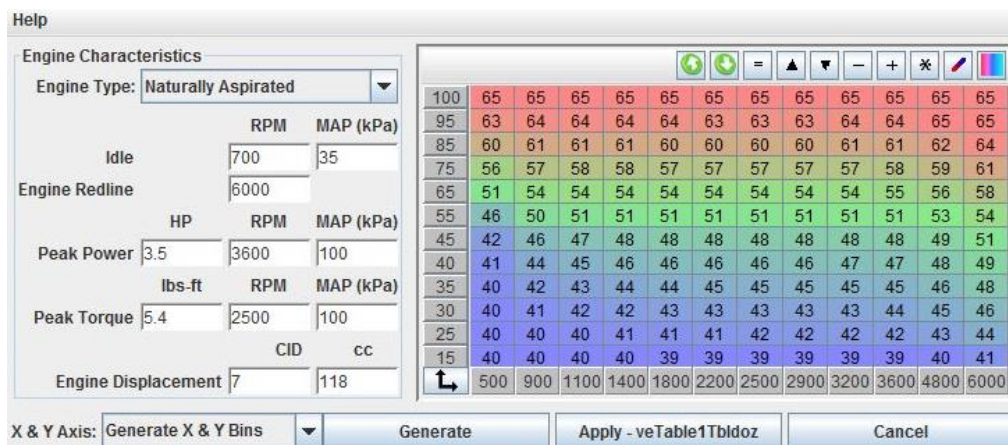


Figura 3-17: Mapa base de rendimento volumétrico (VE).

Enquanto que o mapa base AFR obtido foi o apresentado na figura 3-18:



Figura 3-18: Mapa base de razão ar-combustível alvo (AFR).

O mapa VE controla os tempos de injeção da seguinte forma: para uma dada rotação a quantidade de ar a entrar pela admissão estará entre o mínimo e máximo de abertura do acelerador, logo, para que seja possível obter-se a relação ar-combustível desejada será necessário injetar mais ou menos combustível.

Para se entender melhor o processo, analisa-se a equação (2.5), em que o rendimento volumétrico varia de acordo com as rotações e o caudal mássico de ar introduzido no cilindro por ciclo. Quanto mais ar for admitido, é necessário injetar mais combustível, de modo a obter a relação ar-combustível pretendida. Assim, pode dizer-se que o mapa VE controla a quantidade de combustível debitada pelo injetor, sendo o rendimento volumétrico diretamente proporcional à quantidade de combustível injetado.

Por sua vez, o mapa AFR alvo, consiste nas relações ar-combustível pretendidas para cada ponto de funcionamento do motor. Para que este mapa possa ser utilizado no seu total proveito é necessária a utilização de uma sonda *Lambda wideband*, que no caso da instalação experimental deste trabalho não está presente. Devido a este fato, este mapa não foi otimizado.

No caso do mapa base de avanço de ignição, é utilizada uma ferramenta, que se pode observar na figura 3-19, também da *MegaSquirt*. Esta ferramenta, chamada de *Initial Spark Advance Table Calculator*, é disponibilizada *online*, e permite, de modo semelhante ao processo anterior, obter o mapa base de ignição, através da introdução de dados do motor.

Cylinder Bore:	60	millimeters
Combustion Chamber Type:	2-valve closed chamber w/ optimized quench	
Fuel:	premium (94+ octane)	
Compression Ratio:	9.1:1 to 10.0:1	
Idle Vacuum:	2067	in-Hg
Maximum boost level: (0 for naturally aspirated, max. boost (psi) for turbo/supercharged)	0	psi (21 psi maximum)
Maximum RPM:	4000	RPM
Idle RPM:	900	RPM
Spark advance table dimensions:	12x12	
	<ul style="list-style-type: none"> MS-I uses 8x8 tables; MS-II, MicroSquirt, and the Sequencer use 12x12 tables. 	

Figura 3-19: Dados inseridos no gerador do mapa do ângulo de avanço de ignição (MegaSquirt, 2016).

O mapa base de ângulo de avanço de ignição obtido está representado na figura 3-20:

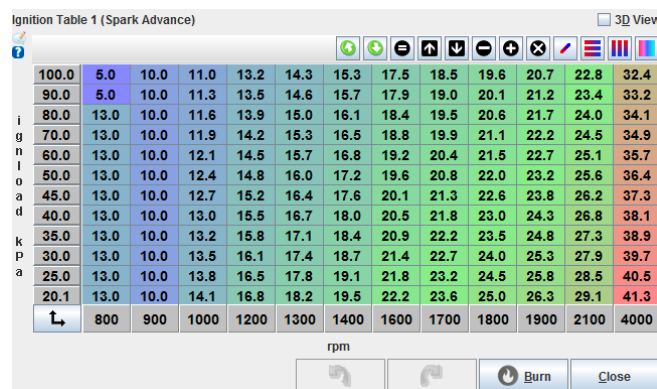


Figura 3-20: Mapa base do ângulo de avanço de ignição.

3.5. Realização dos ensaios

Os ensaios foram realizados no banco disponível no laboratório, equipado com um dinamómetro, construído por um antigo aluno. Este dinamómetro consiste num travão de mão que aciona, hidraulicamente, um sistema de travão a disco adaptado de um automóvel e acoplado à cambota do motor (ver figura 3-22). Através de um manómetro é possível verificar a pressão no líquido do sistema hidráulico no momento pretendido (figura 3-6). Na figura 3-21 é exibida a montagem experimental.



Figura 3-21: Montagem experimental (fotografia de autoria própria).

Antes de iniciar cada ensaio ligou-se o motor e esperou-se até a temperatura estabilizar, de modo a todos os enriquecimentos de combustível relacionados com a temperatura do líquido lubrificante se desligarem. Procederam-se a acelerações e desacelerações com e sem carga do travão, até as condições referidas se verificarem.



Figura 3-22: Dinamómetro (fotografias de autoria própria).

Encontrando-se o motor às condições necessárias, procedeu-se à realização dos ensaios, que consistiram numa medida dos valores máximos de pressão à qual o motor se conseguiu manter nas rotações pretendidas para análise. Para tal, o acelerador esteve sempre aberto na posição máxima, e foi-se apertando ou aliviando o travão conforme necessário.

Para determinação do consumo do motor utilizou-se o *datalogger* do *software* da *MegaSquirt*.

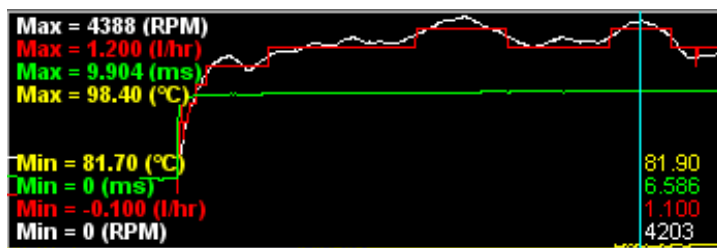


Figura 3-23: Interface gráfico do *datalogger* da *MegaSquirt*.

O *datalogger* permite, colocando o cursor na zona em estudo, obter valores sobre os parâmetros pretendidos. No caso dos ensaios realizados, os parâmetros analisados foram as rotações, temperatura do óleo, o consumo de combustível e o tempo de pulso do injetor (figura 3-23).

No fim de cada ensaio deixou-se o motor estabilizar ao ralenti, e procedeu-se à otimização do mapa de injeção. Otimizado o mapa, repetiu-se o processo descrito, até um total de três ensaios. O primeiro ensaio foi realizado utilizando o mapa base, enquanto que no segundo e terceiro foram utilizados dois mapas diferentes.

É importante notar que neste tipo de ensaios, os valores de desempenho serão sempre máximos, portanto, vão haver zonas do mapa não ensaiadas, mais concretamente as zonas onde o acelerador não está completamente aberto (onde a carga é mais baixa). Nestas zonas, será de esperar uma maior diminuição do consumo, principalmente após a otimização do mapa.

3.6. Otimização do mapa de injeção

Para otimizar o mapa de injeção base obtido, apresentado no ponto 3.4, e partindo do princípio que o motor será utilizado numa aplicação automóvel, foi necessário primeiramente, identificar quais áreas do mapa correspondem aos regimes de funcionamento:

- Ralenti;
- Velocidade de cruzeiro;
- Aceleração inicial
- Aceleração a fundo;

- Desaceleração.

Estes regimes podem ser observados, utilizando o mapa base como referência, na figura 3-24:

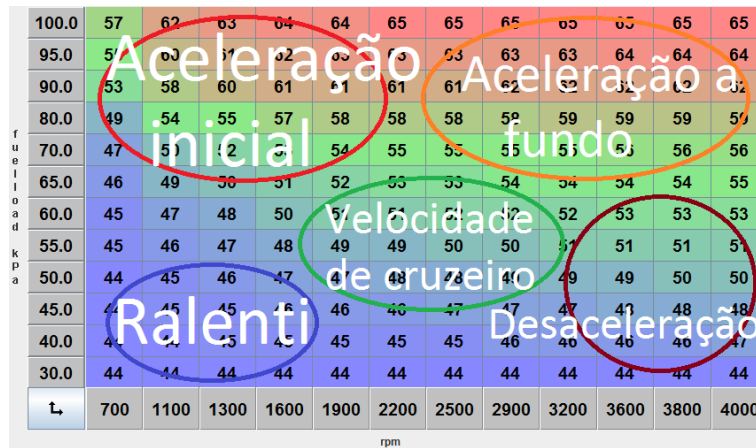


Figura 3-24: Identificação dos vários regimes de funcionamento no mapa VE.

Identificadas as áreas dos vários regimes de funcionamento, procedeu-se à otimização de cada regime, sequencialmente, tendo como ponto de partida o mapa base.

Começando pela área do ralenti, sem exercer carga com o travão, e onde é necessária uma relação ar combustível ligeiramente rica, ajustou-se a respetiva zona e o parafuso de afinação da borboleta, até obter um ralenti estável e constante, a cerca de 900rpm.

Seguidamente, procedeu-se à otimização da área de aceleração inicial, que requer uma mistura rica. Aqui foi exercida uma carga constante com o travão do dinamómetro, pois nesta área de funcionamento, o motor em utilização normal terá uma mudança engrenada. Verificou-se que, no mapa base, estando no ralenti, ao acelerar a fundo o motor não respondia, isto porque a mistura ficava demasiado pobre, não se desenvolvendo o binário necessário, então aumentou-se a injeção de combustível nesta área até obter o comportamento desejado.

Na área de aceleração a fundo pretende-se uma mistura rica, de modo a obter-se o maior binário. Foi também aplicada uma carga constante, pelo meio do travão do dinamómetro, pois neste regime o motor também irá funcionar com uma mudança engrenada. Por sua vez, a injeção foi aumentada de modo a atingir-se o comportamento desejado.

Nas áreas de desaceleração e velocidade de cruzeiro, é preferível uma mistura pobre, pois nesta zona pretende-se um consumo mais reduzido. Aplicou-se, mais uma vez, uma carga

constante com o travão do dinamómetro. Em relação ao mapa base, foi possível diminuir consideravelmente os tempos de injeção, mantendo o bom funcionamento do motor. Estas são as áreas referidas no final subcapítulo 3.5, onde é de esperar uma maior diminuição do consumo, mas nas quais o tipo de ensaio realizado neste trabalho não incide.

Variando a quantidade de injeção em cada uma destas situações, de acordo com diferentes objetivos, obtiveram-se dois mapas otimizados. O primeiro mapa otimizado, representado na figura 3-25, foi concebido para obter um binário superior, e utilizou-se no segundo ensaio.

f u e l i o a d k p a	100.0	56	59	62	64	67	71	72	72	72	71	70	69
	95.0	57	60	62	64	66	71	72	72	71	70	69	68
	90.0	57	60	60	62	64	69	70	70	68	66	65	64
	80.0	57	58	56	55	57	59	60	60	60	60	59	58
	70.0	57	56	53	51	51	51	51	51	51	51	51	51
	65.0	57	55	51	47	45	44	44	44	44	44	45	46
	60.0	57	54	50	45	41	39	39	39	39	40	41	43
	55.0	56	53	48	43	39	38	37	37	37	38	39	41
	50.0	54	50	45	41	37	36	36	36	36	37	38	40
	45.0	51	47	42	38	36	36	36	36	36	36	37	39
	40.0	46	43	39	36	35	35	35	35	35	35	36	38
	30.0	38	37	34	34	34	34	34	34	34	34	35	36
	↳	700	1100	1300	1600	1900	2200	2500	2900	3200	3600	3800	4000
rpm													

Figura 3-25: Mapa otimizado para maior binário.

No terceiro ensaio, foi utilizado o segundo mapa otimizado, que pode ser observado na figura 3-26. Este mapa foi afinado de modo a atingir um binário intermédio aos dois anteriores e a realizar um menor consumo.

f u e l i o a d k p a	100.0	56	58	60	61	62	63	64	64	64	64	62	59
	95.0	56	59	59	60	61	63	64	64	63	62	60	57
	90.0	57	59	59	59	59	61	62	62	62	61	58	56
	80.0	58	59	59	57	57	57	58	59	58	57	55	51
	70.0	57	59	57	53	48	48	48	48	48	46	46	43
	65.0	57	58	54	48	41	38	38	38	38	38	37	37
	60.0	56	56	51	43	37	34	32	32	32	33	34	35
	55.0	54	53	49	39	33	31	30	30	30	31	32	33
	50.0	50	49	45	38	30	29	29	29	29	30	31	32
	45.0	45	45	40	34	29	29	29	29	29	29	30	31
	40.0	39	39	36	31	28	28	28	28	28	28	29	29
	30.0	31	31	28	27	27	27	27	27	27	27	28	28
	↳	700	1100	1300	1600	1900	2200	2500	2900	3200	3600	3800	4000
rpm													

Figura 3-26: Mapa otimizado para binário intermédio e menor consumo.

3.6.1. Comparação entre os mapas obtidos

O software *TunerStudio* permite a otimização dos mapas através de gráficos 3D. Estes gráficos facilitam a otimização em tempo real, assim como a análise e comparação entre mapas. O gradiente de cores varia de forma idêntica ao dos mapas no formato tabela, sendo assim simples identificar as áreas dos diferentes regimes de funcionamento.

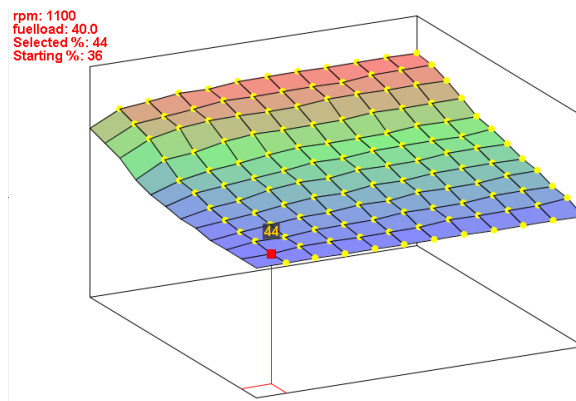


Figura 3-27: Representação em 3D do mapa base.

Pela figura 3-27, pode verificar-se que o mapa base tem uma distribuição relativamente uniforme, os seus valores absolutos não são muito distantes. Testando o comportamento do motor, foi possível aferir que na zona de desaceleração e velocidade de cruzeiro a mistura estava demasiado rica, e, quando se acelerava a fundo partindo próximo da zona do ralenti, o motor não conseguia desenvolver. A pressão máxima, cujo ponto de funcionamento onde ocorre é o mesmo onde se verifica o binário máximo, que foi possível atingir com este mapa, serviu como valor de partida para os mapas seguintes.

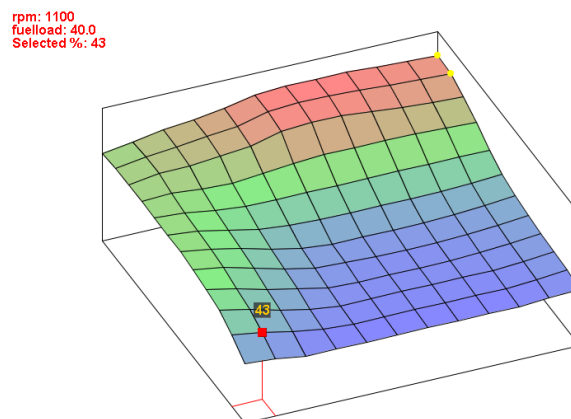


Figura 3-28: Representação 3D do mapa utilizado no segundo ensaio.

Tendo em conta as conclusões retiradas da análise do mapa base, e pretendendo-se um aumento do binário, um segundo mapa, representado em 3D da figura 3-28. Pode verificar-se que, em comparação com o mapa anterior, existe uma variação mais abrupta da superfície do gráfico. As zonas de desaceleração e de velocidade de cruzeiro foram reduzidas para valores francamente inferiores ao mapa anterior.

Foi corrigida a dificuldade de aceleração rápida partindo da zona do ralenti, e foi aumentado o débito de combustível na zona onde se pretendia o binário máximo. Suavizaram-se as transições entre as áreas dos diferentes regimes de funcionamento, já que a diferença entre os valores absolutos de rendimento volumétrico (mínimo e máximo) destas é mais elevada do que no caso anterior.

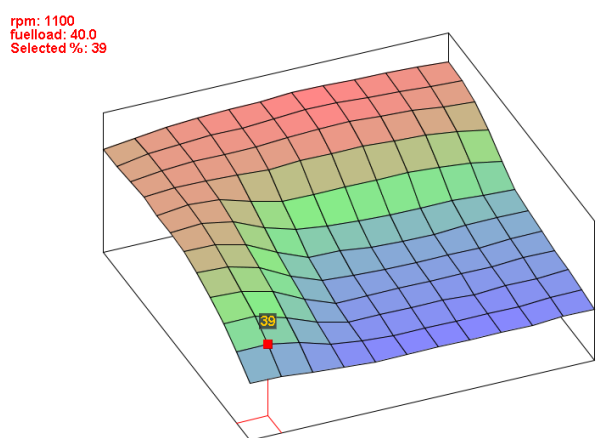


Figura 3-29: Representação 3D do mapa utilizado no terceiro ensaio.

Na figura 3-29 encontra-se a representação 3D do terceiro mapa, o qual foi afinado com o objetivo de ter um binário compreendido entre os dois anteriores, tentando otimizar o consumo de combustível. Partiu-se do mapa correspondente à figura 3-28, e o débito de combustível foi reduzido em todos os pontos de funcionamento do motor. Os valores absolutos de rendimento volumétrico conseguidos, mantendo o bom funcionamento do motor em todos os regimes, foram inferiores aos dos dois mapas anteriores.

4. Resultados

Para tratamento dos resultados obtidos, decidiu-se utilizar grandezas adimensionais. Uma das razões que levaram a esta opção, foi o desconhecimento das perdas por aquecimento nas pastilhas de travão e o coeficiente de atrito das pastilhas e do disco. A segunda razão consiste na falta de informação acerca da arquitetura interna da bomba de travão, que conseqüentemente leva a um desconhecimento das variações de área de secção internas, entre o contato do fluído com o atuador da bomba e a superfície de contato das pastilhas com o disco. Estas duas razões impossibilitam a determinação, com precisão, da pressão que se opõe à rotação do motor.

Deste modo, a pressão utilizada para traçar os gráficos de resultados foi a lida no manómetro, e esta foi adimensionalizada (ficando compreendida entre 0 e 1), pelo que a forma das curvas resultantes vai seguir a tendência das curvas que seriam obtidas utilizando os valores reais.

Com vista a gerar as curvas de desempenho, procedeu-se às seguintes simplificações:

Na equação (2.9), sendo P a pressão no manómetro e A uma constante, correspondente à área de contato do fluído com o cilindro que aciona as pastilhas do travão contra o disco, pode simplificar-se:

$$p = F \quad (4.1)$$

Como os ensaios foram realizados para valores máximos, conclui-se: $p=p_{m\acute{a}x}$ e $F=F_{m\acute{a}x}$. $F_{m\acute{a}x}$ pode designar-se de força de travagem adimensional.

Quanto ao binário, representado pela equação (2.6), em que b é o braço e é uma grandeza constante, pode simplificar-se para:

$$T = F \quad (4.2)$$

Em que $T=T_{m\acute{a}x}$ e pode ser designado por binário de travagem adimensional, pois é igual à força de travagem adimensional. Concluindo:

$$p_{m\acute{a}x} = F_{m\acute{a}x} = T_{m\acute{a}x} \quad (4.3)$$

Para se poder determinar a forma da curva da potência útil, utilizou-se a equação (2.7). Simplificou-se a referida equação, já que 2π é uma constante, e adimensionalizaram-se as rotações. Como o binário a multiplicar também é adimensional, obtém-se assim a potência útil adimensional e, mais uma vez, $P=P_{m\acute{a}x}$.

$$P_{m\acute{a}x} = N \times T_{m\acute{a}x} \quad (4.4)$$

As curvas de consumo foram geradas pela recolha de dados do *datalogger* do *software*, função que no início da realização deste trabalho não estava disponível, devido ao fato de a UCE anterior não a incluir. A impossibilidade de calcular o binário real, pela equação (2.6) e conseqüentemente a potência útil, pela equação (2.7), não permitiu o cálculo do consumo específico, pela equação (2.8).

4.1. Curvas de desempenho e consumo - análise e discussão

Para cada um dos três ensaios foi construída uma curva de binário adimensional e uma curva de consumo de combustível. Recapitulando, no primeiro ensaio foi utilizado o mapa base, enquanto que no segundo ensaio foi utilizado um mapa com o qual se pretendia obter um binário superior. Por fim, no terceiro ensaio, foi desenvolvido um mapa com vista a melhorar o consumo, sem comprometer completamente o binário.

Para o primeiro ensaio obtiveram-se as seguintes curvas de desempenho:

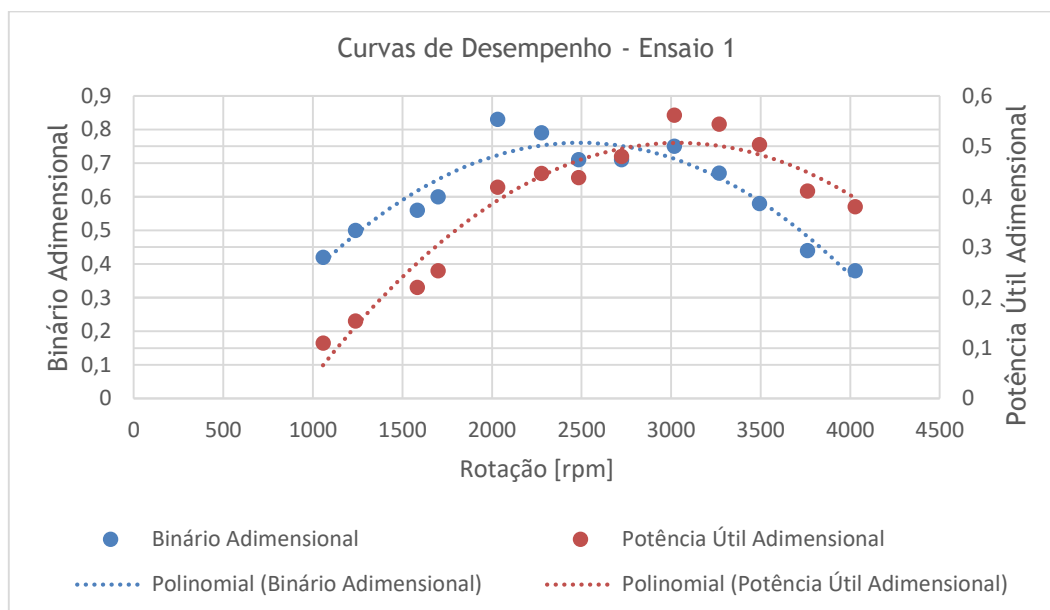


Figura 4-1: Curva de Binário e Potência Útil Adimensionais obtida no ensaio 1.

Neste ensaio, verificou-se um valor máximo de binário adimensional de 0,83, às 2000 rpm aproximadamente. A cerca 4000 rpm foi atingido o binário adimensional mínimo, com um valor de 0,38.

No que toca à potência útil adimensional, o seu ponto máximo ocorre às 3000 rpm, e atinge aproximadamente 0.56. O valor mínimo verifica-se pouco acima das 1000 rpm, e corresponde a cerca de 0.11.

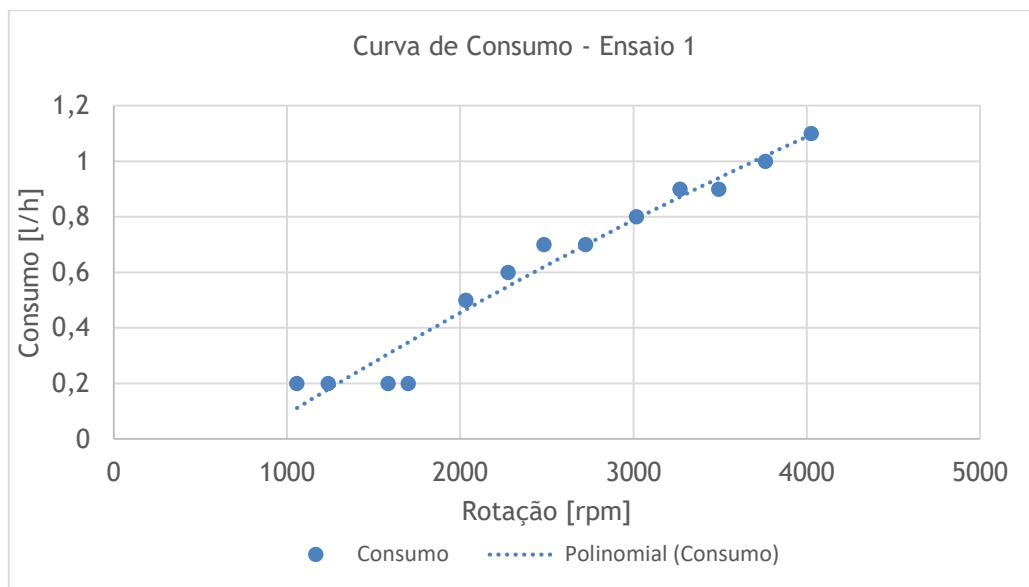


Figura 4-2: Curva de Consumo de Combustível obtida no ensaio 1.

No que toca ao consumo de combustível, obteve-se um valor máximo de 1.1 l/h às 4000 rpm, e um valor mínimo de 0.2 l/h às 1050 rpm. No ponto de binário adimensional máximo, às 2000 rpm, o consumo foi de 0.5 l/h, enquanto que no ponto de potência útil adimensional máxima, às 3000 rpm, foi de 0.8 l/h.

Passando ao segundo ensaio, foram obtidas as seguintes curvas de desempenho:

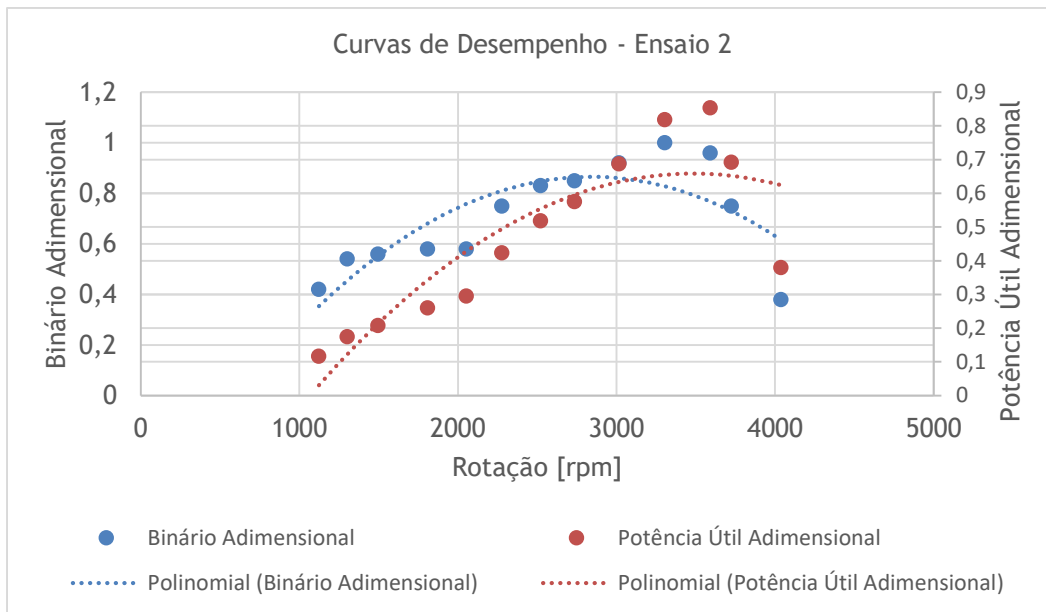


Figura 4-3: Curva de Binário e Potência Útil adimensionais obtida no ensaio 2.

No segundo ensaio obteve-se um valor máximo de binário adimensional de 1, aproximadamente às 3300 rpm, e um valor mínimo de cerca de 0.39 um pouco acima 4000 rpm. Comparando ao ensaio anterior, pode observar-se que o binário adimensional mínimo é igual, a rotações semelhantes, enquanto que o valor máximo é consideravelmente superior no segundo ensaio, no entanto é atingido a rotações superiores.

Os valores máximo e mínimo de potência útil adimensional encontram-se, respetivamente, próximos das 3600 rpm e 1100 rpm. Atingem, como máximo, 0.85, e, como mínimo, cerca de 0.12.

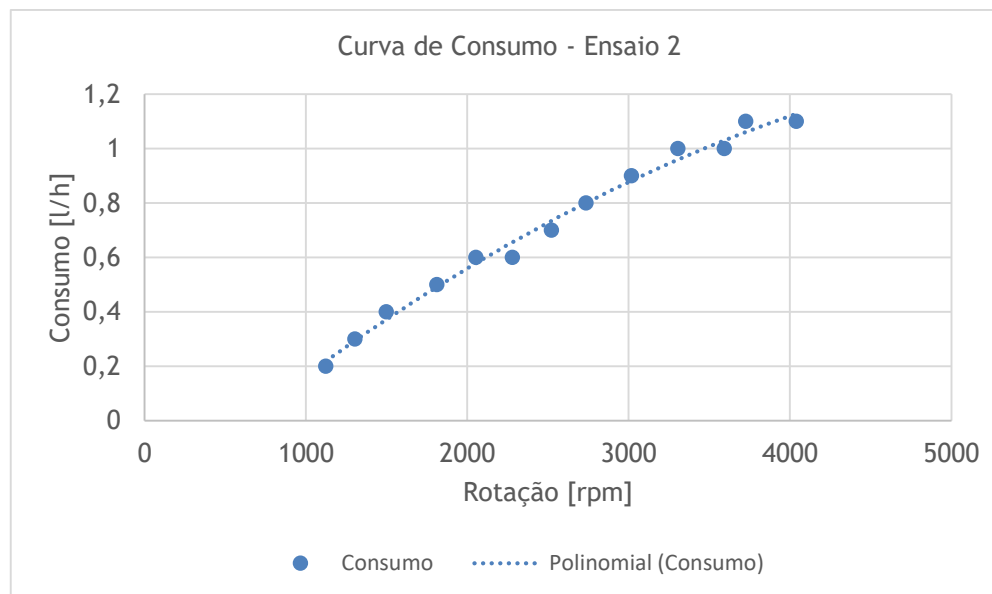


Figura 4-4: Curva de Consumo de Combustível obtida no ensaio 2.

O valor máximo de consumo de combustível obtido neste ensaio, foi de 1.1 l/h, às 4000 rpm. Por sua vez, atingiu-se um valor mínimo de 0.2 às 1100 rpm aproximadamente. No ponto de binário adimensional máximo, às 3300rpm, o consumo foi de 1 l/h e no ponto de potência útil adimensional máxima foi de cerca de 1 l/h.

Os valores máximo e mínimo verificam-se a rotações semelhantes às do primeiro ensaio, no entanto, o valor do consumo no ponto de binário máximo do segundo ensaio é o dobro do valor no primeiro ensaio. Este aumento de consumo no ponto de binário adimensional máximo é esperado, já que o débito de combustível foi aumentado nessa zona. No caso da potência útil adimensional, como seria de esperar, o valor do consumo no ponto máximo foi superior ao ponto correspondente no ensaio anterior, atingido 1 l/h às 3600 rpm.

Por fim, para o terceiro ensaio as curvas de desempenho são as seguintes:

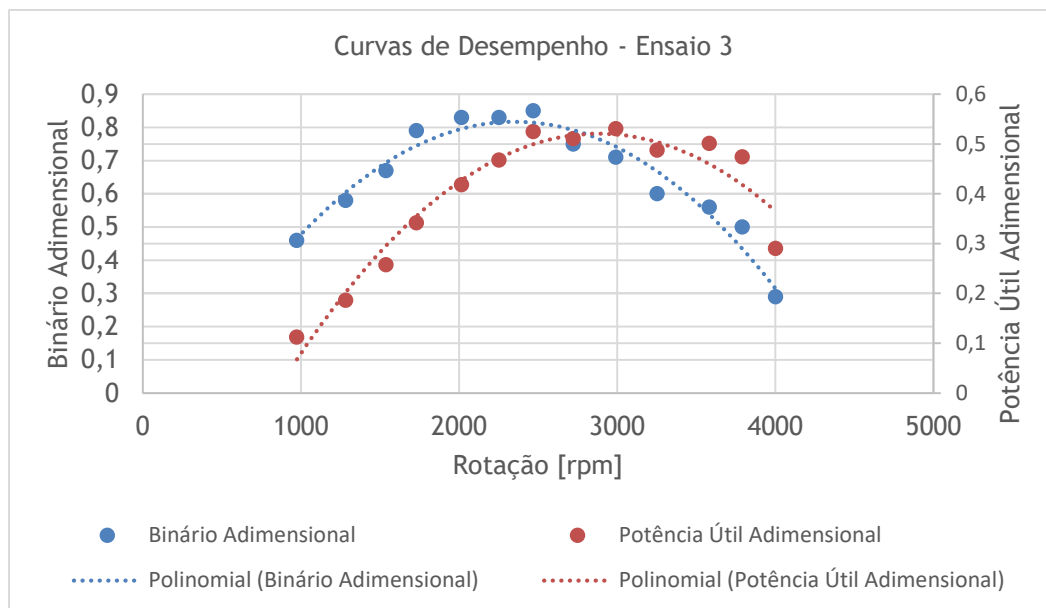


Figura 4-5: Curva de Binário e Potência Útil Adimensionais obtida no ensaio 3.

Neste ensaio, o valor máximo de binário adimensional atingido foi de cerca de 0.85, aproximadamente às 2500 rpm. O binário adimensional mínimo foi atingido às 4000 rpm, com um valor de 0.29.

Comparando aos ensaios 1 e 2, o binário adimensional máximo é intermédio, sendo ligeiramente superior ao valor obtido no primeiro ensaio, e atingido a uma velocidade de rotação também intermédia. O valor mínimo é o mais baixo dos três ensaios e é atingido a rotações semelhantes.

A potência útil adimensional máxima é atingida às 3000 rpm, e situa-se um pouco acima de 0.5. O valor mínimo deste parâmetro encontra-se um pouco abaixo das 1000 rpm, medindo cerca de 0.12. Comparando aos ensaios anteriores este é o valor de potência mais baixo, sendo ligeiramente inferior ao ponto correspondente no primeiro ensaio.

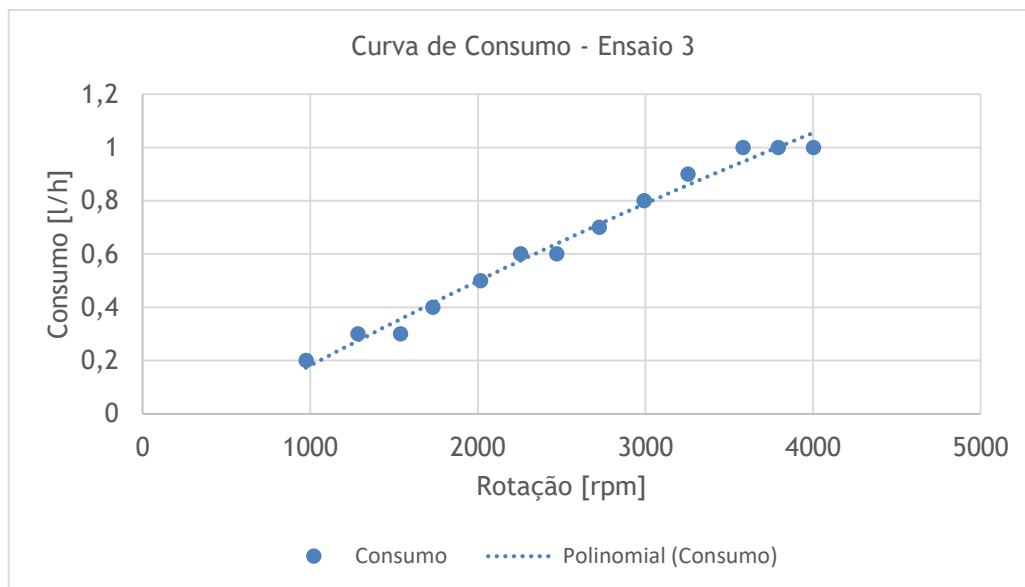


Figura 4-6: Curva de consumo de combustível obtida no ensaio 3.

O consumo de combustível do terceiro ensaio, variou entre 1 e 0.2 l/h, às 4000 e ligeiramente abaixo das 1000 rpm, respetivamente. O valor mínimo manteve-se nos três ensaios, sempre na mesma gama de rotações. O consumo máximo foi o mais baixo da totalidade dos ensaios.

O valor do consumo de combustível no ponto de binário máximo, próximo das 2500 rpm foi de 0.6 l/h. Pode verificar-se que o consumo neste ponto está contido entre o dos pontos comparáveis dos outros dois ensaios, sendo ligeiramente superior ao do primeiro ensaio, e consideravelmente inferior ao do segundo.

Quanto ao ponto máximo de potência útil adimensional, situado às 3000 rpm, verifica-se um consumo de 0.8 l/h. O consumo neste ponto é semelhante ao ponto correspondente no primeiro ensaio, e inferior ao correspondente, no terceiro ensaio.

5. Conclusão

Os objetivos estabelecidos para esta dissertação consistiam na otimização dos mapas de injeção e ignição eletrônica, de modo a melhorar o desempenho do motor Honda GX120, e também, melhorar a fiabilidade do funcionamento de todo o conjunto.

Primeiramente foram estudados e apresentados conceitos teóricos, que permitiram uma consolidação dos conhecimentos necessários à realização da componente experimental. Os conceitos mais relevantes consistiram nos sistemas e injeção e ignição eletrônica, na formação da mistura ar-combustível e nos parâmetros de funcionamento.

Começou-se por realizar uma série de alterações em vários sensores, desde a sua localização aos seus suportes, de modo a proporcionar um melhor funcionamento do controlo eletrónico: foi instalado um sensor de posição da borboleta, mudou-se a localização do sensor de Hall, que se encontrava acoplado à cambota, do lado da transmissão de potência. Ao transferir este sensor para o lado contrário, criou-se a possibilidade de a qualquer momento acoplar uma caixa de velocidades ou transmissão. Foi construído um depósito de gasolina, com mais capacidade, proporcionando um funcionamento do motor durante mais tempo, havendo menos interrupções durante os testes e ensaios.

No início dos ensaios, a UCE utilizada avariou, sendo necessária a instalação de uma nova, o que, apesar de ter provocado um grande atraso no progresso dos ensaios, trouxe como vantagens mais funções, melhor *software* e *interface*, que agilizaram a otimização dos mapas.

Foi também trocado o manómetro com o qual é possível medir a pressão exercida pelo sistema hidráulico dinamómetro, e purgado o circuito, melhorando-se o seu funcionamento. Todos estes fatores contribuíram para uma melhoria da fiabilidade, cumprindo-se um dos objetivos.

O mapa de injeção foi otimizado com sucesso, depois de vários testes e de obtidas duas versões, uma concebida para obtenção de um maior binário, e outra com o objetivo de ter um bom desempenho em geral, tendo o consumo de combustível em atenção. Foram realizados três ensaios, o primeiro para o mapa base, de modo a servir como ponto de partida e para comparação, e os outros dois para os mapas otimizados. Pela análise dos resultados, verificou-se que os dois mapas criados atingiram o comportamento desejado. Teria sido preferível realizar um maior número de ensaios por cada mapa, já que desse modo, as curvas de desempenho seriam mais exatas, no entanto o prazo a respeitar não o permitiu.

A otimização do mapa de avanço de ignição não foi possível, devido a falta de tempo para testar e realizar ensaios. Foi, no entanto, obtido um mapa base, a configuração do sistema de ignição eletrônico foi iniciada, no *software*, e este foi melhorado com a substituição da bobina e do cabo de ligação à vela.

Em relação aos resultados dos ensaios realizados pode concluir-se que o mapa de injeção utilizado no segundo ensaio seria adequado para uma utilização em que o binário elevado fosse o fator mais importante, enquanto que o mapa utilizado no terceiro ensaio seria o ideal para uma aplicação em que o consumo fosse mais importante. Caso tivesse sido possível a implementação e otimização do mapa de ignição eletrônica, existiria a possibilidade de conseguir binários superiores e consumos inferiores, que não seriam possíveis trabalhando apenas como o mapa de injeção.

Fazendo uma retrospectiva às dificuldades e limitações encontradas durante os ensaios, sugere-se uma melhoria ou substituição do dinamómetro, de modo a se possível a determinação ou cálculo do binário real, potência e consumo específico e também a aquisição de uma sonda *Lambda wideband*, que permitirá uma leitura exata da relação ar-combustível em cada ponto de funcionamento do motor, possibilitando uma melhor afinação dos mapas. Outro procedimento que se deveria realizar, para poder tirar o máximo rendimento do motor no futuro, seria uma retificação mecânica, pois a realização contínua de ensaios e temperaturas atingidas podem levar a folgas, perdas de compressão e outros tipos de desgaste.

5.1. Sugestões para trabalhos futuros

Propõe-se, para um trabalho futuro, a otimização dos mapas de ângulo de avanço de ignição neste motor. Apesar de ser um dos objetivos desta dissertação, devido a falta de tempo, não foi possível de completar. Conforme se confirma pela leitura dos conceitos teóricos apresentados neste documento, o ângulo de avanço de ignição é um parâmetro muito importante, que permite tirar um melhor rendimento do motor, sendo bastante relevante a sua implementação

É sugerida a otimização dos mapas de funcionamento de um motor proveniente de um automóvel. Os motores de automóveis têm mais do que um cilindro, pelo que seria possível trabalhar com mais injetores, podendo assim implementar-se injeção sequencial, e, se possível, trabalhar também com sobrealimentação, abrindo portas a uma diferente aproximação à afinação dos mapas.

6. Referências Bibliográficas

- Blair, G. P. (1999). *Design and Simulation of Four-Stroke Engines*. Warrendale, Pennsylvania, USA: Society of Automotive Engineers.
- Crouse, W. H., & Anglin, D. L. (1995). *Automotive Engines* (Oitava ed.). New York: Macmillan/McGraw-Hill.
- Denton, T. (2004). *Automobile Electrical and Electronic Systems* (Terceira ed.). Oxford: Elsevier.
- Dias, P. (2016). *Deteção de Detonação em Motores de Pistão*. Covilhã: Universidade da Beira Interior.
- Ecotrons LLC. (s.d.). *Eco EFI Small Engine Electronic Fuel Injection Tuning Guide*.
- Fernandes, L. (2015). *Otimização do Sistema de Enjeção Eletrónica de um Motor de Combustão Interna*. Covilhã: Universidade da Beira Interior.
- Ganesan, V. (2003). *Internal Combustion Engines* (Segunda ed.). New Delhi: Tata McGraw-Hill.
- Garret, T. K. (1991). *Automotive Fuels and Fuel Systems Vol. 1: Gasoline*. Great Britain: Pentech Press Limited.
- Haltech. (s.d.). *Haltech E6HM Manual*.
- Heywood, J. B. (1988). *Internal Combustion Engine Fundamentals*. USA: McGraw-Hill, Inc.
- Honda Engines. (18 de Janeiro de 2016). *Honda Engines*. Obtido de <http://engines.honda.com/models/model-detail/gx120>
- Kume, T., Iwamoto, Y., Iida, K., Murakami, M., Akishino, K., & Ando, H. (1996). *Combustion Control Technologies for Direct Injection SI Engine*. Warrendale, USA: Society of Automotive Engineers, Inc.
- Majumdar, S. (2003). *Oil Hydraulic Systems - Principles and Maintenance*. United States of America: McGraw-Hill.
- Martins, J. (2011). *Motores de Combustão Interna* (Terceira ed.). Universidade do Minho, Guimarães: Publindústria, Edições Técnicas.
- Martyr, A. J., & Plint, M. A. (2007). *Engine Testing* (Terceira ed.). Oxford, UK: Elsevier Ltd.
- MegaSquirt. (25 de Janeiro de 2016). *Initial Spark Advance Table Calculator*. Obtido de usEasyDocs: <http://www.useasydocs.com/theory/spktable.htm>
- MegaSquirt. (s.d.). *MegaSquirt MS2 Manual*.

- Protásio, R. (2012). *Adaptação de um Sistema de Injeção e Ignição Eletronicamente Controlados num Motor de Combustão Interna*. Covilhã: Universidade da Beira Interior.
- Pulkrabek, W. W. (1997). *Engineering Fundamentals of the Internal Combustion Engine*. University of Wisconsin, Platteville: Prentice Hall.
- Rech, C. (2002). *Estudo Experimental da Relação Ar-Combustível para Máxima Potência em um Motor de Combustão Interna, Utilizando Diversos Combustíveis*. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Robert Bosch GmbH. (2 de Agosto de 2016). Obtido de Bosch Mobility Solutions: http://products.bosch-mobility-solutions.com/en/de/powertrain/powertrain_systems_for_passenger_cars_1/direct_gasoline_injection/direct_gasoline_injection_23.html#
- Robert Bosch GmbH. (12 de 07 de 2016). *Bosch Autoparts*. Obtido de Bosch USA: <https://www.boschautoparts.com/en/auto/oxygen-sensors/premium-oxygen-sensors>
- Salazar, F. (1998). *Internal Combustion Engines*. University of Notre Dame: Department of Aerospace and Mechanical Engineering.
- Sendyka, B., & Noga, M. (2 de Agosto de 2013). *Advances in Internal Combustion Engines and Fuel Technologies*. Cracóvia, Polónia: Intech. Obtido de <http://www.intechopen.com/books/advances-in-internal-combustion-engines-and-fuel-technologies/combustion-process-in-the-spark-ignition-engine-with-dual-injection-system>
- Solomon, A., Anderson, R., Najt, P., & Zhao, F. (2000). *Direct Fuel Injection for Gasoline Engines*. Warrendale, USA: Society of Automotive Engineers, Inc.
- Stone, R. (1992). *Introduction to Internal Combustion Engines* (Segunda ed.). Brunel University, Uxbridge: The MacMillan Press.
- Teixeira, F. (2014). *Adaptação de Injeção Eletrônica em Motor Rotativo de Carburador*. Covilhã: Universidade da Beira Interior.