



UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR
Engenharia

Otimização do Sistema de Injeção Eletrónica de um Motor de Combustão Interna

Luís Miguel Teixeira Fernandes

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Aeronáutica
(ciclo de estudos integrado)

Orientador: Prof. Doutor Francisco Miguel Ribeiro Proença Brojo

Covilhã, Junho de 2015

Agradecimentos

Um enorme agradecimento aos meus pais e irmã, que me apoiaram e deram força para atingir todos os objetivos traçados ao longo deste percurso, em especial ao meu pai, pelos conhecimentos transmitidos.

À minha namorada, pelo apoio transmitido ao longo dos últimos anos.

Ao meu orientador, Professor Doutor Francisco Miguel Ribeiro Proença Brójo, pela sua disponibilidade, sugestões e supervisão deste projeto.

Ao Professor Doutor Fernando Manuel Bigares Charrua Santos e ao Professor Doutor Paulo Manuel Oliveira Fael, por terem transmitido valores éticos e profissionais e também por terem permitido a minha participação na prova Shell Eco Marathon, pois foi daí que surgiu o interesse pela realização deste projeto.

Por fim, a todos os que estiveram comigo ao longo destes anos e que contribuíram de forma positiva para o meu sucesso.

“A vontade é a força eletromotriz mais poderosa do universo”

Albert Einstein

Resumo

Desde a conceção e construção do primeiro motor de combustão interna, diversos sistemas de injeção e ignição da mistura ar-combustível têm vindo a ser desenvolvidos. Com o avanço tecnológico, a inclusão de dispositivos eletrónicos tem possibilitado otimizar o rendimento e ainda reduzir o impacto ambiental causado por estes motores.

O presente trabalho surge no âmbito da prova internacional Shell Eco-Marathon, na qual o objetivo será percorrer o maior número de quilómetros com o menor consumo de gasolina possível. Para isto a partir do motor original foram efetuadas algumas alterações, nomeadamente a remoção do carburador para a inserção da injeção eletrónica. Foi ainda testada a possibilidade da modificação do sistema de ignição convencional para avanço de ignição eletrónico, mas sem sucesso.

O motor escolhido para a realização deste trabalho, é o Honda gx120, um motor monocilíndrico a quatro tempos, e pretendeu-se otimizar o desempenho, nomeadamente o consumo específico como dito anteriormente, sendo este o parâmetro mais importante. Os ensaios efetuados para alcançar os objetivos traçados foram efetuados num banco de ensaios, com o motor acoplado num dinamómetro. Em que a partir de um mapa base de combustível foram efetuados vários ensaios com diferentes características em relação ao mapa base, em várias condições de funcionamento, para concluir através da análise de cálculos e gráficos qual dessas condições era mais vantajosa para o motor operar com melhor performance.

A gestão dos diversos parâmetros do motor, com o intuito de melhorar os sistemas eletrónicos anteriormente referidos, foi efetuado através da ECU (Unidade de Comando Eletrónico), esta controla a formação da mistura ar-combustível e a faísca que forma a combustão. Para isto, a ECU recebe o sinal de diversos sensores acoplados ao motor, o que permite, através dos dados lidos destes, determinar a condição instantânea de funcionamento. A ECU utilizada foi uma Haltech E6h.

Palavras-chave

Motores de Combustão Interna; Ciclo de Otto; Injeção eletrónica; Avanço de Ignição; ECU

Abstract

Since the design and construction of the first internal combustion engine, various injection and ignition systems of air-fuel mixture have been developed. With technological advancement, the inclusion of electronic devices has made it possible to optimize performance and further reduce the environmental impact of these engines.

This work comes under the international competition Shell Eco-Marathon, in which the goal is to travel the longest distance with the lowest possible fuel consumption. For this purpose, some changes were made from the original engine, as it is the removal of the carburetor for the inclusion of electronic injection. The option of modifying the conventional ignition system for a more advanced electronic ignition was also tested, but without success.

The engine chosen for this work, is the Honda GX120, a single-cylinder four-stroke, and the intention was to optimize the performance, in particular the specific consumption - as stated previously, being this the most important parameter. The tests carried out to achieve the objectives were conducted on a test bench, with the engine coupled with a dynamometer. Using a fuel base map several tests were made with different characteristic in relation to the base map, under various operating conditions to conclude by analysis calculations and graphs which of these were most advantageous conditions for the engine to operate with higher performance.

In order to improve the electronic systems mentioned before, the management of the various engine parameters was performed by the ECU (Electronic Control Unit), which controls the formation of the air-fuel mixture as well as the spark that causes combustion. For this to happen, the ECU receives a signal from various sensors fitted to the engine allowing it to determine the instantaneous operating condition, through the received data. The ECU was used a Haltech E6h.

Keywords Internal Combustion Engines; Otto cycle; Electronic injection; Ignition advance; ECU

Índice

| | |
|---|----|
| Capítulo 1 | 1 |
| 1. Introdução | 1 |
| 2. Objetivo e Organização do Trabalho | 4 |
| Capítulo 2 | 5 |
| 1. Revisão Bibliográfica | 5 |
| 2. Estudos Relevantes | 5 |
| Capítulo 3 | 6 |
| Conceitos teóricos | 6 |
| 1. Motor..... | 6 |
| 1.1. Fundamentação dos Motores de Combustão Interna | 6 |
| 1.2. Principais componentes de um motor de combustão interna | 7 |
| 1.3. Classificação de motores | 8 |
| 2. Ciclo de Otto ideal | 8 |
| 3. Tempos do Motor segundo o Ciclo de Otto..... | 9 |
| 4. Combustão | 11 |
| 5. Formação e relação da mistura ar-combustível..... | 12 |
| 5.1. Relação ar-combustível e os principais gases emitidos por motores a combustão. | 14 |
| 6. Sistema de Injeção e Ignição | 15 |
| 7. Sistema de Injeção | 16 |
| 7.1. Injeção Eletrónica | 16 |
| 7.2. Principais Vantagens da Injeção Eletrónica em relação ao Carburador..... | 18 |
| 8. Sistema de Ignição..... | 18 |
| 8.1. Ângulo de Ignição..... | 19 |
| 8.2. Detonação..... | 21 |
| 8.3. Auto Ignição | 22 |
| 8.4. Poder Antidetonante de um Combustível | 22 |
| 9. Principais componentes do sistema de injeção/ignição eletrónica..... | 22 |
| 9.1. Electro - injetor..... | 23 |
| 9.2. Velas de Ignição..... | 24 |
| 10. Controlo Eletrónico dos Motores de Combustão Interna Ciclo Otto | 26 |
| A UCE (Unidade de Comando Eletrónico)..... | 26 |
| 10.1.Haltech..... | 27 |
| 10.2. Os principais sensores de um sistema de injeção/ignição eletrónica | 28 |
| 11. Mapa base de combustível | 30 |
| 11.1. Controlo da Injeção | 31 |
| 11.2. Controlo de Ignição | 32 |
| 12. Calibração do sistema | 32 |

| | | |
|-------------------------|--|----|
| 13. | Ensaio Dinamométricos | 32 |
| 14. | Parâmetros de Desempenho | 33 |
| 14.1. | Rendimento Volumétrico..... | 33 |
| 14.2. | Rotação e Velocidade Angular | 34 |
| 14.3. | Trabalho por Ciclo..... | 34 |
| 14.4. | Binário | 35 |
| 14.5. | Potência..... | 36 |
| 14.6. | Pressão Média Efetiva..... | 36 |
| 14.7. | Consumo Especifico de Combustível | 36 |
| 14.8. | Eficiência de Conversão - η_f | 37 |
| Capitulo 4 | | 38 |
| Componente Experimental | | 38 |
| 1. | Especificações do Motor | 38 |
| 2. | Ensaio..... | 40 |
| 2.1. | Condições de ensaio | 40 |
| 2.2. | Verificações a serem efetuadas antes do arranque do motor | 40 |
| 2.3. | Procedimentos de operação | 41 |
| 3. | Tipos de testes | 41 |
| 3.1. | Teste com velocidade constante | 41 |
| 3.2. | Teste com velocidade variável | 42 |
| 4. | Arranque a Frio | 42 |
| 5. | Mapa base de combustível | 43 |
| 6. | Calibrações | 43 |
| 6.1. | Calibração do banco de ensaios..... | 43 |
| 6.2. | Calibração do injetor | 44 |
| 7. | Realização dos Ensaio Resultados e Discussões - Curvas de Desempenho | 44 |
| 7.1. | Ensaio 1 - Resultados com mapa original..... | 46 |
| 7.2. | Ensaio 2 - Resultados com mapa a -10%..... | 49 |
| 7.3. | Ensaio 3 - Resultados com mapa a +10%..... | 51 |
| 7.4. | Ensaio 4 - Resultados com mapa a -20%..... | 53 |
| Capitulo 5 | | 56 |
| 1. | Conclusões | 56 |
| 2. | Estado de Arte | 56 |
| 3. | Estudos Futuros | 57 |
| 4. | Referências Bibliográficas..... | 57 |

Lista de Figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1 - Emissões médias de veículos automotores novos no período de 1979 a 2004, (Proconve, 2005). | 2 |
| Figura 2 - Diagrama esquemático de um motor de combustão interna de 4 tempos, (Adier, 1993). | 7 |
| Figura 3 - a) Diagrama PV e b) Diagrama TS para o ciclo de Otto. | 8 |
| Figura 4 - Ciclo de trabalho de um motor ciclo de Otto, (Bosch, 1988). | 10 |
| Figura 5 - Eventos do motor de Ciclo de Otto, (Heywood, 1988). | 10 |
| Figura 6 - Fração mássica de gases queimados. Fonte: Poulos, 1983. | 12 |
| Figura 7 - Variação da potência e do consumo de combustível em função de lambda, (Denton, 2000). | 13 |
| Figura 8 - Relações estequiométricas dos principais combustíveis. (Von Glehn, 2001). | 14 |
| Figura 9 - Principais gases poluentes, (Von Glehn, 2001). | 15 |
| Figura 10 - Sistema de injeção monoponto (Rech, 2002). | 17 |
| Figura 11 - Sistema de injeção multiponto (Rech, 2002). | 17 |
| Figura 12 - Avanço de ignição fixo com aumento da rotação, (Heisler, 1995). | 19 |
| Figura 13 - Variação do ponto de ignição e a sua influência na pressão do cilindro, (Heisler, 1995). | 19 |
| Figura 14 - Diagrama PxV, (Taylor, 1988). | 20 |
| Figura 15 - Tipos de Detonação, (Heywood, 1988). | 21 |
| Figura 16 - Vista em corte de um bico injetor (Bosh, 1988). | 23 |
| Figura 17 - Injetor utilizado, acoplado ao motor. | 24 |
| Figura 18 - Vista em corte de uma vela de ignição (Bosh, 1988). | 24 |
| Figura 19 - Vela utilizada no caso prático. | 25 |
| Figura 20 - Vista em corte de uma bobina de ignição (Bosh, 1988). | 25 |
| Figura 21 - Tensão na vela de ignição, (Bosch, 1988). | 26 |
| Figura 22 - Diagrama de blocos de um sistema de injeção/ignição eletrônico. | 26 |
| Figura 23 - Centralina Haltech E6h, utilizada no caso prático. | 28 |
| Figura 24 - Sensor de temperatura do ar admitido utilizado no caso prático. | 28 |
| Figura 25 - Sensor de rotação do motor utilizado no caso prático. | 29 |
| Figura 26 - Sensor da posição da abertura da borboleta utilizado no caso prático. | 29 |
| Figura 27 - Sensor de pressão do coletor utilizado no caso prático. | 29 |
| Figura 28 - Sonda lambda utilizada no caso prático. | 29 |
| Figura 29 - Sensor de detonação utilizado no caso prático. | 30 |
| Figura 30 - Mapa base de pressão, ângulo da borboleta e rotação do motor, (Zhu et al., 2011). | 30 |
| Figura 31 - Mapa base do tempo de injeção de combustível, (Zhu et al., 2011). | 31 |

| | |
|--|----|
| Figura 32 - Manómetro de pressão hidráulica..... | 33 |
| Figura 33 - Conjunto do dinamómetro. | 33 |
| Figura 34 - Diagrama p-V de um ciclo de 4 tempos, (Richard Stones, 1999). | 35 |
| Figura 35 - Especificações técnicas do motor Honda GX 120, (Honda Motor Co. Lda). | 38 |
| Figura 36 - Motor Honda GX 120, (Honda Motor Co. Lda). | 39 |
| Figura 37 - Curva de potência do motor Honda GX 120, (Honda Motor Co. Lda). | 39 |
| Figura 38 - Binário máximo do motor Honda GX 120, (Honda Motor Co. Lda). | 39 |
| Figura 39 - Correção do arranque a frio do software utilizado no caso prático. | 42 |
| Figura 40- Modo percentual de alteração do tempo de injeção para cada rpm. | 45 |
| Figura 41- Datalog da ECU Haltech. | 46 |

Lista de tabelas

| | |
|--|----|
| Tabela 1 - Mapa base de combustível utilizado. | 43 |
| Tabela 2- Modo numérico de alteração do tempo de injeção. | 45 |
| Tabela 3- rotação vs consumo específico (Ensaio 1). | 48 |
| Tabela 4- rotação vs consumo específico (Ensaio 2). | 50 |

Lista de gráficos

| | |
|---|----|
| Gráfico 1 - Binário para calibração do banco de ensaios (Fábio Teixeira, 2014). | 44 |
| Gráfico 2- Injeção de calibração do injetor, (Fábio Teixeira, 2014). | 44 |
| Gráfico 3- Binário em função da rotação (Ensaio 1). | 46 |
| Gráfico 4- Potência em função da rotação (Ensaio 1). | 47 |
| Gráfico 5- Consumo específico em função da rotação (Ensaio 1). | 47 |
| Gráfico 6- Tempo de injeção em função da abertura da borboleta e da rotação do motor (Ensaio 1). | 48 |
| Gráfico 7- Binário em função da rotação (Ensaio 2). | 49 |
| Gráfico 8- Potência em função da rotação (Ensaio 2). | 49 |
| Gráfico 9 - Consumo específico em função da rotação (Ensaio 2). | 50 |
| Gráfico 10- Tempo de injeção em função da abertura da borboleta e da rotação do motor (Ensaio 2). | 51 |
| Gráfico 11- Binário em função da rotação (Ensaio 3). | 52 |
| Gráfico 12- Potência em função da rotação (Ensaio 3). | 52 |
| Gráfico 13 - Consumo específico em função da rotação (Ensaio 3). | 53 |
| Gráfico 14 - Binário em função da rotação (Ensaio 4). | 54 |
| Gráfico 15 - Potência em função da rotação (Ensaio 4). | 54 |
| Gráfico 16 - Consumo específico em função da rotação (Ensaio 4). | 55 |

Lista de acrónimos

ECU - Unidade de comando eletrónico

IVC - Fecho da válvula de admissão

IVO - Abertura da válvula de admissão

PMI - Ponto morto inferior

PMS - Ponto morto superior

Capítulo 1

1. Introdução

A Shell Eco-Marathon é uma competição anual patrocinada pela Shell, que tem como objetivo motivar os alunos universitários a desenvolver soluções tecnológicas de forma que os carros projetados consumam o menor combustível possível e alcancem o maior número de quilômetros, para isto é preciso ter em conta parâmetros de design, de engenharia estrutural bem como a nível de engenharia do motor.

Aliás, a Shell Eco-Marathon é mais do que uma competição universitária, é o sensibilizar da sociedade jovem do mundo que nos rodeia, das elevadas emissões de poluição que o Homem provocou, do elevado consumo dos recursos naturais, propriamente dito do petróleo que demorará dezenas de séculos a recuperar.

É também do interesse desta prova a investigação por parte dos alunos universitários em relação à descoberta de novas alternativas, ao desenvolvimento de novos motores, consumo de combustíveis alternativos, entre outros, no fundo é uma porta de oportunidade para os jovens cientistas e engenheiros provarem os seus projetos, com o intuito de ser um bem para a sociedade.

“A responsabilidade com que se devem empregar os recursos naturais hoje disponíveis, sob pena de comprometer a sobrevivência das gerações futuras, ao persistir uma conceção utilitarista da natureza.” Heywood, 1988.

Define-se motores de combustão interna, aqueles que em funcionamento, ocorre a transformação da entalpia de combustão resultante do processo de oxidação do combustível em energia mecânica através da expansão dos gases. A combustão num motor de ciclo de Otto inicia-se na fase de compressão onde através da ignição é gerada a faísca que promove a combustão.

Durante grande parte do século dezanove, um enorme número de motores foram projetados com sucesso, e estes foram usados para operar máquinas e para fornecer energia para os primeiros ditos automóveis. O desafio da indústria automobilística foi projetar motores que fossem cada vez mais fiáveis e com melhores índices de desempenho.

A revolução industrial que ocorreu no final do século XVIII e continuou até início do século XX, foi o resultado da habilidade e capacidade dos seres humanos em descobrir maneiras de gerar energia para acionar as máquinas industriais e de transporte.

Devido à crise mundial do petróleo no início da década de 70, os motores de combustão interna tiveram que ser adaptados a uma nova realidade. A indústria automobilista surge com um novo foco, a redução do consumo de combustível. Esta época é um exemplo que influenciou a sociedade de forma global a ter consciência para a adoção de alternativas energéticas em

função do impacto económico que se verificou no aumento sobre o preço dos derivados do petróleo.

É de referir que é em 1989 que entram em vigor os primeiros limites de emissão poluentes.

A figura 1 ilustra a evolução das emissões de componentes ao longo de um período de tempo.

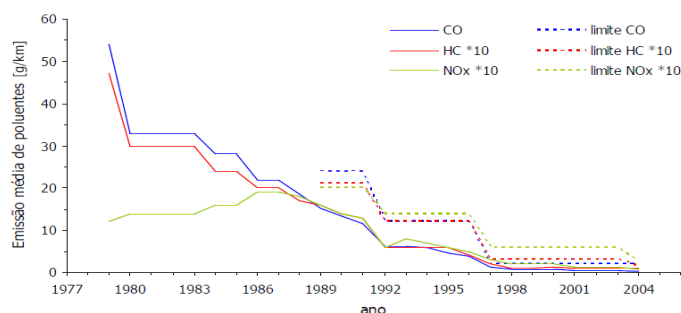


Figura 1 - Emissões médias de veículos automotores novos no período de 1979 a 2004, (Proconve, 2005).

O estabelecimento dos limites de emissões e o cumprimento destes, prova a preocupação com o meio ambiental das diversas instituições, forçando os fabricantes de motores a empregarem o uso de equipamentos mais sofisticados, nomeadamente equipamentos mais modernos de injeção de combustível e controlo de emissões.

Exemplo disso, em 1989, época na qual entra em vigor os primeiros limites, difundiu-se o uso da injeção eletrónica de combustível, incorporando-se ao motor também os catalisadores.

Aqui se prova a consciencialização da importância e da urgência em se preservar o meio ambiente.

Neste contexto, obteve-se nas últimas décadas, avanços tecnológicos que permitiram introduzir técnicas sofisticadas nos automóveis visando dois objetivos:

- Aumentar o rendimento dos motores (reduzindo o consumo de combustível);
- Diminuir a emissão de poluentes.

Esses avanços possibilitaram a existência da injeção eletrónica, na década de 90, a injeção eletrónica veio substituir o carburador, o qual tem a tarefa de fornecer a quantidade de combustível da mistura ar-combustível na dose correta. Uma vez que este processo é controlado eletronicamente, a injeção eletrónica é muito mais eficiente que o carburador, diminuindo o consumo de combustível, a emissão de poluentes e aumentando a potência.

O avanço tecnológico nas últimos anos, permite que através de uma unidade controle eletrônico seja possível nos dias de hoje que os motores sejam mais eficientes e potencialmente menos poluentes, (Ferrari, 2005).

Segundo Pujatti, 2007, desde a concepção e construção do primeiro motor de combustão interna, diversos sistemas de formação e ignição da mistura ar-combustível têm sido desenvolvidos. Os dispositivos eletrônicos dos motores possibilitam a otimização do rendimento, reduzindo o impacto ambiental causado pelos automóveis.

A tendência, conforme Benvenuti e Arsie, 2003, é os motores utilizarem Unidades de Comando Eletrônico, para desta forma controlarem a alimentação da mistura nos motores de combustão interna do ciclo de Otto de forma mais eficiente, proporcionando uma combustão mais adequada para as diferentes condições de operação, utilizando a injeção eletrônica.

Esses sistemas são capazes de controlar todos os parâmetros de funcionamento do motor, transformando uma maior parcela da energia contida no combustível em trabalho útil. Em particular, esses sistemas eletrônicos mantêm a mistura ar-combustível dentro de limites pré definidos, proporcionando um maior desempenho do motor com economia de combustível, (Denton, 2000).

Para a determinação desses limites são realizados ensaios em bancos dinamométricos, onde diferentes condições de operação do motor são simuladas.

No entanto, para a ECU ajustar a quantidade correta de combustível na mistura ar-combustível do motor e o momento em que se inicia a faísca para que ocorra uma combustão correta, conforme a condição de operação, é necessário analisar os dados provindos dos sensores, para desta forma se ajustarem os mapas de injeção e ignição.

A propagação da chama é um processo importante nos motores de combustão interna, pois é esta que determina o tempo para que ocorra a transferência da energia química do combustível em energia mecânica no cilindro. Quanto maior a velocidade de chama, mais eficiente se torna a operação do motor.

É evidente a necessidade de se melhorar a qualidade e a eficiência dos motores de combustão interna. Segundo Sá (2001), o desenvolvimento dos motores de combustão interna deve procurar:

- Maior eficiência térmica e mecânica;
- Maior confiabilidade;
- Maior durabilidade;
- Menor poluição ambiental;
- Menor consumo de combustível;
- Menor nível de ruído;
- Uso de vários combustíveis.

2. Objetivo e Organização do Trabalho

O objetivo principal do projeto que fundamentou o presente documento, é a otimização da injeção eletrónica, e para isso, a criação de diversos mapas de combustível, com diferentes características, nomeadamente a percentagem de enriquecimento da mistura ar-combustível, de forma a analisar para cada caso os índices de desempenho, e assim sugerir qual deles proporciona melhores resultados.

A estrutura do presente trabalho teve um seguimento lógico de forma que o leitor tenha conhecimento teórico dos temas abordados na componente prática. Desta forma, inicialmente será feita uma abordagem teórica dos vários aspetos importantes.

Posteriormente no capítulo 2, será explicado de forma sucinta a componente prática e os respetivos resultados e conclusões.

Capítulo 2

1. Revisão Bibliográfica

As fontes bibliográficas relacionadas com os motores de combustão interna, são de grande importância, pois ajudam a entender melhor estes mecanismos bem como os seus componentes agregados. Estas fontes, mais antigas ou atuais, diferem-se muitas vezes apenas na forma da exposição da informação, pois o conteúdo fundamental é muito pouco alterado.

Diversos trabalhos foram pesquisados, dos quais alguns autores destes resultaram como fonte bibliográfica que serviu de base para a fundamentação teórica do presente documento.

Entre eles destacam-se: Bosh, 1988; Ferrari, 2005; Heywood, 1988; Pujatti, 2007; Passarini, 1993; Richard Stones, 1999.

No entanto, a revisão bibliográfica é feita ao longo de todo o trabalho, pois tentou-se fundamentar o mesmo o mais completamente possível.

2. Estudos Relevantes

Foi desenvolvido pelo ex-aluno de Engenharia Eletromecânica da Universidade da Beira Interior, Francisco Navio, o tema “Previsão do desempenho de motores alternativos com ignição por faísca”.

Foi elaborado por ele uma dissertação em torno deste tema que consistiu no estudo do desempenho de três motores de pequena cilindrada de forma a verificar se o motor Honda GX120, que equipou o veículo de baixo consumo da equipa UBICAR, do Departamento de Engenharia Eletromecânica da Universidade da Beira Interior, que participou na prova Shell Eco Marathon, (Navio F., 2011).

O projeto consistiu também em determinar como seria o desempenho do motor se o seu ciclo termodinâmico fosse modificado, convertendo o ciclo de Otto num ciclo de Miller, conseguido através da modificação da árvore de cames existente no motor, (Navio F., 2011).

O autor do projeto conclui que a modificação iria revelar um desempenho pior que o original.

Outro trabalho relevante, desenvolvido pelo ex-aluno de Engenharia Aeronáutica da Universidade da Beira Interior, Fábio Teixeira, com o tema “Adaptação da injeção eletrónica em motor alternativo de carburador”, tornou-se muito importante para a realização do presente trabalho, pois foi a base para o desenvolvimento deste.

Toda a instalação da UCE utilizada, bem como dos sensores acoplados ao motor e do sistema de injeção, foi efetuada por esse autor.

Tornando-se o objetivo primordial do presente trabalho a otimização desse sistema.

Capítulo 3

Conceitos teóricos

A primeira etapa para o desenvolvimento do presente trabalho, foi um estudo bibliográfico dos diversos aspetos relacionados ao sistema a ser melhorado, entre eles destaca-se a injeção e ignição eletrónica.

O objetivo desta secção é fornecer ao leitor a fundamentação teórica suficiente, para o entendimento correto de todo o documento.

Numa segunda fase, na parte prática, a análise será utilizada posteriormente como argumento de comprovação e entendimento dos fenómenos físico-químicos relacionados aos resultados apresentados nos testes experimentais.

1. Motor

1.1. Fundamentação dos Motores de Combustão Interna

O motor de combustão interna começou a ser concebido quando em 1862, o físico francês ALphonse Beau de Rochas propôs as condições necessárias para que este motor, a quatro tempos, funcionasse de modo económico, mediante as condições tecnológicas da época.

Rochas chegou a descrever a sequência dos ciclos, que basicamente são os mesmos ciclos usados nos dias de hoje num motor de quatro tempos. No entanto, não chegou a contruir nenhum motor, tendo apenas formulado as condições de funcionamento. Em 1876 Nikolaus Otto construiu o motor experimental, e inclusive, determinou o ciclo teórico sob o qual trabalha o motor de combustão interna. A nomenclatura Ciclo de Otto tornou-se popular quando a empresa alemã Otto und Langen começou a fabricar os motores de quatro tempos, de pistões móveis, ligados à cambota, (Passarini, 1993).

Segundo Malfatti, 2009, os motores de combustão interna são dispositivos que transformam a energia química contida no combustível, através da combustão, em calor, e este calor em trabalho mecânico, visto que ele permite que haja um aumento na pressão dentro de um volume e que um trabalho seja realizado na medida em que esse volume se expande.

Ou seja, de uma forma simplificada, quando ocorre a combustão da mistura de ar-combustível, formam-se gases quentes (produtos da combustão) a pressão elevada. Estes gases expandem-se rapidamente e empurram o êmbolo do motor para baixo, gerando um movimento alternado das partes interiores do motor. O movimento alternado dos êmbolos é transformado no movimento rotativo, que pode ser utilizado para movimentar rodas, hélices e máquinas. Com isto, ocorre a conversão da energia química do combustível em energia mecânica.

Na figura 2 pode-se observar o curso total de deslocamento dos pistões definido entre o ponto morto superior (PMS) e o ponto morto inferior (PMI).

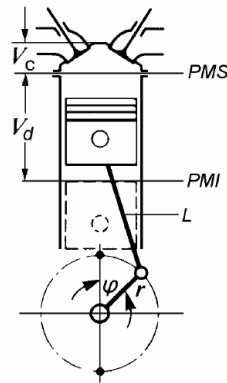


Figura 2 - Diagrama esquemático de um motor de combustão interna de 4 tempos, (Adier, 1993).

É de realçar que, os motores de combustão interna têm sido modificados e melhorados ao longo dos anos, de acordo com as necessidades da indústria automobilística. Desta forma, motores mais leves, económicos e potentes têm sido projetados, bem como a utilização de novos materiais, e melhorias nos mecanismos acoplados ao motor.

A rápida evolução desses sistemas fez com que os sistemas mecânicos, como o carburador e os platinados, se tornassem ineficientes a nível da economia de combustível, eficiência da ignição e controlo da emissão de poluente (Passarini, 1993).

1.2. Principais componentes de um motor de combustão interna

Importante será de referir os componentes principais que constituem o motor de combustão interna, entre eles, os de maior relevância são:

- Pistão ou êmbolo do motor - peça cilíndrica, normalmente feita em alumínio, que tem como objetivo mover-se no interior do cilindro, é este componente juntamente com a biela que transmite o movimento mecânico para a cambota.
- Biela - tem como objetivo transmitir/transformar o movimento retilíneo alternativo em circular contínuo.
- Cambota - recebe força através das bielas que estão conectadas aos pistões, transformando-as em momento, transmitindo esse momento aos componentes acoplados nas extremidades do eixo.
- Bloco do motor - peça fundida em ferro ou alumínio que aloja os cilindros bem como os suportes de apoio à cambota.
- Cárter - recipiente metálico que protege e assegura a lubrificação de certos mecanismos.
- Árvore de Cames - mecanismo destinado a regular a abertura das válvulas do motor.

1.3. Classificação de motores

Os motores de combustão interna podem ser classificados em relação ao ciclo de trabalho. Isto é, existem dois tipos distintos, os motores com ignição por faísca e os motores com ignição por compressão (motores Diesel).

Os primeiros, motores movidos a gasolina, são exemplo de motores com ignição por faísca. Neste caso, a combustão é iniciada com uma faísca fornecida pela vela de ignição. Já nos motores Diesel, o processo de combustão ocorre quando o combustível é injetado no cilindro através dos injetores e, devido à elevada temperatura no momento da injeção, e à elevada pressão, inicia-se a combustão.

Os motores também podem ser classificados quanto ao seu número de tempos/ciclos. O ciclo completo de potência é realizado quando o pistão executa quatro movimentos, dois para cima e dois para baixo, o motor é designado de quatro tempos. Por sua vez, quando o pistão realiza somente dois movimentos durante o ciclo, um para cima e outro para baixo, o motor é designado de dois tempos.

Mais adiante será explicado em detalhe os quatro tempos existentes (admissão, compressão, expansão e escape).

2. Ciclo de Otto ideal

O ciclo termodinâmico base dos motores de combustão interna é o ciclo de Otto. O ciclo de Otto consiste em “6 fases” distintas, caracterizando-se principalmente pela combustão a volume constante. Os diagramas de PV e TS são apresentados na figura 3 e mostram as fases do ciclo de Otto, composto por duas isométricas e duas isentrópicas, para o caso com a borboleta do acelerador completamente aberta.

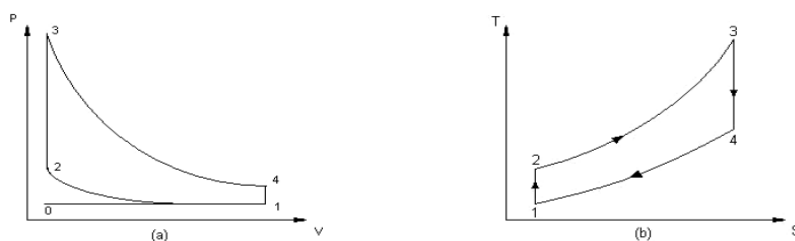


Figura 3 - a) Diagrama PV e b) Diagrama TS para o ciclo de Otto.

Onde temos:

0 → 1 - Admissão adiabática: ar é introduzido para dentro do cilindro a pressão constante.

1 → 2 - Compressão isentrópica: o ar no interior do cilindro é comprimido quando o pistão se movimenta do PMI para o PMS.

2 → 3 - Combustão reversível a volume constante: durante este processo, o calor é fornecido através da combustão.

3 → 4 - Expansão isentrópica: o pistão move-se do PMS para o PMI produzindo trabalho.

4 → 1 - Escape a volume constante: o calor não aproveitado é rejeitado para a fonte fria.

1 → 0 - Escape a pressão constante: o pistão movimenta-se do PMI para o PMS expulsando os gases resultantes da combustão.

3. Tempos do Motor segundo o Ciclo de Otto

O motor segundo o ciclo de Otto é composto por cilindros nos quais se movimentam os pistões e a combustão da mistura ar-combustível ocorre dentro desses cilindros, aumentando assim a pressão interna, sendo esta a responsável pela movimentação do pistão dentro do cilindro.

Convém realçar que existem dois pontos no interior do cilindro importantes, um deles é o Ponto Morto Superior (PMS) e o Ponto Morto Inferior (PMI), o que proporciona a variação do volume interno existente. O PMI é a posição mais baixa que o pistão pode atingir dentro do cilindro (volume máximo dentro do cilindro), e o PMS é o oposto do PMI, que é a posição mais alta que o pistão pode atingir dentro do cilindro (volume do cilindro é mínimo).

Cada cilindro possui uma ou mais válvulas de admissão, por onde entra a mistura ar-combustível, e uma ou mais válvulas de escape, por onde saem os gases resultantes da queima. No caso de estudo, uma vez que é um motor mono cilíndrico, tal como a designação o diz, o motor só tem 1 cilindro.

O ciclo de Otto consiste em 4 etapas:

1. **Admissão** - a válvula de admissão é aberta e a mistura ar-combustível é admitida, uma vez que vai ser gerada uma depressão dentro do cilindro. A mistura ar-combustível é formada pelo ar admitido pela abertura da borboleta (controlada pelo sistema de aceleração) misturado com o combustível provindo do sistema de injeção (eletrónico ou carburador). Esta etapa inicia-se no PMS e termina no PMI.
2. **Compressão** - a mistura ar-combustível é comprimida dentro do cilindro com as duas válvulas fechadas. No fim desta etapa, antes de atingir o PMS, a faísca é produzida (pelo sistema de ignição), iniciando a combustão. Esta etapa inicia-se no PMI e termina no PMS.
3. **Expansão** - devido à alta pressão dentro do cilindro, causada pela combustão da mistura ar-combustível e pelo facto de as válvulas estarem fechadas, o pistão desloca-se,

aumentando o volume ocupado pela mistura. Esta etapa inicia-se no PMS e termina no PMI.

4. **Escape** - a válvula de escape abre e o resultado da combustão sai do cilindro pelo movimento de subida do pistão, desta forma inicia-se assim um novo ciclo. Esta etapa tem início no PMI e termina no PMS, (Pulkrabek, 1997).

A figura 4 ilustra as etapas referidas.

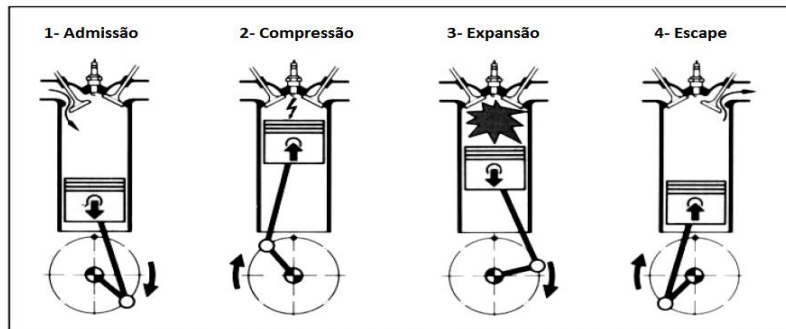


Figura 4 - Ciclo de trabalho de um motor ciclo de Otto, (Bosch, 1988).

No figura 5, estão representados os momentos de abertura e fecho das válvulas de escape e admissão, juntamente com os ciclos de admissão, compressão, expansão e escape, todos eles em relação ao ângulo do eixo da cambota. A linha contínua representa a variação da pressão no cilindro com combustão, e a linha tracejada, sem a combustão, ocorrendo somente a compressão da mistura, sem que ocorra a faísca na vela de ignição.

A entrada da mistura ar-combustível no cilindro ocorre na abertura de válvulas de admissão (IVO), e como se pode observar a válvula de escape ainda se encontra igualmente aberta, e esta só fecha alguns graus após o PMS. Este é o período que usualmente se denomina como “cruzamento de válvulas”, que tem a função de realizar uma melhor limpeza dos gases residuais no cilindro.

A válvula de admissão é fechada (IVC) somente depois do PMI, com o objetivo de aumentar a eficiência volumétrica do motor nos regimes de alta rotação, aproveitando a inércia dos gases.

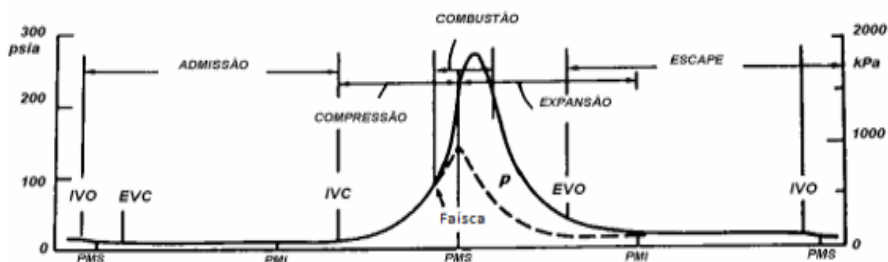


Figura 5 - Eventos do motor de Ciclo de Otto, (Heywood, 1988).

Ao observar a região da combustão na figura anterior, pode-se deduzir que a faísca ocorre em torno de 30° antes do PMS para que o pico de pressão seja em torno de 10 a 15 graus depois do PMS. O momento em que ocorre a faísca é definido como “ângulo de avanço da ignição” e depende de algumas variáveis, como a rotação, a velocidade da combustão e a turbulência da câmara.

4. Combustão

A potência do motor, a eficiência e os níveis de emissões dependem da combustão da mistura ar-combustível no interior do cilindro.

Nos motores do ciclo de Otto convencionais, o combustível e o ar são misturados e comprimidos no cilindro. Em condições normais, a combustão inicia-se no momento em que se dá a faísca da vela, normalmente próximo do final da fase de compressão. A chama, propaga-se então, pela mistura até atingir as paredes interiores do cilindro, momento em que por fim se extingue. Próximo do PMS, a chama cobre uma área equivalente a $2/3$ do diâmetro do cilindro, e atinge as paredes mais distantes da vela, cerca de 15° depois, (Rassweiler et al., 1983).

O início da combustão é meticulosamente determinado de forma a obterem-se os mais altos níveis de binário e potência. Qualquer desvio do ângulo ótimo da faísca provoca a redução do desempenho do motor. A duração do desenvolvimento da chama e propagação é aproximadamente entre 30° a 90° do eixo da cambota.

Se o início da combustão for avançado progressivamente para antes do PMS, o trabalho negativo da compressão aumenta, e pode ocorrer o fenômeno de detonação.

O tempo adequado para o início do processo de combustão depende da velocidade de propagação da chama e das configurações geométricas da câmara de combustão. Estas dependem do projeto do motor, das condições de operação e das propriedades da mistura ar-combustível (Heywood, 1998).

Rassweiler e Withrow, 1938 utilizaram um método para avaliar a propagação da chama (duração da combustão), que relaciona a fração mássica de gases queimados.

Neste método é utilizado a função de Wiebe, que define uma curva-S para o processo de combustão, a partir de dados experimentais, tais como: a posição em graus da árvore de cames e a pressão do cilindro (ver Figura 6).

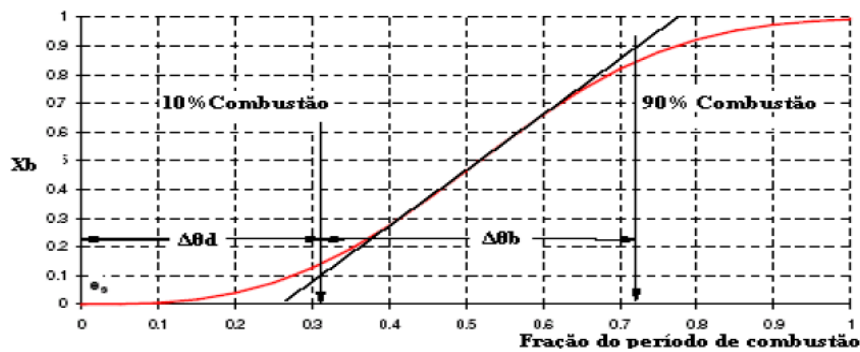


Figura 6 - Fração mássica de gases queimados. Fonte: Poulos, 1983.

$\Delta\theta_d$ - período de desenvolvimento da chama (atraso/avanço de ignição) - período entre o momento da faísca e o tempo para que uma pequena parcela da mistura entre em combustão. A partir de $\Delta\theta_d$ começa a combustão propriamente dita. Por norma este período corresponde a 10% da fração dos gases queimados até encontrar a tangente à função de Wiebe (10% de $\Delta\theta_d$).

$\Delta\theta_b$ - período de combustão rápida - é a fração de período de combustão entre $\Delta\theta_d$ e $\Delta\theta_b$. Sendo que $\Delta\theta_b$ corresponde ao momento que 90% da fração mássica dos gases queimados (x_b) cruza a tangente à função de Wiebe. Considerando a variação do ângulo de cames ($\Delta\theta$) no tempo, pode-se relacionar com a propagação da chama.

5. Formação e relação da mistura ar-combustível

A relação da mistura ar-combustível no interior do cilindro é um dos fatores primordiais para o controlo da combustão em motores de combustão interna. As características iniciais do escoamento são determinadas pelo sistema de admissão e sofrem variações durante a compressão.

A combustão é fortemente influenciada pela formação da mistura, que por sua vez é influenciada pelo tipo de sistema de admissão do motor. Nos motores de combustão interna, o sistema de admissão da mistura ar-combustível consiste num filtro de ar, um carburador ou injetor de combustível e um coletor de admissão. Durante o processo de admissão, ocorre a diminuição da pressão ao longo do sistema de admissão, ou seja, ocorre uma perda de carga no sistema, (Andrade, 2007).

Se na região da vela de ignição ocorrer uma condição que não favoreça a propagação da chama, aumenta o atraso e a duração da combustão. (Lenz, 1990).

Segundo Garret, 2001, a mistura estequiométrica não queima completamente como esperado, pois os elementos gasosos e em estado de vapor não conseguem formar uma mistura

perfeitamente homogênea dentro da câmara de combustão no breve instante de tempo disponível.

É de realçar que segundo Bosh, 2005, o consumo específico de combustível num motor Otto depende principalmente da proporção da mistura ar-combustível utilizada. A queima real e total para o mínimo consumo de combustível possível exige um excesso de ar em relação à condição estequiométrica, porém, esse excesso é limitado devido à inflamabilidade da mistura.

Heywood, 1988, acrescenta que a relação ótima da mistura ar-combustível é aquela que possibilita a obtenção da potência de saída desejada com menor consumo de combustível possível, mantendo um funcionamento suave e confiável.

Segundo Bosh, 2005, para determinar o quanto a mistura ar-combustível efetivamente disponível desvia da teoricamente necessária (estequiométrica), temos:

$$\lambda = \frac{(A/F)}{(A/F)_s} \quad (1)$$

Onde λ é o coeficiente de ar. Os valores de λ determinam, portanto, o tipo de mistura, conforme:

$\lambda = 1$: mistura estequiométrica;

$\lambda < 1$: falta de ar ou excesso de combustível, é chamada de mistura rica;

$\lambda > 1$: excesso de ar ou falta de combustível, é chamada de mistura pobre.

Ainda segundo o mesmo autor, a potência máxima ocorre para misturas ricas de valor aproximadamente a $0,85 < \lambda < 0,95$, enquanto que o menor consumo e a menor potência ocorre para misturas pobres de valor entre $1,2 < \lambda < 1,5$.

O fator lambda é bastante importante para o funcionamento do motor, pois influencia de forma direta o desempenho, o consumo de combustível e as emissões poluentes. A figura 7 mostra a variação da potência e do consumo específico em função de λ , considerando que o avanço de ignição, a rotação e a posição da válvula da borboleta são mantidos constantes.

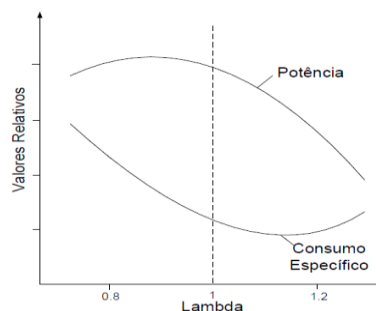


Figura 7 - Variação da potência e do consumo de combustível em função de lambda, (Denton, 2000).

A partir da figura 7 pode-se constatar que a máxima potência é obtida com a mistura ligeiramente rica, enquanto que o menor consumo é obtido com a mistura ligeiramente pobre. A condição estequiométrica situa-se na zona intermediária, proporcionando um bom desempenho a baixo consumo.

5.1. Relação ar-combustível e os principais gases emitidos por motores a combustão.

Nos motores de combustão interna, os principais combustíveis utilizados estão em geral divididos em dois grupos principais, os derivados do petróleo ou hidrocarbonetos e os oxigenados ou hidrocarbonetos oxigenados.

A produção de combustíveis líquidos e gasosos tem como principal fonte natural o petróleo, composto por diversos tipos de hidrocarbonetos. Estes hidrocarbonetos presentes no petróleo estão classificados em famílias de parafinas e de naftenos entre outros. A diferente proporção entre eles é condicionada pelo refino e tipo de operação pela qual se extraem os combustíveis, sejam gasosos, tal como o propano e o butano, sólidos como as parafinas, ou líquidos como a querosene, a gasolina e o óleo diesel.

Uma mistura teórica é dita estequiométrica quando produz apenas CO_2 e H_2O . A relação entre a massa de ar e a massa de combustível admitido é definido de relação ar-combustível, e varia de combustível para combustível (Von Glehn, 2001).

As principais relações estequiométricas podem ser encontradas na Figura 8.

| Combustível | Proporção por Massa | Proporção por Volume | Porcentagem de combustível por massa |
|-------------|---------------------|----------------------|--------------------------------------|
| Gasolina | 14,7 : 1 | - | 6,8% |
| Gás Natural | 17,2 : 1 | 9,7 : 1 | 5,8% |
| Propano | 15,5 : 1 | 23,9 : 1 | 6,45% |
| Etanol | 9 : 1 | - | 11,1% |
| Metanol | 6,4 : 1 | - | 15,6% |
| Hidrogênio | 34 : 1 | 2,39 : 1 | 2,9% |
| Diesel | 14,6 : 1 | 0,094 : 1 | 6,8% |

Figura 8 - Relações estequiométricas dos principais combustíveis. (Von Glehn, 2001).

Para efeitos comparativos em razão de volume, a quantidade de ar necessário para a combustão estequiométrica de 1,0 litros de Gasolina pura ($E0^\wedge$) é de aproximadamente 10 000 litros, considerando a relação ar-combustível de 14,7:1, (Adler, 1988).

Segundo Von Glehn, 2001, os principais gases de emissão estão apresentados na figura 9:

| | |
|-------------------------------|--------------------------------------|
| H ₂ O | vapor de água |
| CO ₂ | dióxido de carbono |
| N ₂ | nitrogênio |
| CO | monóxido de carbono |
| H _x C _y | hidrocarbonetos |
| NO _x | óxido de nitrogênio, dióxido... etc. |
| H ₂ | hidrogênio |
| CH ₄ | metano |
| SO _x | óxido de enxofre, dióxido... etc. |
| O ₂ | oxigênio |

Figura 9 - Principais gases poluentes, (Von Glehn, 2001).

O gás mais preocupante e agressivo é o CO, sendo este um gás levemente inflamável, incolor, inodoro e muito perigoso devido à sua grande toxicidade.

A produção de Monóxido de Carbono é aumentada potencialmente devido a dois fatores: uma relação ar-combustível muito rica e uma não homogeneidade da mistura (Von Glehn, 2001).

6. Sistema de Injeção e Ignição

No funcionamento dos motores de ciclo de Otto, existem duas variáveis importante que devem ser controladas:

1. A quantidade de combustível da mistura - a relação estequiométrica de ar-combustível deve ser obedecida para que a reação química de combustão produza apenas CO₂ e H₂O e para que a quantidade de energia libertada no processo seja máxima. Quando a mistura de ar-combustível é ideal, todo o carbono (C) presente na mistura é consumido, da qual se forma dióxido de carbono (CO₂), por sua vez a quantidade de hidrogênio (H) na mistura é de igual forma toda consumida, formando vapor de água (H₂O), já o nitrogênio (N₂) presente na reação mantém-se inalterado. Nestas condições, diz-se que a mistura ar-combustível é estequiométrica (Von Glehn, 2001).
2. O momento em que ocorre a faísca (ignição) - o processo de ignição dá-se pela produção da faísca que inicia o processo de combustão dentro de cada cilindro. Uma vez que o processo de combustão da mistura ar-combustível leva algum tempo para ser completa, a faísca deve ser produzida um pouco antes do PMS de tal forma que a combustão esteja completa, quando o cilindro atinge o PMS. A distância do ponto em que a faísca é produzida e o PMS é medida em graus e é chamado de **Avanço de Ignição** e o valor deste varia em função das condições de funcionamento do motor e da velocidade da

chama do combustível utilizado. O Avanço de Ignição pode ser calculado pela equação seguinte:

$$\text{Avanço de Ignição} = \frac{\text{Tempo entre ignição e PMS}}{\text{Período de rotação do Motor}} \times 360^\circ \quad (2)$$

7. Sistema de Injeção

O sistema pioneiro responsável pela formação da mistura ar-combustível foi o carburador, um sistema mecânico responsável por fornecer a dose correta da mistura ar-combustível. Essa mistura obedece a uma relação designada de “razão de mistura”, que é a razão entre a massa de ar e de combustível admitido, (Guibet, 1999).

Para Taylor, 1988, o carburador básico é formado por uma passagem de ar de geometria fixa, contendo uma restrição com a forma de um venturi.

Com o motor em funcionamento, pode-se verificar que a razão da mistura ar-combustível varia consoante a rotação do motor, ou seja, o controlo do fluxo de ar, dá-se pela alteração da posição da borboleta.

Desta forma, a posição da borboleta pode ser dividida em quatro períodos:

- (A) Marcha lenta - borboleta quase totalmente fechada;
- (B) Faixa intermediária - 0 a 25% de abertura da borboleta;
- (C) Faixa média - 25 a 75% de abertura da borboleta;
- (D) Potência máxima - 75 a 100% de abertura da borboleta.

Na posição (A) tal como na posição (B), o motor opera com uma mistura rica para estabilizar a rotação, que por consequência tem os maiores níveis de emissões.

Já na posição (C), o motor opera com uma mistura pobre, que pode ser obtida com o auxílio de um tubo tipo “flauta”.

Por fim, na posição (D), o motor opera novamente com uma mistura rica, pois é nesta fase que dispõe de potência máxima, baixa temperatura nas válvulas de escape e maior rendimento volumétrico.

7.1. Injeção Eletrónica

Segundo Ferrari, 2005, a injeção eletrónica de combustível surge como uma alternativa ao sistema de carburador, tendo a mesma função, preparar a mistura ar-combustível adequada para o correto funcionamento do motor.

A injeção eletrônica é um sistema que não é acionado pelo motor, ou seja, é comandado eletronicamente e tem o objetivo de injetar a quantidade de combustível previamente calculada e definida, controlando desta forma a mistura ar-combustível em função das necessidades imediatas do motor.

Os sistemas de injeção eletrônica de combustíveis podem ser classificados de monoponto e multiponto, posicionados o mais próximo possível da válvula de admissão, (Rech, 2002).

O sistema monoponto (Figura 10) é caracterizado pela existência de um único injetor para todos os cilindros, neste caso o injetor está localizado junto ao corpo da borboleta e é responsável pela injeção de combustível para todos os cilindros. Já no sistema multiponto (Figura 11), existe um injetor para cada um dos cilindros. Estes bicos ficam dispostos logo antes da válvula de admissão.

No caso de estudo, motor monocilíndrico, o tipo de injeção é monoponto.

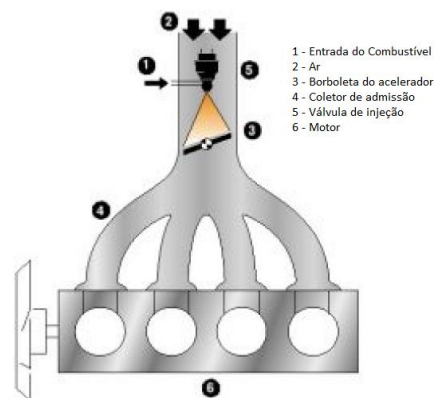


Figura 10 - Sistema de injeção monoponto (Rech, 2002).

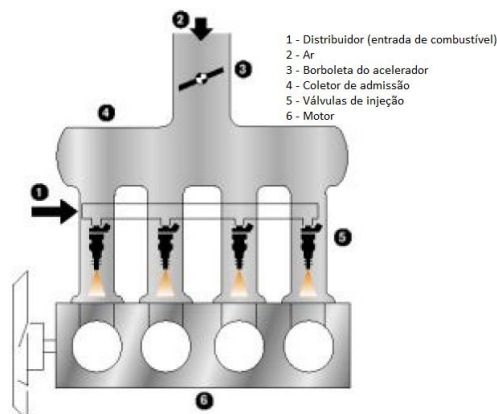


Figura 11 - Sistema de injeção multiponto (Rech, 2002).

Em ambos os sistemas (monoponto e multiponto), a quantidade de combustível injetada no cilindro é determinada pelo tempo de abertura da válvula de injeção (medida geralmente em milissegundos).

É ainda de realçar que ambos podem ser de forma sincronizada ou sequencial, no primeiro caso a injeção de combustível ocorre simultaneamente em todas as válvulas injetoras, já no segundo a injeção de combustível obedece à sequência de abertura de válvulas de admissão.

7.2. Principais Vantagens da Injeção Eletrônica em relação ao Carburador

Segundo Ferrari, 2005, as principais vantagens da injeção eletrônica em relação ao carburador, são as seguintes:

- Melhor controlo da razão da mistura ar-combustível em todas as condições de operação, com possibilidade de ajuste de acordo com os valores instantâneos de um elevado número de parâmetros do motor, com redução do consumo de combustível, aumento do desempenho e melhoria nas emissões;
- Melhor resposta a fenómenos transientes, melhorando assim a aceleração do motor, devido à injeção de pequenas quantidades de combustível;
- Menor perda de carga, resultando num ganho de potência e binário;
- Menor risco de detonação, pois é necessário menor tempo entre a formação da mistura e da própria combustão, e a composição é mais homogênea quanto ao excesso de combustível.

8. Sistema de Ignição

O processo de admissão nos motores de combustão interna com ignição por faísca é caracterizado pela quantidade da mistura ar-combustível. Finalizado o processo de admissão com o movimento descendente do pistão, o sistema biela-manivela inicia a compressão do fluido de trabalho admitido até ao instante da introdução da faísca elétrica que promove o início da combustão da mistura. Essa energia de ativação varia de 0,2 mili Joules para iniciar a combustão da mistura ar-combustível (estequiométrica) até 3,0 mili Joules para misturas ricas ou pobres, (Carvalho, 2005).

O sistema de ignição é responsável pelo fornecimento da energia para a produção da faísca através da bobina e da vela de ignição. É baseado no princípio de elevação da tensão fornecida pela bateria, utilizando um transformador elevador de tensão, que na indústria automóvel, é denominada de bobina de ignição.

Tal como a injeção eletrônica, de modo semelhante, a ignição eletrônica permite que o motor trabalhe com o ponto de ignição sincronizado com as diversas condições de funcionamento do motor (Von Glehn, 2001).

8.1. Ângulo de Ignição

A combustão inicia-se após a faísca, e o período de tempo entre o início da faísca e o início da combustão é considerado um estágio inicial extremamente lento, denominado ângulo de atraso/avanço de ignição, “ignition delay”, (Ishii K., 1997).

Nos motores de combustão interna, o pico de pressão no cilindro deve ocorrer sempre aproximadamente entre 10° a 15° em relação à cambota. Este pico de pressão depende da duração da combustão, (Guibet, 1999).

Tal como se pode observar na figura 12, se o ponto de ignição for fixo, quando ocorre um aumento da rotação do motor, a amplitude da pressão diminui, e por consequência o pico ocorre cada vez mais tarde em relação ao ângulo da cambota, isto deve-se ao aumento da intensidade da turbulência, que não é linear com a rotação, sendo que a duração da combustão está diretamente relacionada ao aumento da turbulência, (Heisler, 1995).

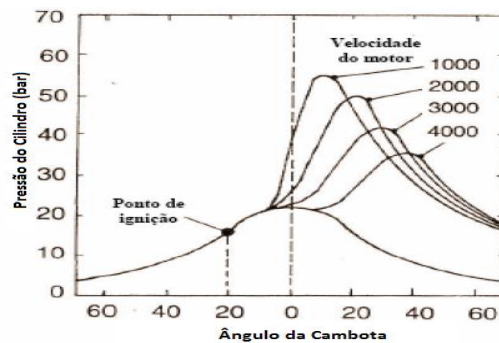


Figura 12 - Avanço de ignição fixo com aumento da rotação, (Heisler, 1995).

Na figura 13, com o avanço do ponto do início da faísca, ocorre um aumento da rotação do motor, como resultado, obtém-se um pico de pressão da combustão aproximadamente no mesmo ângulo depois do ponto morto superior com valores próximos, com um pequeno decréscimo do valor do pico devido à redução da eficiência volumétrica na medida em que há um aumento da rotação do motor, (Heisler, 1995).

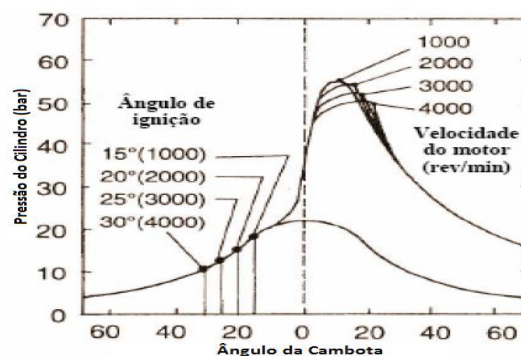


Figura 13 - Variação do ponto de ignição e a sua influência na pressão do cilindro, (Heisler, 1995).

Ambas as figuras anteriores, figura 12 e 13, mostram a influência do tempo da faísca relativo ao ponto morto superior no desenvolvimento da pressão no cilindro do motor. Observa-se que para avanços de ignição muito adiantados, a combustão inicia-se mais cedo, e o trabalho dos gases sobre o êmbolo no final do ciclo de compressão é maior, o que diminui o trabalho líquido por ciclo. Por outro lado, se o avanço de ignição estiver atrasado, a combustão inicia-se muito tarde, e diminui o trabalho dos gases sobre o êmbolo durante o ciclo de expansão pelo deslocamento dos picos de pressão para ângulos maiores depois do PMS, (Taylor, 1988).

Na figura 14, está representado um gráfico (P,V) de um motor típico de combustão interna a 4 tempos, onde se pode ver a influência do momento da faísca. Os avanços de ignição estão representados pelos números 1, 2, 3 e 4, que representam o avanço da faísca de 0°, 13°, 26° e 39° respectivamente em relação ao ponto morto superior. As condições de operação do motor para este resultado são λ de 1,13 (mistura pobre) e a rotação do motor de 1200 rpm, (Taylor, 1988).

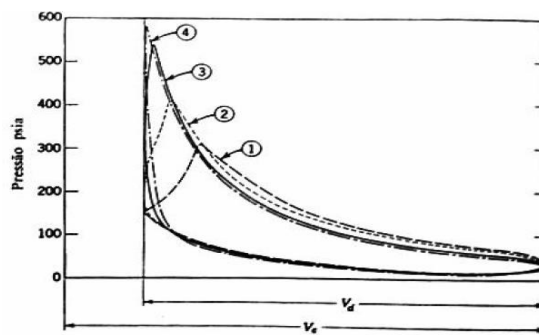


Figura 14 - Diagrama (P,V), (Taylor, 1988).

Pode-se observar que, com o aumento do avanço de ignição, ocorre um aumento na área do diagrama (P,V), o que significa um aumento da potência, se bem que existe um avanço de ignição ótimo para cada condição de operação do motor para se obter o binário máximo.

São vários os fatores que influenciam o avanço ótimo da ignição, entre eles destacam-se: a velocidade do motor, a velocidade da queima, a massa de mistura admitida, a relação da mistura e o combustível utilizado.

Conclui-se assim que, ao aumentar a rotação do motor, o início da ignição deve ser adiantado para que o pico de pressão ocorra numa faixa pequena em relação ao ângulo da cambota.

O avanço da ignição excessivo pode provocar o fenómeno conhecido como detonação, uma combustão anormal decorrente das altas temperaturas na câmara de combustão.

Por outro lado, um avanço de ignição atrasado, quando exagerado, pode ocorrer perda de potência, diminuição da eficiência térmica do motor, aumento da temperatura dos gases de escape aquando termina a combustão depois da abertura da válvula de escape alguns graus antes do PMI.

8.2. Detonação

A detonação é um fenômeno de combustão anormal que depende de processos físicos e químicos interligados com o projeto do motor, tal como a relação da compressão e das condições de operação do motor, bem como da relação da mistura e do mapa de avanço de ignição.

Quando pequenas parcelas da mistura ar-combustível entram em combustão espontânea devido a estas estarem suscetíveis a altas temperaturas e pressão, ocorre o fenômeno conhecido por detonação, ou seja, ocorrem varias combustões de dimensão pequena em ponto distintos da câmara, geralmente no final da combustão, desencadeando uma auto combustão extremamente rápida e descontrolada, tendo como consequência o movimento incorreto de certos componentes principais do motor, ou seja, o êmbolo em vez de ser empurrado de modo uniforme, sofre um impacto instantâneo, devido às pequenas explosões que provocam grandes variações de pressão no cilindro, podendo danificar de forma grave alguns componentes do motor, é também caracterizada por um ruído bem característico devido a essas variações de pressão no cilindro, (Heywood, 1988) (ver Figura 13).

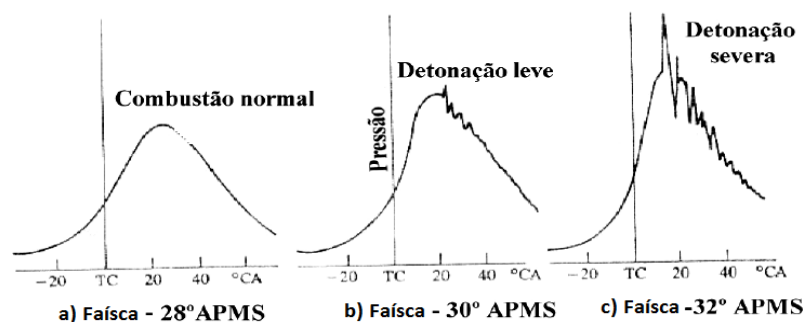


Figura 15 - Tipos de Detonação, (Heywood, 1988).

É de referir que existem alguns parâmetros de projeto que tendem a reduzir a temperatura da mistura não queimada e conseqüentemente tendem a minimizar a possibilidade de ocorrer a detonação. Esses parâmetros são:

- Razão de compressão - é um fator importante que determina a temperatura e a pressão no início e final da combustão. Um aumento na razão de compressão eleva a pressão e a temperatura dos gases no final da compressão, o que pode desencadear a detonação;
- Quantidade de mistura/combustível admitido - a redução da massa admitida no interior do cilindro pela abertura da borboleta reduz a temperatura e a densidade da carga no momento da ignição, reduzindo a possibilidade de ocorrer detonação;

- Temperatura da mistura admitida - o aumento na temperatura da mistura faz a temperatura na compressão ficar maior e, assim, aumenta a tendência à detonação;
- Temperatura da parede da câmara de combustão - pontos quentes na parede da câmara de combustão, proporcionam a auto ignição;
- Atraso da ignição - o atraso da ignição faz com que o início da faísca ocorra mais perto do PMS, ou seja, as pressões máximas ocorrem mais tarde na expansão, reduzindo a sua intensidade, (Ganesan, 1995).

8.3. Auto Ignição

A Auto Ignição é a ignição da mistura ar-combustível pelo superaquecimento das válvulas, ou das velas, ou por qualquer outro ponto quente no interior da câmara de combustão do motor com temperaturas superiores a 1000°C, ou seja, é a ignição provocada por outras fontes que não seja a faísca da vela.

8.4. Poder Antidetonante de um Combustível

Uma propriedade de importância fundamental é a qualidade antidetonante de um combustível. O poder antidetonante do combustível é determinado pelo número de octanas que relaciona a capacidade do combustível de resistir à detonação. Representa a resistência da mistura ar-combustível dentro da câmara de combustão ao estar submetido a altas temperaturas sem entrar em combustão espontaneamente.

9. Principais componentes do sistema de injeção/ignição eletrónica

Estes componentes são os responsáveis por controlar o processo fisicamente a partir de sinais provindos da UCE. Os principais componentes utilizados num sistema de injeção/ignição eletrónica são:

- a) **Electro - injetor** - pulveriza o combustível para realizar a mistura com o ar. O tempo em que fica aberto determina a quantidade de combustível da mistura.
- b) **Vela de ignição** - produz a faísca que inicia o processo de combustão da mistura ar-combustível.

A seguir estão definidos detalhadamente estes dois componentes.

9.1. Electro - injetor

De forma a criar um compromisso entre o aumento de potência requerida nos motores de combustão interna e a garantia do controlo de emissões promovida pela melhor atomização do combustível, os denominados electro - injetores foram desenvolvidos baseados no princípio de funcionamento de electroválvulas acionadas por solenoides, (Bauer, 1999).

Segundo Von Glehn, 2001, o Electro - injetor é uma electroválvula normalmente fechada, comandada pela UCE que promove a sua abertura. Esta fecha pela ação de uma mola interna quando a electroválvula (Injetor) não recebe energia. As electroválvulas são baseadas num magneto que é atraído para o núcleo de um solenoide quando este é percorrido por uma corrente elétrica.

A figura 16 representa a vista em corte de um injetor:

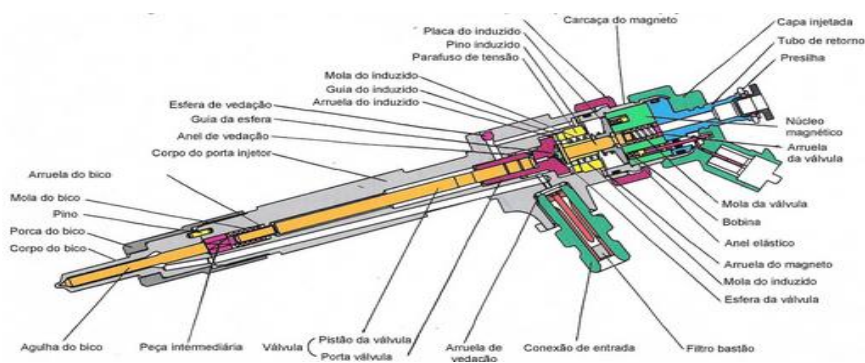


Figura 16 - Vista em corte de um bico injetor (Bosh, 1988).

Onde, os aspetos mais importantes são:

1. Filtro de combustível - evita a passagem de impurezas.
2. Bobina - solenoide que movimenta o magneto quando excitado energeticamente.
3. Agulha - peça mecânica que bloqueia a passagem de combustível, e que recolhe (juntamente com o magneto) quando o solenoide é energizado, permitindo a passagem do combustível.
4. Espigão - abertura pela qual passa o combustível quando a agulha recolhe.

Na prática, o solenoide é conectado à tensão da bateria de um lado e à UCE do outro, de modo que quando a UCE deseje comandar a abertura do bico do injetor esta crie um “caminho” de corrente para a massa, a bobina é energizada, a agulha recolhe e há injeção de combustível, em condição de repouso, quando não há injeção de combustível, a UCE deixa o terminal em alta impedância, ou seja, não flui corrente pelo injetor e não há injeção de combustível. Uma forma comum para efetuar este procedimento é através de MOSFET's (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor).

De seguida (Figura 17) está ilustrado o injetor e respetiva alimentação utilizado no motor no caso prático.



Figura 17 - Injetor utilizado, acoplado ao motor.

9.2. Velas de Ignição

As velas de ignição são responsáveis por criar a faísca que inicia o processo de combustão. Esta faísca é criada a partir de uma elevada tensão elétrica entre os dois terminais separados por uma pequena distância entre si.

Na figura 18 está representado a vista em corte de uma vela de ignição.

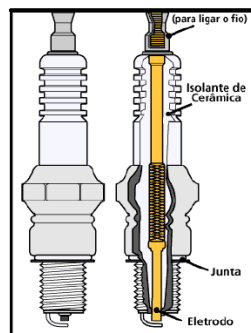


Figura 18 - Vista em corte de uma vela de ignição (Bosh, 1988).

Onde:

1. Conector - ligação à fonte de energia que gera a faísca.
2. Isolante de cerâmica - promove o isolamento térmico e elétrico.
3. Eletrodo - conduz a energia elétrica até ao local onde a faísca é produzida.
4. Junta - conduz a energia que passa do eletrodo central ao eletrodo lateral de volta à massa.

Na figura seguinte, está ilustrado a vela utilizada no caso prático.



Figura 19 - Vela utilizada no caso prático.

Para a produção da tensão necessária à produção da faísca, é utilizada uma bobina. A bobina (ver Figura 20) consiste num enrolamento primário e num enrolamento secundário (lei da indução), e em sistema de corrente alternada a tensão no primário é multiplicada no secundário segundo a relação do número de voltas em cada uma das bobinas, conforme a equação (2).

$$V_{\text{secundário}} = V_{\text{primário}} \times \frac{N^{\circ} \text{ de voltas secundário}}{N^{\circ} \text{ de voltas primário}} \quad (3)$$

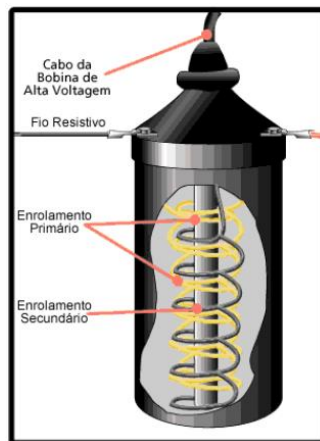


Figura 20 - Vista em corte de uma bobina de ignição (Bosh, 1988).

A relação anteriormente transcrita só é válida para sistemas de corrente alternada, pois é a variação de corrente no primário que provoca uma variação do campo magnético no núcleo que finalmente gera uma variação de corrente no secundário.

No momento da ignição, a tensão dos elétrodos da vela de ignição sobe abruptamente de zero até à tensão de ignição. Depois de gerada a faísca, a tensão na vela de ignição, desce até à tensão de combustão. Durante o período de duração da faísca a mistura ar-combustível tende a inflamar.

Após a rutura da faísca a tensão estabelece-se periodicamente como mostra a figura 21.

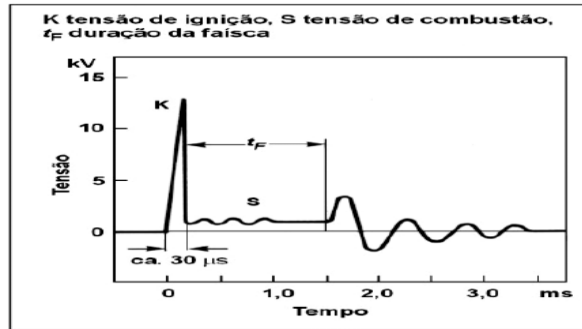


Figura 21 - Tensão na vela de ignição, (Bosch, 1988).

10. Controlo Eletrónico dos Motores de Combustão Interna Ciclo Otto

A UCE (Unidade de Comando Eletrónico)

A evolução dos sistemas de gerenciamento eletrônico do motor promoveu a redução do número de componentes mecânicos em ambos os sistemas, através da inserção de módulos eletrônicos de processamento de sinais, Bauer, 1999.

A tendência, conforme Benvenuti e Arsie, 2003, é os motores utilizarem Unidades de Comando Eletrónico, para desta forma controlarem a alimentação da mistura nos motores de combustão interna do ciclo de Otto de forma mais eficiente, proporcionando uma combustão mais adequada para as diferentes condições de operação.

A UCE é responsável por controlar o funcionamento do motor, para isso recebe os sinais dos sensores para obter a condição de funcionamento num dado momento, e então os sinais de comando são enviados para os “atuadores”, (injeção e ignição), de forma que o motor opere de acordo com os mapas pré-definidos. As duas saídas principais do controlo da UCE são os sinais que controlam o tempo de injeção de combustível e o avanço de ignição. A figura 22 ilustra um diagrama de blocos de um sistema de injeção/ignição eletrónica.

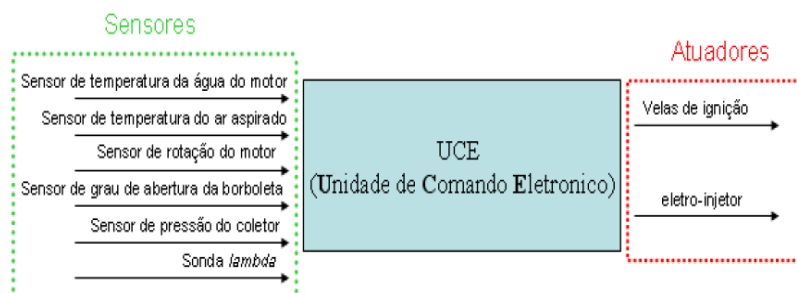


Figura 22 - Diagrama de blocos de um sistema de injeção/ignição eletrónica.

No caso prático a UCE utilizado é uma Haltech e6h.

10.1.Haltech

A Haltech é uma empresa australiana, criada em 1986, que desenvolve sistemas de gerenciamento eletrônico. Estes sistemas, são usados em diversas áreas, como na conversão de motores de carburador para injeção eletrônica, controlo da injeção e ignição de motores, aplicações em rally, centros de pesquisa e até mesmo em barcos, jet skis, karts e aviões. A principal característica destes sistemas é a flexibilidade de gerenciar vários tipos de motor. A Haltech fornece também acessórios, tal como kits de controlo e sensores, entre eles destacam-se: sonda lambda, solenoides de controlo de sobrealimentação, chicotes, entre outros.

As principais funcionalidades disponíveis são:

- Controlo de marcha lenta;
- Controlo do lambda;
- Controlo de sobrealimentação;
- Corte de combustível em fase de desaceleração;
- Comando para sistema de válvulas variável;
- Limitação da rotação;
- Calibração dos sensores;
- Sensor de pressão barométrica.

A flexibilidade das centralinas Haltech, permitem controlar diversos sensores, e conseqüentemente diversos parâmetros do motor. Entre eles destacam-se os seguintes exemplos mais importantes:

- Número de cilindros;
- Solicitação da carga do motor (Pressão no coletor ou posição da borboleta);
- Tipo de sensor de sincronismo;
- Sensor de fase para injeção sequencial;
- Tipo de ignição;
- Tempo de carga das bobinas;
- Rotação limite e tipo de limitação da rotação;
- Temperatura de operação do motor;
- Faixa de rotação até 10500 rpm ou até 16000 rpm (resolução dos mapas);
- Modo de injeção.

A Haltech disponibiliza um software de interface que permite ao usuário visualizar e alterar todos os parâmetros e variáveis do sistema. A conexão com a central é através de um cabo RS-232. O sistema permite ainda armazenar dados de calibração no pc e depois enviar para a ECU, possibilitando ainda a alteração on-line dos valores dos parâmetros, tabelas e mapas.

Segue-se a figura 23 que representa a centralina utilizada no caso prático.



Figura 23 - Centralina Haltech E6h, utilizada no caso prático.

10.2. Os principais sensores de um sistema de injeção/ignição eletrônica

É importante realçar que os sistemas de injeção e ignição eletrônica utilizam a leitura de diversos sensores acoplados no motor.

Os sensores são responsáveis por disponibilizar à UCE as informações necessárias para esta realizar o cálculo da quantidade de combustível que deve ser injetada e do avanço de ignição.

Estão descritos a seguir alguns exemplos de sensores de um sistema de injeção/ignição eletrônica:

- a) **Sensor de temperatura da água do motor** - indica a temperatura do líquido de refrigeração do motor, e conseqüentemente a temperatura aproximada do bloco do motor. Normalmente o sensor utilizado é do tipo NTC. O motor utilizado não tem refrigeração a água.
- b) **Sensor de temperatura do ar admitido** - indica a temperatura do ar a ser utilizado na mistura ar-combustível. É importante porque a temperatura está diretamente ligada à densidade do ar e, conseqüentemente, à massa de ar injetado.



Figura 24 - Sensor de temperatura do ar admitido utilizado no caso prático.

- c) **Sensor de rotação do motor** - indica a frequência de rotação do motor. É uma variável bastante importante e é utilizada como entrada na determinação do tempo de injeção e do avanço de ignição, ou seja, informa a posição de cada cilindro.



Figura 25 - Sensor de rotação do motor utilizado no caso prático.

- d) **Sensor da posição da abertura da borboleta** - indica o quanto a borboleta está aberta com base na posição do acelerador. A borboleta determina a quantidade de ar que entra na câmara de admissão.



Figura 26 - Sensor da posição da abertura da borboleta utilizado no caso prático.

- e) **Sensor de pressão do coletor** - também conhecido como sensor MAP (Manifold Air Pressure, ou Pressão Absoluta no Coletor), indica a pressão de ar no coletor.



Figura 27 - Sensor de pressão do coletor utilizado no caso prático.

- f) **Sonda lambda** - indica a quantidade de oxigênio nos gases de escape, informando à UCE se a mistura é rica ou pobre em combustível. Desta forma a UCE pode corrigir a quantidade de combustível injetada durante o funcionamento do motor.



Figura 28 - Sonda lambda utilizada no caso prático.

- g) **Sensor do caudal de ar** - mede a quantidade de ar que o motor está a admitir.
- h) **Sensor de detonação** - é um sensor de medição do ruído ou vibração que o motor emite, este é instalado no bloco do motor, e tem a função de informar o módulo central da ocorrência do processo de detonação.



Figura 29 - Sensor de detonação utilizado no caso prático.

11. Mapa base de combustível

Para gerar um mapa base de combustível é necessário acoplar as equações do caudal mássico do ar, com as equações do caudal mássico do combustível, (Zhu, et al., 2011).

A figura 30, ilustra um mapa base da pressão no coletor de admissão em função do ângulo da borboleta e da rotação do motor. Este tipo de gráfico 3D é útil, pois pode-se observar o comportamento do mapa base em diversos regimes de operação do motor.

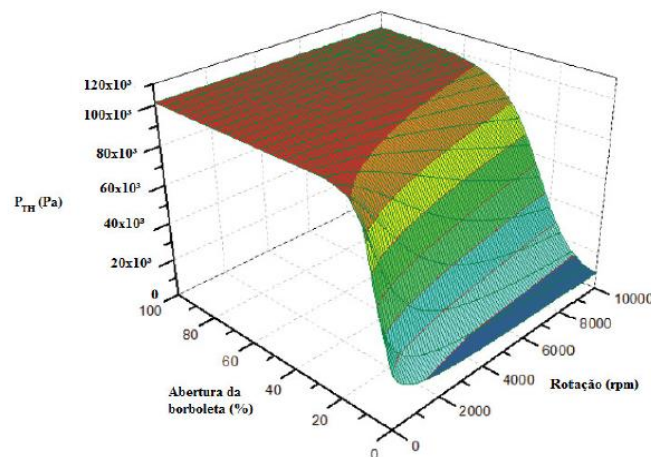


Figura 30 - Mapa base de pressão, ângulo da borboleta e rotação do motor, (Zhu et al., 2011).

A Figura 31 resulta da acoplação das equações relacionadas ao solenoide do injetor de combustível, nas quais as características técnicas determinarão a quantidade de combustível a ser injetada. O gráfico ilustra o mapa base de combustível, com o tempo de injeção de combustível (ms) em função da rotação do motor e do ângulo de abertura da borboleta.

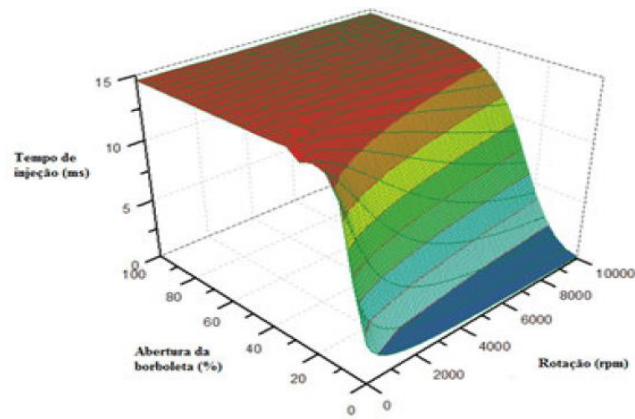


Figura 31 - Mapa base do tempo de injeção de combustível, (Zhu et al., 2011).

Os mapas são gerados de forma a correlacionar uma ou mais condições de funcionamento do motor com o parâmetro a ser controlado. Os mapas de ângulo de ignição e do tempo de injeção, por exemplo, são geralmente determinados em função da rotação do motor e de uma segunda variável, diretamente ligada ao tipo de controle e da estratégia que se utiliza durante a calibração do motor. A principal vantagem deste tipo de calibração é a possibilidade de otimizar os parâmetros do motor em pontos específicos pretendidos do funcionamento.

11.1. Controle da Injeção

Para o controle da injeção tem-se um mapa base que relaciona o tempo de injeção com as condições de carga e rotação do motor. A condição de carga pode ser obtida a partir da pressão do coletor de admissão, ou em relação à posição da borboleta. Neste mapa base podemos aplicar as seguintes correções:

- Correção percentual em função da temperatura do motor;
- Correção percentual em função da temperatura e da pressão do ar;
- Correção percentual em função da tensão da bateria;
- Correção percentual em função da pressão barométrica;
- Primming map (correção no arranque a frio);
- Enriquecimento pós-partida;
- Mapa do ângulo de injeção.
- Mapa do tempo de injeção em função da rotação na condição de borboleta fechada;
- Mapa do tempo de injeção em função da rotação em condições de borboleta completamente aberta.

11.2. Controlo de Ignição

Para o controlo da ignição tem-se um mapa base que relaciona o avanço de ignição com a rotação do motor e a solicitação de carga (pressão no coletor ou posição da borboleta). A partir do ângulo de avanço base, são aplicados os seguintes mapas de correção:

- Temperatura do ar - correção do ângulo de avanço de ignição em função da temperatura do ar, amplamente utilizado em motores sobre - alimentados para evitar a ocorrência de detonação.
- Temperatura do motor - correção do avanço em função da temperatura do motor visando principalmente melhorar as condições de arranque a frio e de aquecimento do motor (warm up).

12. Calibração do sistema

Para a calibração da UCE ser efetuada com sucesso, é necessário ter em conta alguns aspetos. Porém, é um procedimento experimental e somente o comportamento do motor durante a calibração pode revelar detalhes sobre o estado de funcionamento.

O ângulo de injeção de combustível, é o parâmetro que controla em qual ângulo da cambota antes do PMI a injeção de combustível inicia e termina. O objetivo de calibrar o ângulo de injeção, é facilitar a atomização, fazendo com que o combustível seja melhor aproveitado e reduzindo o consumo de combustível.

O tempo de injeção é o tempo na qual o electro injetor permanecerá aberto. Ao saber-se o caudal do injetor, pode-se prever o tempo que o injetor necessita de permanecer aberto para fornecer a quantidade de combustível desejada, seguindo a razão ar-combustível estequiométrica da mistura.

O ângulo de avanço de ignição é o parâmetro que permite controlar o momento exato em que se inicia a combustão da mistura dentro do cilindro, é calibrada em graus antes do PMS. Com isto, o objetivo é alcançar o melhor aproveitamento da combustão e tenta-se evitar a detonação.

13. Ensaios Dinamométricos

O banco de ensaios utilizado para a realização dos testes, foi projetado exclusivamente para motores com binário próximo do motor escolhido e consiste na adaptação de um disco de travão automóvel acoplado na parte exterior do veio da cambota.

O travão é acionado de forma semelhante a um travão de mão convencional.

É ainda de referir que o sistema de travagem contém um manómetro para medir a pressão hidráulica (ver Figura 32 e 33). Pois uma vez que se sabe a área em contacto com o travão, consegue-se determinar a força exercida pelo travão, de forma a ser uma unidade base e útil para a realização dos cálculos.



Figura 32 - Manómetro de pressão hidráulica.



Figura 33 - Conjunto do dinamómetro.

14. Parâmetros de Desempenho

14.1. Rendimento Volumétrico

O parâmetro utilizado para determinar a capacidade que o motor possui em admitir a massa de ar atmosférica é denominado de rendimento volumétrico (η_v), conforme a equação 3. A eficiência volumétrica é o caudal mássico de ar na conduta de admissão, dividida pela taxa que o volume de ar é movimentado pelo pistão, (Heywood, 1988).

$$\eta_v = \frac{2 m_i}{p_i V_d N} \quad (4)$$

Onde:

V_d - Volume deslocado pelo pistão entre o PMI e PMS (m^3)

N - Velocidade de rotação do motor (rot/s)

p_i - Massa específica do ar de admissão (kg/m^3)

m_i - Caudal mássico da admissão (kg/s)

A potência do motor depende principalmente da quantidade de ar admitida. Quanto maior o volume de ar introduzido, maior será a quantidade de combustível que poderá queimar, e em consequência maior será a energia e potência fornecidas.

Para calcular o rendimento volumétrico, é necessário definir a densidade de admissão da mistura próxima da válvula de admissão. O rendimento volumétrico baseada neste método é designada de rendimento volumétrico global, (Heywood, 2008).

As variáveis que influenciam o rendimento volumétrico são:

- i. Os gases residuais presentes no cilindro depois do escape contribuem para diminuir a massa específica da mistura;
- ii. A geometria do sistema de admissão e escape;
- iii. Relação de compressão;
- iv. Rotação do motor;
- v. Tempos de abertura e fecho das válvulas.

14.2. Rotação e Velocidade Angular

A rotação do motor N (rot/s) é definida sendo a velocidade de rotação do eixo da cambota em rotações por segundo. É expressa por:

$$N = \frac{\text{rotações}}{\text{segundo}} \quad [Hz] \quad (5)$$

Este valor é medido diretamente no eixo do dinamómetro por métodos mecânicos ou eletrónicos.

A frequência angular do motor w (rad/s) é uma forma de expressar a rotação do motor.

$$w = 2 \pi N \quad (6)$$

Também é possível representar a relação entre a velocidade angular w em rad/s e a variação do ângulo do eixo da cambota θ em graus através da equação:

$$w = \frac{\pi}{180} \frac{d\theta}{dt} \quad (7)$$

14.3. Trabalho por Ciclo

A combustão promove um aumento de pressão e temperatura dentro do cilindro, causando uma expansão dos gases. Esta pressão desenvolvida no cilindro juntamente com o volume correspondente podem ser expressos no diagrama (P,V), que é usado para calcular o trabalho transferido dos gases para o êmbolo. No diagrama (P,V), pode-se calcular o trabalho expresso pela seguinte equação, (Heywood, 1988):

$$W_c = \oint p dV \quad (8)$$

Onde:

W_c - Trabalho (J)

p - Pressão no interior do cilindro (Pa)

dV - Variação do volume do cilindro (m^3)

Analisando a figura 34 o trabalho por ciclo pode ser classificado como:

- **Trabalho bruto por ciclo** - definido pelo trabalho transferido para o êmbolo pelos gases nos cursos de compressão e expansão, representado por (área A + área C);
- **Trabalho líquido por ciclo** - definido pelo trabalho que é considerado no ciclo completo num motor de 4 tempos, que por sua vez é representado por (área A - área B)

Já a (área B + área C) representa o trabalho gasto durante a fase de admissão e escape.

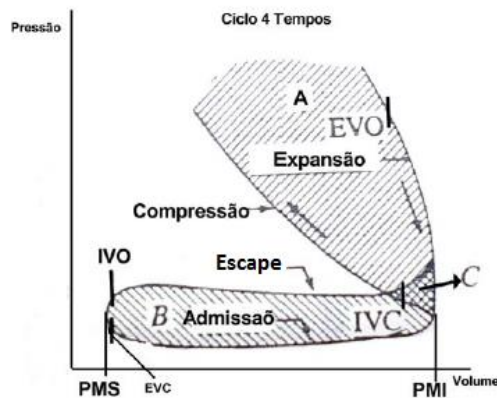


Figura 34 - Diagrama p-V de um ciclo de 4 tempos, (Richard Stones, 1999).

14.4. Binário

Binário ou momento torsor T (Nm), é uma medida com o objetivo de avaliar a capacidade do motor de produzir trabalho, ou seja, é o potencial que a cambota possui em fazer girar uma massa em torno de si mesma. Esse momento gerado pelo motor na saída do eixo da cambota é o binário efetivo desenvolvido pelo motor, (Heywood, 1998).

$$T = F b \quad (9)$$

Onde:

F - Medida de reação, que representa a carga no motor (N)

b - Distância do centro do eixo do dinamómetro até ao ponto de medição da força (m).

14.5. Potência

O binário como já dito anteriormente é a capacidade do motor de realizar trabalho, enquanto que a potência é a medição da quantidade de trabalho que o motor realiza num certo período de tempo.

A potência desenvolvida no interior do cilindro não é transmitida integralmente ao eixo da cambota, porque uma parte desta é absorvida pela resistência passiva.

Segundo Giacosa, 1970, existem três tipos de potência, a potência indicada, a potência absorvida pelo atrito (resistência passiva) e a potência no eixo da cambota.

A primeira pode ser calculada através da área obtida no diagrama (P,V) que representa o trabalho realizado pelos gases no interior do cilindro durante um ciclo. Já a segunda, resistência passiva, pode ser calculada utilizando um dinamómetro, que possibilita calcular o trabalho realizado pelo eixo da cambota na saída do motor.

A potência com maior interesse prático é a potência no eixo da cambota.

Segue-se a equação utilizada para o cálculo da potência no caso prático.

$$Potência = 2 \cdot \pi \cdot Binário \cdot \left(\frac{rpm}{60}\right) \quad (10)$$

14.6. Pressão Média Efetiva

A pressão média efetiva é um parâmetro importante para a medição do desempenho do motor, e também para a comparação entre motores de diferentes cilindradas, pois esta apresenta uma pequena variação em relação ao tamanho do motor. É obtida pela razão do trabalho por ciclo pelo volume movimentado no cilindro, ou seja, é a potência produzida pelo motor em função do seu tamanho, (Heywood, 1988).

14.7. Consumo Específico de Combustível

Nos motores de combustão interna, o parâmetro mais utilizado para determinar o consumo específico de combustível é a massa de combustível por unidade de potência, representando a eficiência com que o motor está convertendo a energia do combustível em trabalho mecânico, ou seja, é a taxa de consumo de combustível pelo motor, dividido pela potência efetiva, (Heywood, 1988). O consumo de combustível é expresso em g/kW.h.

$$SFC = \frac{mf}{P} \cdot 3600 \quad (11)$$

Onde:

mf - é o caudal de combustível;

P - Potência.

14.8. Eficiência de Conversão - η_f

Nos processos reais, a temperatura adiabática da chama não é alcançada, pois a combustão não é absolutamente completa, nem mesmo na zona estequiométrica da mistura. A eficiência da combustão é definida, portanto, sendo a relação entre a potência efetiva e a energia contida no combustível para produzir essa potência.

As perdas acontecem devido à troca de calor com o meio, à turbulência na câmara de combustão, à vaporização do combustível, etc.

Capítulo 4

Componente Experimental

O objetivo é a UCE ser capaz de gerir o sistema de injeção e ignição eletrónica quando em funcionamento, através da leitura dos diversos sensores acoplados ao motor, a fim de promover o correto funcionamento do veículo, sem perda de potência ou qualquer dano ao motor. Os valores destes sensores vão ser utilizados como entrada do sistema para determinar a quantidade correta de combustível a ser injetado.

1. Especificações do Motor

O motor escolhido para a realização deste trabalho, como já dito anteriormente foi o Honda GX120 de 4 cv, cujas especificações técnicas de origem são apresentadas na tabela seguinte:

| | |
|---|-------------------------------|
| Características | 4 Tempos, OHV, monocilíndrico |
| Potência máxima/rotação (CV/rpm) | 4,0 / 3600 |
| Potência líquida/rotação (CV/rpm) | 3,5 / 3600 |
| Cilindrada (cm³) | 118 |
| Diâmetro x curso (milímetros) | 60 x 42 |
| Binário máximo eixo PTO (Kgf.m/rpm) | 0,75 / 2500 |
| Binário líquido eixo PTO (Kgf.m/rpm) | 0,74 / 2500 |
| Taxa de compressão | 8,5:1 |
| Sistema de partida | Manual (retrátil) |
| Sistema de ignição | Magneto transistorizado |
| Combustível recomendado | Gasolina comum |
| Capacidade do tanque de combustível (litros) | 2,5 |
| Sistema de arrefecimento | Ar forçado |
| Sistema de lubrificação | Por salpico |
| Capacidade de óleo do cárter (litros) | 0,6 |
| Alerta de óleo | Não |
| Dimensões C x L x A (milímetros) | 305 x 341 x 318 |
| Peso seco (quilogramas) | 13,2 |
| Ponta de eixo | Paralela 3/4" |
| Embreagem/Redução | Não |

Figura 35 - Especificações técnicas do motor Honda GX 120, (Honda Motor Co. Lda).

Segundo dados do fabricante, Honda Motor Co. Lda, o motor referido apresenta como características, grande durabilidade, resistência, elevada eficiência e economia de combustível.



Figura 36 - Motor Honda GX 120, (Honda Motor Co. Lda).

De seguida estão representados dois gráficos, onde numa (Figura 37) se ilustra as curvas de potência e na outra (Figura 38) as de binário, respetivamente, segundo o fabricante.

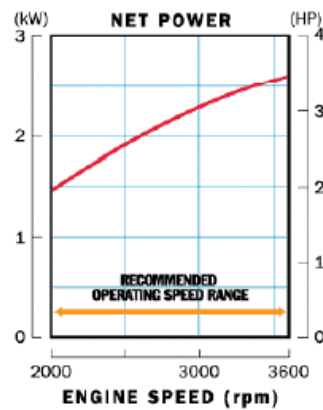


Figura 37 - Curva de potência do motor Honda GX 120, (Honda Motor Co. Lda).

Onde podemos constatar que a potência máxima deste motor é atingida às 3600 rpm com o valor de 4 Cv.

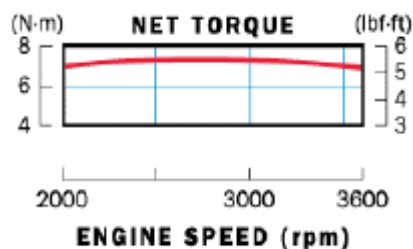


Figura 38 - Binário máximo do motor Honda GX 120, (Honda Motor Co. Lda).

Analisando o gráfico, deduz-se que o binário máximo deste motor é atingido por volta das 2500 rpm com o valor de 7,4 N.m, aproximadamente.

2. Ensaios

Para a realização dos ensaios nos motores de combustão interna, deve-se utilizar uma bancada de testes apropriada, composta basicamente por um conjunto de medição e pelo dinamómetro. A finalidade da execução do ensaio é obter resultados da velocidade de rotação, do consumo de combustível, da temperatura de funcionamento, pressões de admissão, entre outros, relacionando estes com a carga aplicada.

Através de uma metodologia devidamente definida, o objetivo é com os dados fornecidos, e para várias amostras, comparar, analisar e deduzir quais as condições, no caso prático, a mistura ar-combustível que proporciona um melhor desempenho, de modo a este ter um melhor desempenho com menor consumo e também com menor emissões de poluentes.

Os sistemas de comando dos motores visam um controlo preciso da relação ar/combustível admitida pelo motor e pelo sistema de ignição, permitindo que as faíscas elétricas no momento e potência adequados sejam descarregadas pela vela de ignição na mistura comprimida pelos pistões. (Câmara, 2006).

2.1. Condições de ensaio

O ensaio para analisar a potência efetiva, deve consistir num ensaio com o acelerador posicionado de forma constante, para as diferentes RPM com o dinamómetro a exercer uma carga constante.

Os dados do desempenho do motor devem ser obtidos em condições estabilizadas em cada operação, com os dados da mistura a ser recebidos de forma adequada.

É de realçar que as recomendações do fabricante devem ser obedecidas, isto em relação às configurações, bem como condições de arranque e aquecimento do motor. As condições do ensaio, tal como a temperatura do ar de admissão, devem ser selecionadas o mais próximo das condições padrão de referência, para desta forma minimizar o fator de correção.

É importante frisar que qualquer dado retirado para análise do desempenho, só pode ser considerado válido, quando retirado na condição em que o binário, a rotação e as temperaturas tenham sido estabilizadas, e mantidas constante pelo menos durante 30 segundos.

2.2. Verificações a serem efetuadas antes do arranque do motor

- Verificar existe algum objeto junto ao dinamómetro;
- Verificar a montagem da conexão/acoplamento do motor e o dinamómetro;
- Inspeccionar todos os tubos;

- Inspeccionar o sistema de controlo. Verificar se todos os sensores e transdutores estão corretamente instalados e os cabos interligados;
- Ligar a corrente de alimentação do painel de controlo e verificar as leituras dos indicadores;
- Verificar o sistema de calibração procedendo às leituras e observar se existem erros;
- Verificar o correto funcionamento da função de Stop do motor.

2.3. Procedimentos de operação

- Iniciar o arranque do motor e deixar aquecer durante alguns minutos a baixa rotação (relenti);
- Observar o comportamento do motor e do dinamómetro;
- Acelerar algumas vezes o motor. Gradualmente deve exercer-se alguma carga no dinamómetro para que o motor não trabalhe sem carga;
- Após a estabilização da temperatura do óleo lubrificante e pressão, conforme recomendado pelo fabricante do funcionamento ótimo do motor, continuar o processo, elevando a rotação do motor e aplicando as cargas previamente definidas;
- Para a maioria dos motores, a temperatura normal do óleo lubrificante não deve ultrapassar os 110°C. Temperaturas elevadas são indícios de problemas o que origina mau funcionamento ou mesmo paragem por avaria do motor;
- Após estarem completados os testes, deixar o motor a funcionar alguns minutos em marcha lenta até estabilizar.

3. Tipos de testes

Podemos dividir os testes em três grupos:

- Com velocidade constante;
- Com velocidade variável;

3.1. Teste com velocidade constante

Neste tipo de teste, o objetivo é manter a velocidade constante variando-se a carga e posteriormente observar as leituras nos instrumentos, decorrido aquando o funcionamento, e fazer a análise do desempenho.

Inicia-se o teste com o motor a funcionar sem carga, com o movimento do acelerador, regula-se para a velocidade desejada. O acelerador é mantido fixo nessa posição, e aplica-se a carga até ao valor desejado, sendo mantida a rotação constante. Efetua-se assim as leituras e anotações dos parâmetros que se pretende avaliar. O teste pode ser realizado por etapas, ou seja, elevando-se a carga de forma gradual, sendo a última o teste com a borboleta totalmente aberta, que é a que pretendemos analisar. Ao incrementar o valor de carga adequada, e

analisando os dados, é possível calcular e desenhar a curva gráfica do consumo específico do combustível.

3.2. Teste com velocidade variável

Com o objetivo de melhorar as curvas características do motor e as curvas do consumo, potência e binário do motor, neste tipo de teste, varia-se a velocidade de funcionamento pela aplicação de diferentes cargas no dinamômetro.

O teste em plena carga determina a potência máxima do motor em cada rotação de funcionamento. Para tal, após o aquecimento do motor e da estabilização das temperaturas, move-se o acelerador para a posição de máxima rotação e, gradualmente, ajusta-se à carga do dinamômetro e observa-se a queda de rotação e desta forma anota-se os valores da potência e de RPM correspondente.

É importante que sejam estabelecidos previamente os pontos de medição desejados, para cada tipo de motor, nos quais serão efetuadas as leituras e os valores anotados, para que desta forma se possa repetir o teste e os dados sejam coerentes. Os parâmetros como a temperatura dos gases de escape, pressão no coletor de admissão e temperaturas do líquido de arrefecimento e do óleo lubrificante são indicadores importantes de problemas que possam necessitar de ser corrigidos.

4. Arranque a Frio

Para o arranque a frio é necessário recorrer ao mapa de correção para esta condição de funcionamento, ou seja, vai haver um aumento percentual do tempo base de injeção de combustível em função da temperatura do motor durante os primeiros momentos do funcionamento do motor, até este ter atingido a temperatura ótima de funcionamento (ver Figura 39).

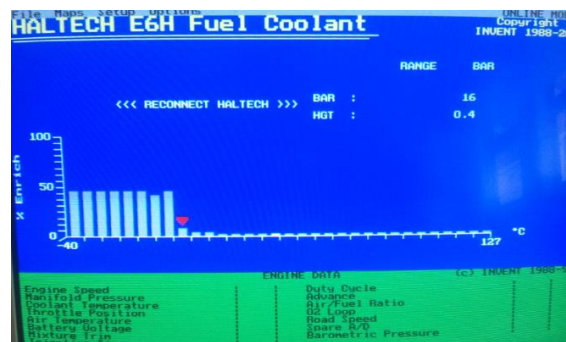


Figura 39 - Correção do arranque a frio do software utilizado no caso prático.

5. Mapa base de combustível

Os ensaios foram efetuados com base num mapa de combustível estequiométrico, na qual foi enriquecido na zona de binário máximo e também na zona de baixa rotação.

As duas variáveis para a realização dos ensaios foi a variação da posição da borboleta e a variação pré definida da percentagem de enriquecimento da mistura para as várias rpm.

Apesar de terem sido efetuados os ensaios para a posição da borboleta de 25%, 50%, 75% e 100%, uma vez que na prova em que está inserido o presente projeto, o motor irá funcionar na forma de pulsos (borboleta aberta ao máximo - paragem do motor), só serão apresentados os gráficos para a posição da borboleta a 100%, no entanto estará também representado o gráfico 3D na qual uma das variáveis é a posição da borboleta, e aí poderá observar-se o comportamento do funcionamento do motor para as várias posições da borboleta.

O mapa de combustível base está apresentado na Tabela 1:



| File | Maps | Setup | Options | | | | | | ONLINE | MODE |
|-----------|------|-------|---------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | |
| 0 Rpm | | 2.960 | 2.960 | 2.960 | 2.960 | 2.960 | 2.960 | 2.976 | 2.992 | |
| 1000 Rpm | | 2.256 | 2.256 | 2.256 | 2.304 | 2.304 | 2.304 | 2.320 | 2.320 | |
| 2000 Rpm | | 2.800 | 2.800 | 2.800 | 2.832 | 2.848 | 2.848 | 2.880 | 2.912 | |
| 3000 Rpm | | 2.512 | 2.512 | 2.512 | 2.528 | 2.528 | 2.544 | 2.576 | 2.592 | |
| 4000 Rpm | | 2.256 | 2.256 | 2.256 | 2.256 | 1.632 | 2.272 | 2.304 | 2.320 | |
| 5000 Rpm | | 2.128 | 2.128 | 2.896 | 2.112 | 2.112 | 2.112 | 2.144 | 2.160 | |
| 6000 Rpm | | 2.000 | 2.000 | 2.000 | 1.968 | 2.000 | 2.000 | 2.000 | 2.000 | |
| 7000 Rpm | | 1.120 | 1.184 | 1.248 | 1.312 | 1.376 | 1.440 | 1.504 | 1.568 | |
| 8000 Rpm | | 1.088 | 1.152 | 1.216 | 1.280 | 1.344 | 1.408 | 1.472 | 1.536 | |
| 9000 Rpm | | 1.104 | 1.168 | 1.232 | 1.296 | 1.360 | 1.424 | 1.488 | 1.552 | |
| 10000 Rpm | | 1.008 | 1.072 | 1.136 | 1.200 | 1.264 | 1.328 | 1.392 | 1.456 | |
| 11000 Rpm | | 1.008 | 2.000 | 2.400 | 2.800 | 3.200 | 3.600 | 4.000 | 4.400 | |
| 12000 Rpm | | 1.008 | 2.000 | 2.400 | 2.800 | 3.200 | 3.600 | 4.000 | 4.400 | |
| 13000 Rpm | | 1.008 | 2.000 | 2.400 | 2.800 | 3.200 | 3.600 | 4.000 | 4.400 | |
| 14000 Rpm | | 1.008 | 2.000 | 2.400 | 2.800 | 3.200 | 3.600 | 4.000 | 4.400 | |
| 15000 Rpm | | 1.008 | 2.000 | 2.400 | 2.800 | 3.200 | 3.600 | 4.000 | 4.400 | |

Tabela 1 - Mapa base de combustível utilizado.

6. Calibrações

6.1. Calibração do banco de ensaios

Para esta calibração usou-se um pêndulo, enrolado no disco de travão do banco de ensaios, com uma célula de carga onde se mediu a massa necessária do pêndulo para fazer movimentar o disco. Efetuou-se este processo para diferentes pressões hidráulicas exercidas na pinça de travagem.

No gráfico 1, está representado o binário em função da pressão hidráulica exercida na pinça de travagem, com finalidade de se obter os valores de binário para diferentes valores de pressão durante os ensaios, (Fábio Teixeira, 2014).

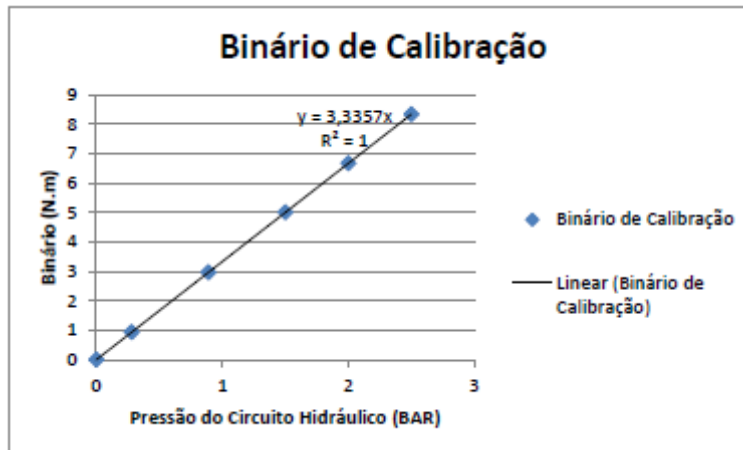


Gráfico 1 - Binário para calibração do banco de ensaios (Fábio Teixeira, 2014).

6.2. Calibração do injetor

Para esta calibração, construiu-se mapas com valores fixos e geraram-se pulsos de injeção para um recipiente controlado. Mediu-se a massa de combustível injetado à temperatura controlada de 25°C. Por fim, sabendo o tempo dos pulsos de injeção, o seu número e a massa injetada, obteve-se o seguinte gráfico, onde está representada a massa de gasolina injetada em função do tempo de injeção fixo, (Fábio Teixeira, 2014).

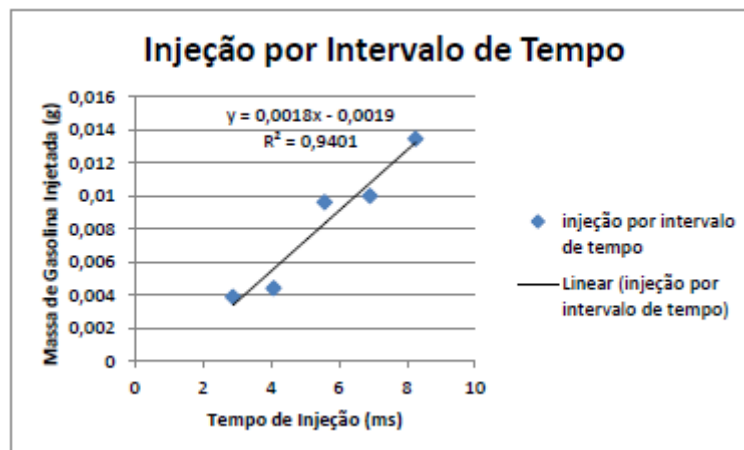


Gráfico 2- Injeção de calibração do injetor, (Fábio Teixeira, 2014).

7. Realização dos Ensaios Resultados e Discussões - Curvas de Desempenho

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos a partir das simulações efetuadas.

Os subcapítulos seguintes estão divididos pela variação do enriquecimento da mistura, na qual variou do normal para +10%; -10% e -20% sempre em relação ao mapa original.

Esta variação da mistura ar-combustível faz-se alterando o tempo de injeção do combustível, ou seja, o tempo que o injetor está aberto. Esta grandeza é expressa habitualmente em (ms) (ver Tabela2).

Esta alteração é feita através da ECU, e existem duas formas. Ou se altera em modo numérico, ou em modo percentual.

O modo numérico consiste em alterar cada parcela que varia consoante a rotação para cada variação de pressão atmosférica, existem 32 colunas para a variação desta.

| | | | | |
|-----------|-------|-------|-------|-------|
| 0 Rpm | 3.040 | 3.040 | 3.024 | 3.008 |
| 1000 Rpm | 2.560 | 2.576 | 2.576 | 2.576 |
| 2000 Rpm | 3.392 | 3.408 | 3.424 | 3.440 |
| 3000 Rpm | 2.944 | 2.960 | 2.960 | 2.960 |
| 4000 Rpm | 2.464 | 2.464 | 2.464 | 2.464 |
| 5000 Rpm | 2.160 | 2.144 | 2.144 | 2.128 |
| 6000 Rpm | 1.888 | 1.856 | 1.840 | 1.840 |
| 7000 Rpm | 2.672 | 2.736 | 2.800 | 2.864 |
| 8000 Rpm | 2.640 | 2.704 | 2.768 | 2.832 |
| 9000 Rpm | 2.656 | 2.720 | 2.784 | 2.848 |
| 10000 Rpm | 2.560 | 2.624 | 2.688 | 2.752 |
| 11000 Rpm | 2.736 | 2.848 | 2.960 | 3.072 |
| 12000 Rpm | 2.736 | 2.848 | 2.960 | 3.072 |
| 13000 Rpm | 2.736 | 2.848 | 2.960 | 3.072 |
| 14000 Rpm | 2.736 | 2.848 | 2.960 | 3.072 |
| 15000 Rpm | 2.736 | 2.848 | 2.960 | 3.072 |

Tabela 2- Modo numérico de alteração do tempo de injeção.

O modo percentual é relativamente mais simples, pois escolhe-se uma rotação que se queira otimizar, selecionam-se todas as colunas e introduz-se o valor percentual que se deseja variar, tanto pode ser de acréscimo ou não (ver Figura 40).

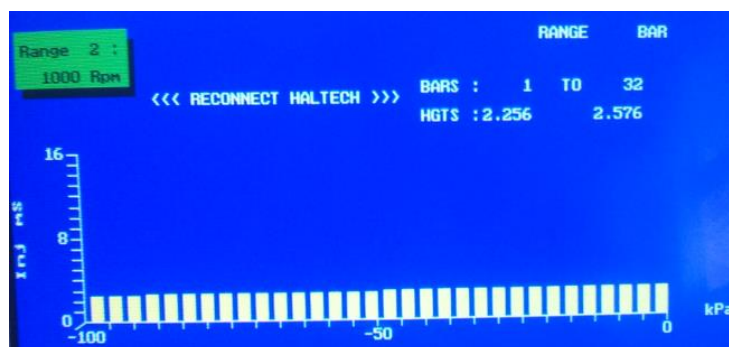
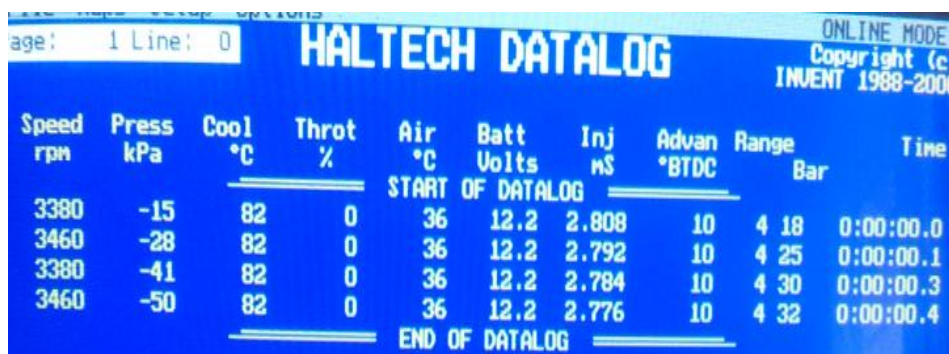


Figura 40- Modo percentual de alteração do tempo de injeção para cada rpm.

O sistema de gestão eletrónico Haltech, dispõe de uma função que permite ao utilizador em qualquer momento fazer uma leitura dos dados provenientes do motor.

Foi dessa forma que se baseou toda a componente prática relativamente a cálculos e análises.



The screenshot shows the HALTECH DATALOG interface with the following data:

| Speed rpm | Press kPa | Cool °C | Throt % | Air °C | Batt Volts | Inj nS | Advan °BTDC | Range Bar | Time |
|------------------|-----------|---------|---------|--------|------------|--------|-------------|-----------|-----------|
| START OF DATALOG | | | | | | | | | |
| 3380 | -15 | 82 | 0 | 36 | 12.2 | 2.808 | 10 | 4 18 | 0:00:00.0 |
| 3460 | -28 | 82 | 0 | 36 | 12.2 | 2.792 | 10 | 4 25 | 0:00:00.1 |
| 3380 | -41 | 82 | 0 | 36 | 12.2 | 2.784 | 10 | 4 30 | 0:00:00.3 |
| 3460 | -50 | 82 | 0 | 36 | 12.2 | 2.776 | 10 | 4 32 | 0:00:00.4 |
| END OF DATALOG | | | | | | | | | |

Figura 41- Datalog da ECU Haltech.

7.1. Ensaio 1 - Resultados com mapa original

No primeiro ensaio a ser efetuado o mapa base de combustível utilizado foi o mapa estequiométrico, com um ligeiro enriquecimento em altas rotações, e também na zona de marcha lenta.

De seguida estão apresentados os gráficos referentes ao binário, potência e consumo específico em função da rotação.

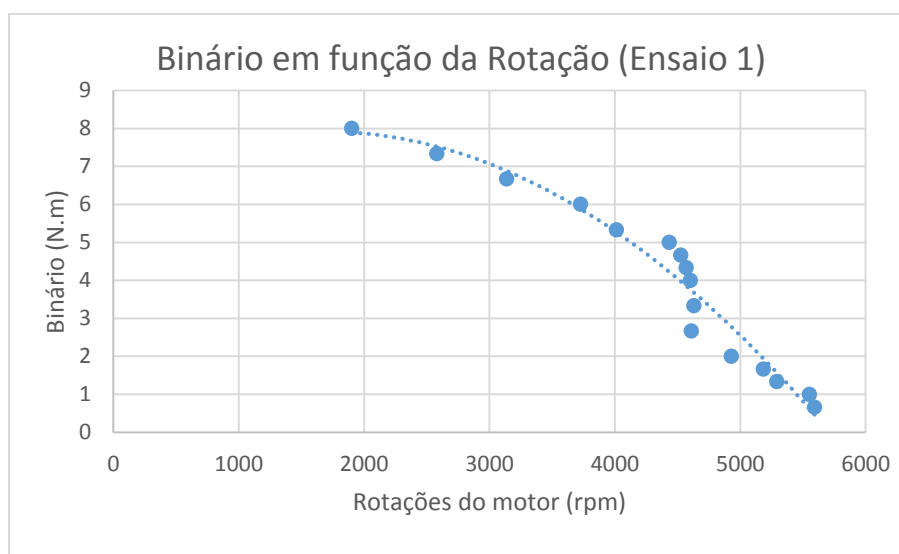


Gráfico 3- Binário em função da rotação (Ensaio 1).

No gráfico anterior está ilustrada a curva de binário gerado pelo motor. Analisando o gráfico pode-se constatar que o binário máximo tem o valor de 8,006 N.m para a rotação de 1901 rpm, e por sua vez, toma valores mínimos para a rotação de 5593 rpm com o valor de 0,667 N.m.

Segue-se o gráfico de potência em função da rotação.

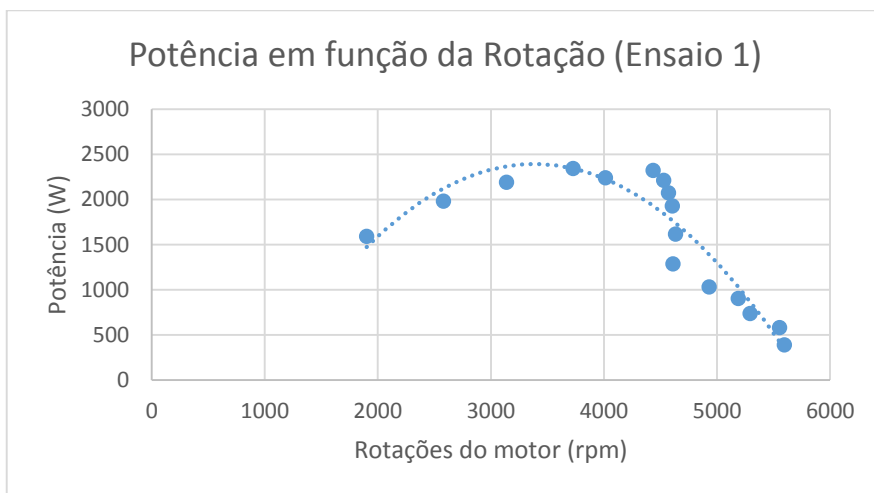


Gráfico 4- Potência em função da rotação (Ensaio 1).

Através do gráfico anterior constata-se que o valor de maior potência ocorre com a rotação de 4433 rpm e toma o valor de 2322,761 W, enquanto o menor valor é de 390,742 W para a rotação de 5593 rpm.

O gráfico seguinte é de grande importância, pois é com este que se consegue analisar o desempenho do motor, a equação matemática utilizada para o cálculo desta variável já foi anteriormente descrita na parte teórica do presente trabalho..

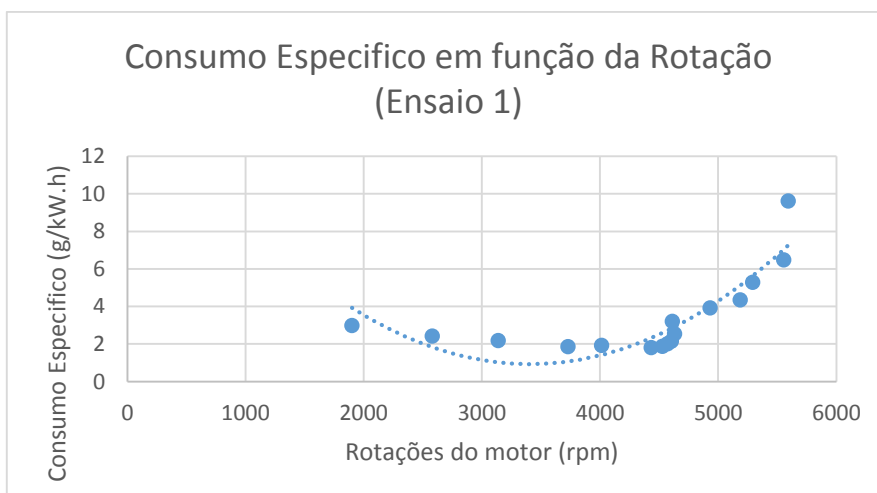


Gráfico 5- Consumo específico em função da rotação (Ensaio 1).

Analisando o gráfico constata-se que a melhor zona de funcionamento com esta mistura ar-combustível é para as rotações entre 2500 e 4000 rpm.

Segue-se a tabela que fundamentou o gráfico anterior.

| normal | |
|--------|----------------|
| (rpm) | SFC (g/kw . h) |
| 5593 | 9,615212265 |
| 5553 | 6,476716577 |
| 5292 | 5,280707454 |
| 5186 | 4,343716866 |
| 4930 | 3,913048104 |
| 4610 | 3,19663202 |
| 4631 | 2,540650039 |
| 4604 | 2,140171576 |
| 4570 | 2,004830427 |
| 4527 | 1,873236527 |
| 4433 | 1,793918584 |
| 4013 | 1,914507627 |
| 3727 | 1,854210882 |
| 3138 | 2,181034088 |
| 2580 | 2,409454748 |
| 1901 | 2,975294856 |

Tabela 3- rotação vs consumo específico (Ensaio 1).

O último gráfico apresentado é o tempo de injeção em função da abertura da borboleta e da rotação do motor. É de realçar que este gráfico apenas é ilustrado no ensaio com o mapa normal e com -10% de combustível, pois este segundo foi o de maior interesse.

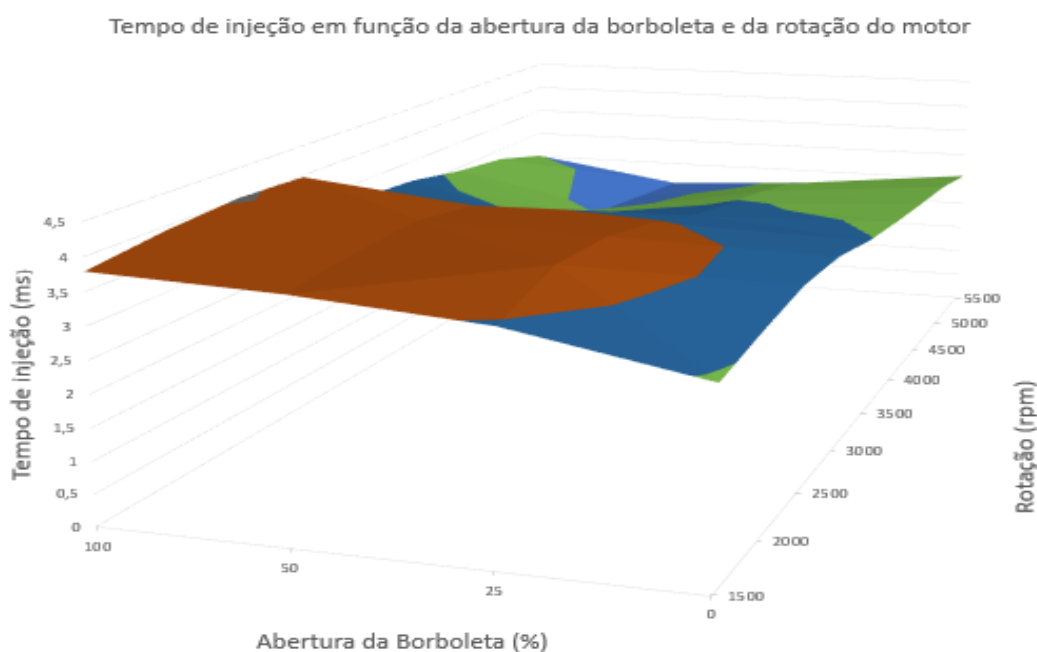


Gráfico 6- Tempo de injeção em função da abertura da borboleta e da rotação do motor (Ensaio 1).

Pode-se observar que o motor tem um funcionamento relativamente constante em todas as operações e regimes. Isto deve-se ao facto de ser um motor monocilíndrico 120cc e de 4 tempos. A injeção de combustível varia relativamente muito pouco.

7.2. Ensaio 2 - Resultados com mapa a -10%

O segundo ensaio foi o que aparentemente apresentou melhores resultados, para os objetivos pretendidos. Neste caso foi testado um mapa de combustível com a mistura “empobrecida” em -10%. O motor mostrou um comportamento bastante aceitável, mesmo com a redução de combustível na mistura.

Seguem-se os gráficos do binário, potência e consumo específico em função da rotação do motor.

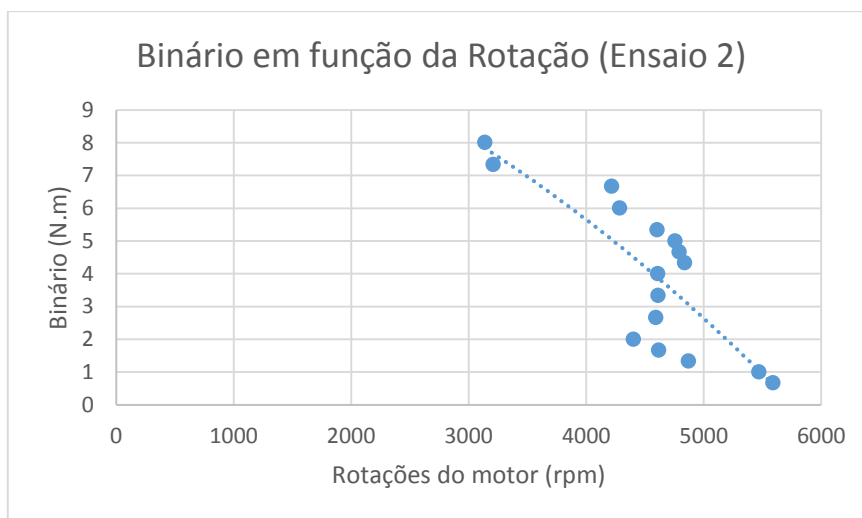


Gráfico 7- Binário em função da rotação (Ensaio 2).

Analisando o gráfico pode-se constatar que o binário máximo tem o valor de 8,005 N.m para a rotação de 3136 rpm, e por sua vez, toma valores mínimos para a rotação de 5588 rpm com o valor de 0,667 N.m.

Segue-se o gráfico da potência em função da rotação do motor.

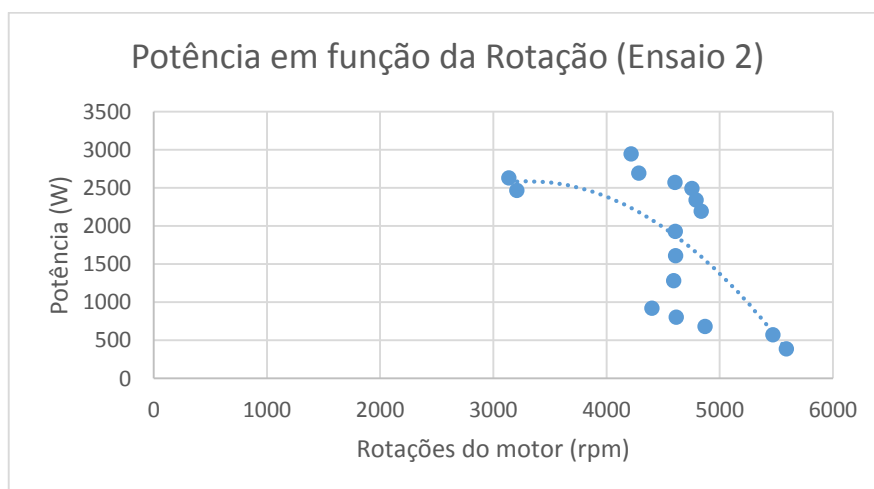


Gráfico 8- Potência em função da rotação (Ensaio 2).

Através do gráfico anterior constata-se que o valor de maior potência ocorre com a rotação de 4216 rpm e toma o valor de 2945,413 W, enquanto o menor valor é de 390,393 W para a rotação de 5588 rpm.

Segue-se o gráfico correspondente ao consumo específico em função da rotação.

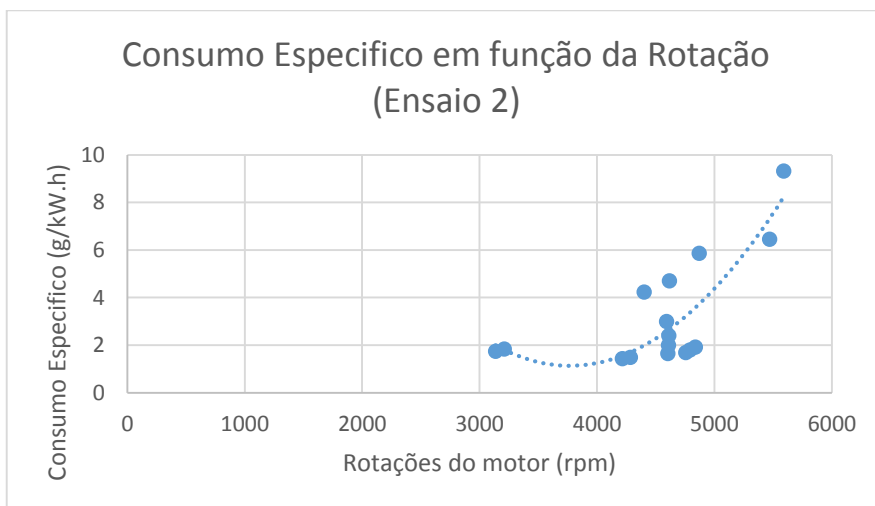


Gráfico 9 - Consumo específico em função da rotação (Ensaio 2).

Analisando o gráfico podemos constatar que em relação ao mapa original houve uma melhoria do consumo, como seria de esperar. Com o mapa original o consumo ótimo toma o valor de 1,794 g/kW.h para a rotação de 4433 rpm, enquanto que com a mistura empobrecida a 10% o consumo ótimo será de 1,442 g/kW.h para uma rotação de 4216.

Ou seja, para uma rotação semelhante está presente um decréscimo de 0,352g/kW.h

Segue-se a tabela que fundamentou o gráfico anterior.

| (-) 10% | |
|---------|----------------|
| (rpm) | SFC (g/kw . h) |
| 5588 | 9,325596997 |
| 5469 | 6,451103545 |
| 4870 | 5,859669465 |
| 4616 | 4,706539786 |
| 4400 | 4,239414522 |
| 4592 | 3,001197438 |
| 4610 | 2,404035004 |
| 4607 | 1,994283863 |
| 4836 | 1,921091781 |
| 4790 | 1,804816123 |
| 4754 | 1,694264022 |
| 4603 | 1,657550488 |
| 4283 | 1,492599305 |
| 4216 | 1,441867469 |
| 3208 | 1,83846261 |
| 3136 | 1,747833005 |

Tabela 4- rotação vs consumo específico (Ensaio 2).

Por fim está representado o gráfico 3D do tempo de injeção em função da abertura da borboleta e da rotação do motor.

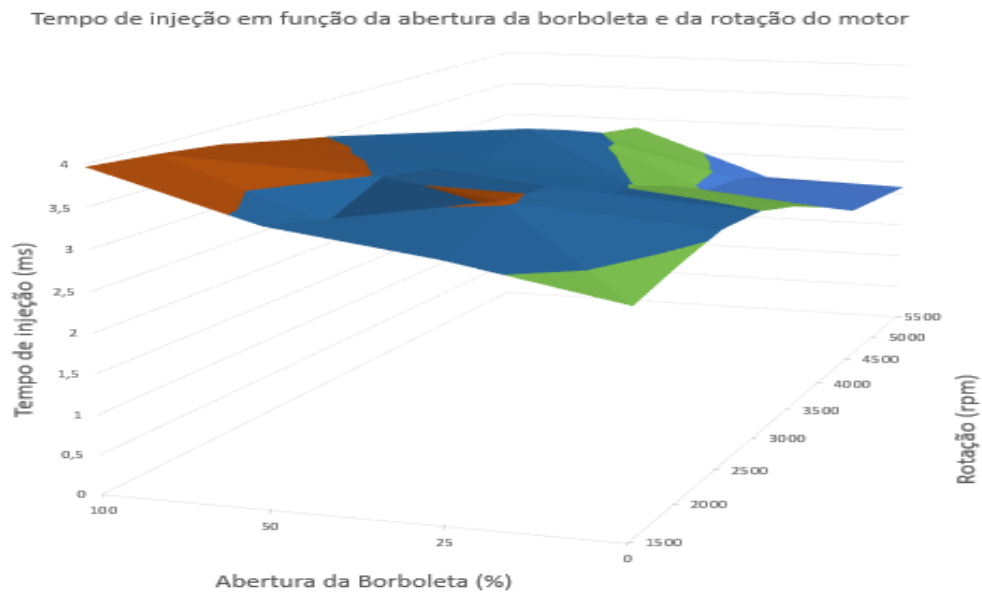


Gráfico 10- Tempo de injeção em função da abertura da borboleta e da rotação do motor (Ensaio 2).

Tal como seria de esperar, em comparação ao mapa 3D da mistura normal, este de igual forma varia muito pouco em todas as condições de funcionamento.

7.3. Ensaio 3 - Resultados com mapa a +10%

No terceiro ensaio, utilizou-se um mapa um pouco mais agressivo, com +10% de combustível em todas as rpm, este ensaio foi apenas realizado para poder ser possível haver uma noção de qual seria o comportamento de funcionamento do motor para uma mistura rica.

Seguem-se os gráficos de binário, potência e consumo específico em relação à rotação do motor.

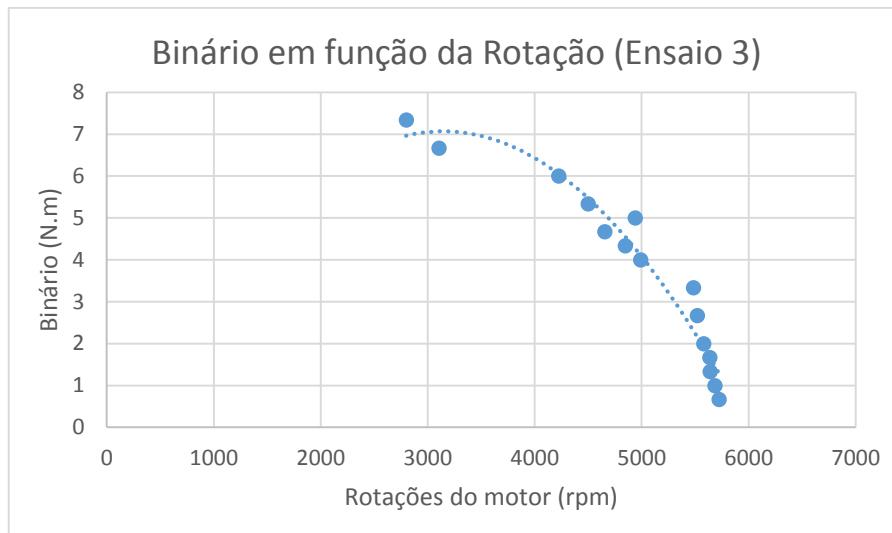


Gráfico 11- Binário em função da rotação (Ensaio 3).

Analisando o gráfico pode-se constatar que o binário máximo tem o valor de 7,339 N.m para a rotação de 2799 rpm, e por sua vez, toma valores mínimos para a rotação de 5723 rpm com o valor de 0,667 N.m.

Segue-se o gráfico que ilustra a potência em função da rotação.

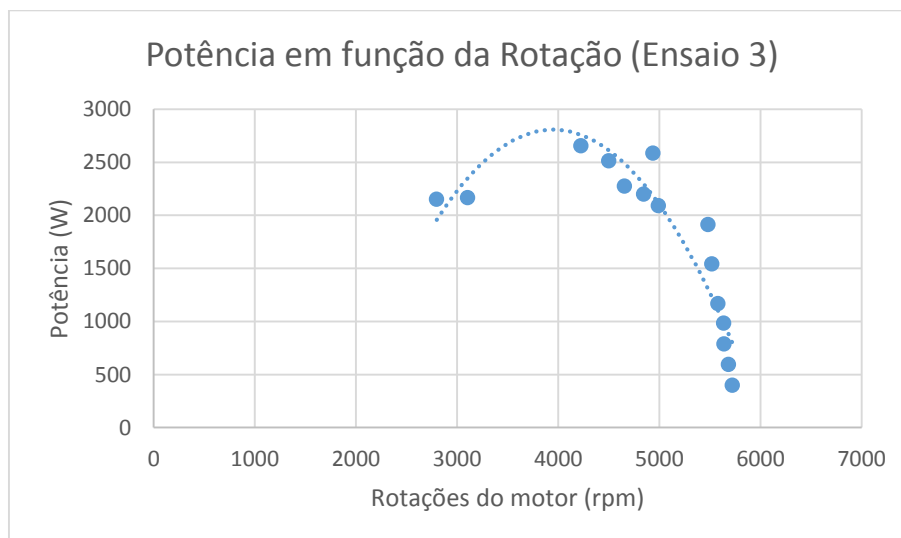


Gráfico 12- Potência em função da rotação (Ensaio 3).

Através do gráfico anterior constata-se que o valor de maior potência ocorre com a rotação de 4224 rpm e toma o valor de 2655,902 W, enquanto o menor valor é de 399,824 W para a rotação de 5723 rpm.

Por fim está ilustrado o gráfico relativamente ao consumo específico em função da rotação.

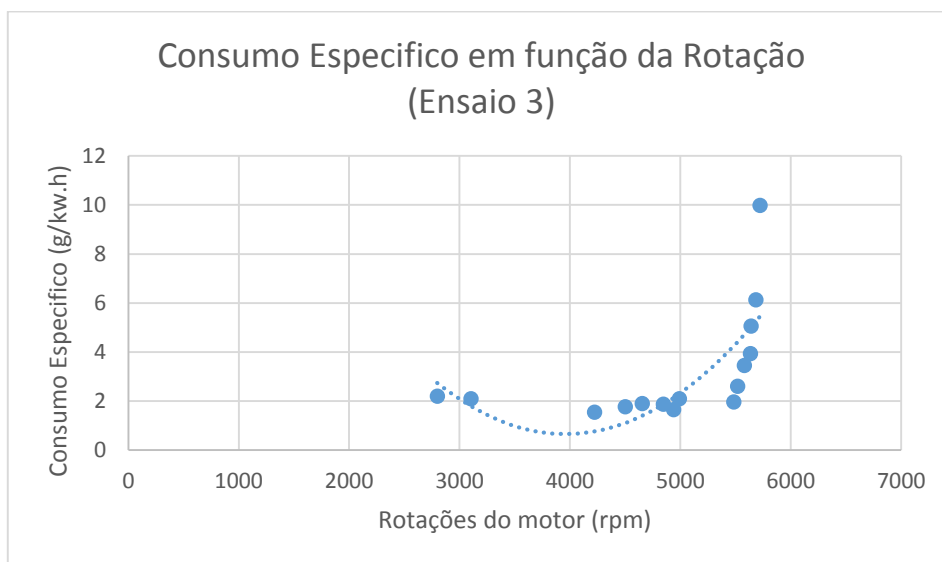


Gráfico 13 - Consumo específico em função da rotação (Ensaio 3).

Sendo este gráfico baseado numa mistura enriquecida, normal seria de esperar que tenha um consumo mais elevado. No entanto é interessante observar para a mesma rotação que o mapa normal, a mistura enriquecida tem o valor de 1,551 g/kW.h (sendo este mais baixo), no entanto para as restantes rotações esta mistura tem valores mais elevados.

7.4. Ensaio 4 - Resultados com mapa a -20%

No quarto e último ensaio, foi utilizado o mapa de combustível com -20%. Neste caso houve uma certa dificuldade em testar o motor no dinamómetro para os valores de pressão hidráulica mais elevados.

Seguem se os gráficos referentes a este ensaio.

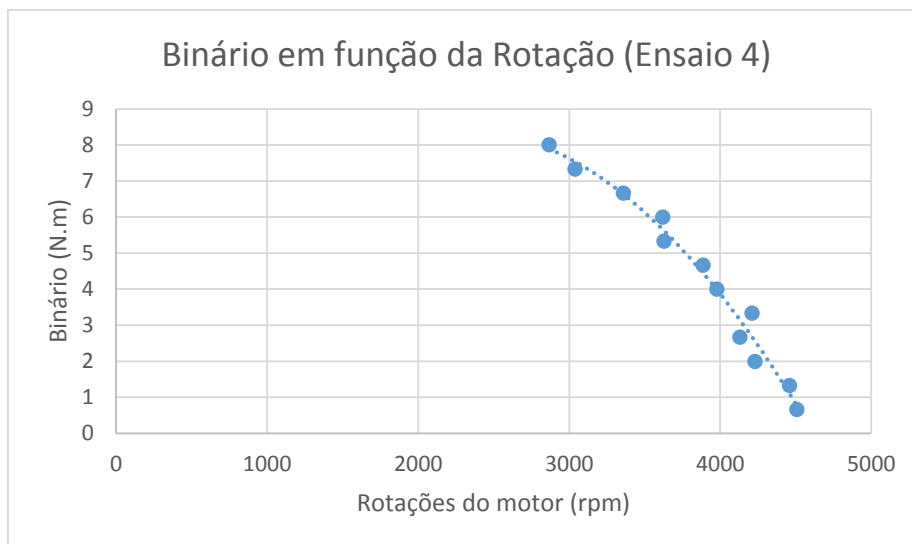


Gráfico 14 - Binário em função da rotação (Ensaio 4).

Analisando o gráfico pode-se constatar que o binário máximo tem o valor de 8,006 N.m para a rotação de 2867 rpm, e por sua vez, toma valores mínimos para a rotação de 4508 rpm com o valor de 0,667 N.m.

Segue-se o gráfico que representa a potência em função da rotação.

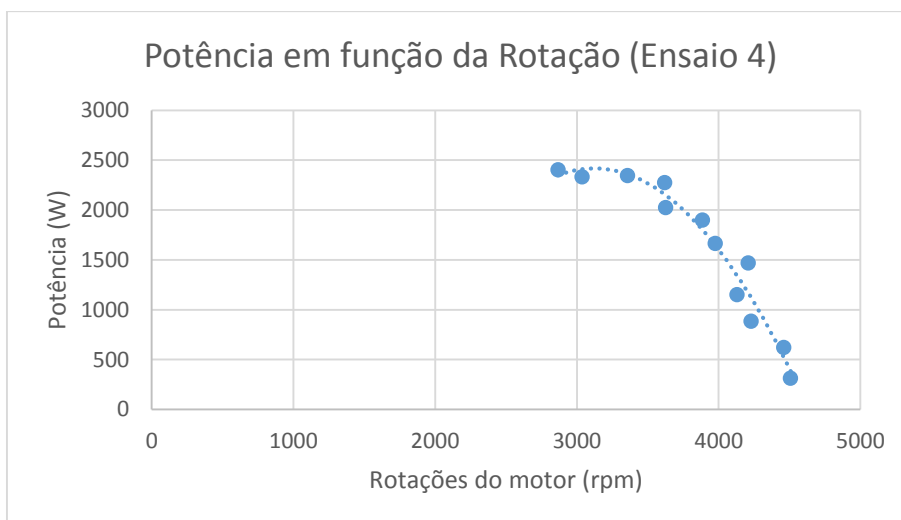


Gráfico 15 - Potência em função da rotação (Ensaio 4).

Através do gráfico anterior constata-se que o valor de maior potência ocorre com a rotação de 2867 rpm e toma o valor de 2403,558 W, enquanto o menor valor é de 314,941 W para a rotação de 4508 rpm.

Segue-se o gráfico do consumo específico.

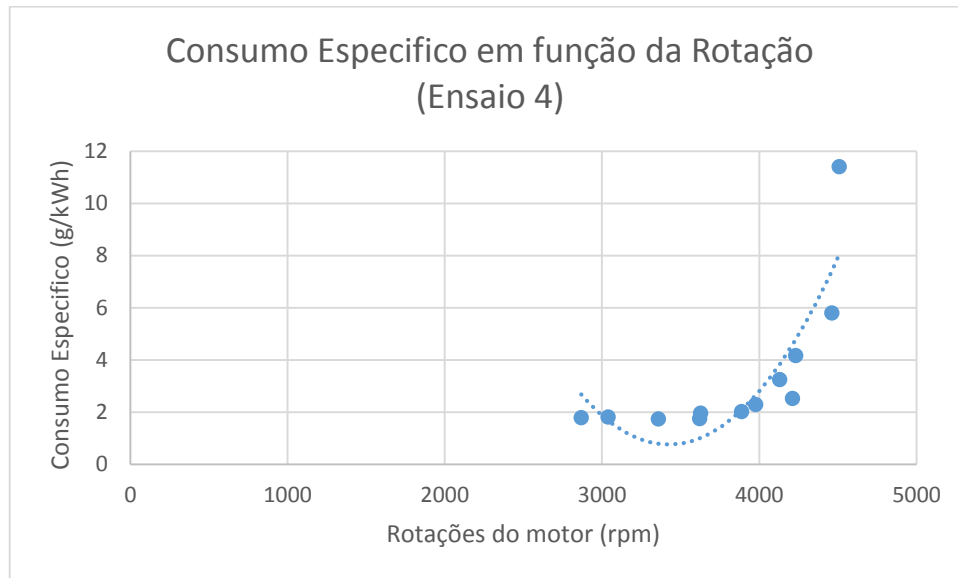


Gráfico 16 - Consumo específico em função da rotação (Ensaio 4).

Para a mistura empobrecida a -20%, o consumo consegue ser o mais otimizado em relação aos anteriores. O problema é que o motor a operacional com esta mistura, não aguenta tanta carga e como consequência não atinge rotações tão elevadas, aliás, nos ensaios realizados, houve uma certa dificuldade de manter o motor a funcionar de forma uniforme quando este estava sujeito a maiores valores do dinamómetro.

Capítulo 5

1. Conclusões

O presente trabalho permitiu a obtenção de dados referentes aos diversos fenómenos físicos e químicos presentes no motor escolhido, bem como observar a variação do funcionamento deste para várias condições. Desta forma, pode-se observar que as afirmações presentes na literatura base são pertinentes.

O motor utilizado ao ser submetido a vários ensaios, permitiu observar o seu comportamento mediante diversos tipos de operação. Ao longo do desenvolvimento do trabalho, houve uma noção por parte do autor, que as tecnologias inovadoras podem ser desenvolvidas para melhoria na qualidade do funcionamento das máquinas térmicas, proporcionando melhor rendimento e reduzindo as emissões de poluentes para o ambiente.

Conclui-se também que existem certas limitações na tecnologia utilizada.

Melhorias foram efetuadas no motor em questão, no intuito de obter melhores resultados, nomeadamente foi alterado o sistema de admissão, o que proporcionou um relenti mais estável, pois o sistema anterior tinha bastantes fugas.

Como conclusão em relação aos ensaios, conclui-se que a mistura mais estável e com melhores resultados foi a mistura com -10% de injeção, sendo este o mapa sugerido para a participação de uma eventual prova em que possa ser inserido o motor escolhido.

O objetivo traçado foi concluído com sucesso, pois comparando o consumo específico obtido em relação ao do projeto anterior, houve uma melhoria de 0,67 g/kW.h.

2. Estado de Arte

A nível do sistema de injeção, como deu para perceber ao longo da leitura do presente documento, tem havido uma imensa evolução no que diz respeito à tecnologia, um dos sistemas de última geração é o sistema ME-7. O sistema de injeção eletrónica ME-7 é um dos mais modernos, de última geração. Este sistema incorpora tecnologia de software que se baseia em informação do torque do motor. De uma forma simplificada no que diz respeito ao seu funcionamento, ele procura sempre a melhor curva de potência do motor, com o menor consumo de combustível. Este sistema possui um acelerador eletrónico, dispensando o uso por cabo. Esse dispositivo instalado no acelerador é um potenciómetro que gera um sinal elétrico, que aciona o corpo da borboleta do motor. A vantagem deste sistema é o sincronismo entre acelerador e borboleta imensamente preciso.

Atualmente em relação à centralina e software agregado, a Haltech tem duas famílias de produtos, serie Elite e serie Platinum, estas apresentam os mais avançados sistemas de

gerenciamento de controlo. Com mais funções, mapas mais flexíveis, e uma serie de recursos adicionais. O sistema de ultima geração da Haltech é a Elite 2500 ECU.

3. Estudos Futuros

Seguem-se duas sugestões para trabalhos futuros:

- Avanço de ignição;

Tal como provado com a fundamentação teórica, o avanço de ignição é um parâmetro muito importante. Ainda se tentou implementar o sistema de avanço eletrónico, mas sem sucesso. Isto deveu-se ao facto de problemas técnicos em relação à tecnologia usada. Sugere-se a aquisição de uma centralina mais recente, para a implementação num trabalho futuro.

- Utilização de outro tipo de combustíveis (etanol) ou GNV

Quando comparado com a gasolina, o etanol possui maior número de octanas, maiores limites de inflamabilidade, maior velocidade de chama e maior calor de vaporização. Estas propriedades permitem operar com maior razão de compressão, menor duração de combustão e operação em regimes mais pobres, o que leva a vantagens a nível da eficiência da conversão de energia sobre a gasolina nos motores de combustão interna.

4. Referências Bibliográficas

- Heywood J., 1988, “Internal Combustion Engine Fundamentals”, McGraw-Hill, USA, 930 p.
- Motor de Ciclo Otto. (acesso em 7 de Fevereiro de 2015).

http://www.castrol.com/liveassets/bp_internet/castrol/STAGING/local_assets/images/ask_the_expert/curso_desempenho001_br_375x588.jpg.

- VON GLEHN, F.R., Curso Injeção Eletrónica - Conceitos Teóricos e Aspectos Práticos, Goiânia - GO, Ciclo Engenharia, junho de 2001, 4ª edição - volume 1 de 5.
- Como Funciona - Injeção Eletrónica. (acesso em 14 de Dezembro de 2014).

<http://www.envenenado.com.br/howwork/injecao/injecao.html>

- Carvalho, T.C.O. Desenvolvimento de uma Central Eletrónica para Controlo de Motores de Combustão Interna. MG, UFMG, 2005.
- Benvenuti, L.; Di Benedetto, M. D. et al., “Individual cylinder characteristic estimation for a spark injection engine”. Automática, Itália, n.39, 1157-1169, 2003.

- Bosh, “Manual de Tecnologia Automóvel”, 25ª edição, 2005.
- Ganesan V. “Internal combustion engines”, 1996, Editora McGraw-Hill.
- Guibet, Jean-Claude “Fuels and Engines”, Technology Energy Environment. Ed. rev. Traduzido por Frank Carr, Institut Français du Pétrole Publications, Paris: Technip, 1999.
- Heisler, H. “Advanced engine technology”. USA: Hodder Headline Group, 1995.
- Lenz, Hans Peter. “Mixture Formation in Spark-Ignition Engine”. Wien: Springer-Verlag, 1990.
- Rassweiler, G. M.; Witheow L. “Motion picture of engine flames correlated with pressure cards, SAE paper 184204, 1938.
- Richard Stones, “Introduction to Internal Combustion Engines”, 1990.
- Taylor, C. “Análise dos motores de combustão interna”. Vol.1 e Vol.2, Edgard Blucher, 1988.
- Andrade, G. S. “Avaliação Experimental da Duração de Combustão para Diferentes Combustível num Motor Padrão Ciclo Otto ASTM-CFR”, UFRGS, 2007.
- Obert, E. F. “Motores de Combustão Interna”, Ed. Globo, 1971.
- Rech C., “Estudo Experimental da Relação Ar/Combustível para Máxima Potência num Motor de Combustão Interna”, UFRGS, 2002.
- Newton, K.; Steed, W.; Garret, T. K. “The Motor Vehicle”. Hartnolls Ltda, Great Britain, 880p, 1991.
- Barron, M. B.; Powers, W.F. (1996). The Role of Electronic Controls for Future Automotive Mechatronic Systems. IEEE Trans. on Mechatronics. v.1, n.1, p.80-88, Mar.
- Automotive Handbook Bosh.. Ed. SAE 6th Edição, 2004.
- Robert Bosh GmbH, Catálogo de componentes 2001-2002. Linha de Injeção e Ignição Eletrónica, Junho 2001.
- Denton, T. Automobile Electrical and Electronic System. Second Edition. Arnold, Londres, 2000.
- Milhor, C. E. Sistema de Desenvolvimento para Controlo Eletrónico dos motores de combustão interna do ciclo otto. EESC/USP, SP. 2002.
- Adler, U. Automotive Electric/Electronic Systems, 1st Edition Robert Bosch GmbH-Automotive Equipment Product Group. Stuttgart, 1988.