

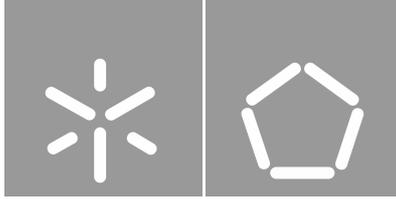


Ricardo Manuel Oliveira Resende

Desenvolvimento e programação
de um sistema de injeção e ignição
de um motor de combustão interna

Universidade do Minho
Escola de Engenharia





Ricardo Manuel Oliveira Resende

**Desenvolvimento e programação
de um sistema de injeção e ignição
de um motor de combustão interna**

Dissertação de Mestrado

Ciclo de Estudos Integrados Conducentes ao Grau de Mestre
em Engenharia Eletrónica Industrial e Computadores

Trabalho efetuado sob a orientação do
Professor Doutor João Aparício Fernandes
Professor Doutor Francisco Brito

DIREITOS DE AUTOR E CONDIÇÕES DE UTILIZAÇÃO DO TRABALHO POR TERCEIROS

Este é um trabalho académico que pode ser utilizado por terceiros desde que respeitadas as regras e boas práticas internacionalmente aceites, no que concerne aos direitos de autor e direitos conexos. Assim, o presente trabalho pode ser utilizado nos termos previstos na licença abaixo indicada. Caso o utilizador necessite de permissão para poder fazer um uso do trabalho em condições não previstas no licenciamento indicado, deverá contactar o autor, através do RepositóriUM da Universidade do Minho.

Licença concedida aos utilizadores deste trabalho



Atribuição

CC BY

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

AGRADECIMENTOS

Após a conclusão deste trabalho, agradeço a todos os que me apoiaram e me deram motivação para seguir em frente, tanto neste trabalho como ao longo destes 5 anos. Sendo assim, passo a agradecer:

- Aos meus pais;
- Engenheiro Tiago Costa;
- Professor Doutor João Aparício Fernandes;
- Professor Doutor Francisco Brito;
- Professor Doutor Jorge Martins;
- Família, amigos e colegas.

DECLARAÇÃO DE INTEGRIDADE

Declaro ter atuado com integridade na elaboração do presente trabalho académico e confirmo que não recorri à prática de plágio nem a qualquer forma de utilização indevida ou falsificação de informações ou resultados em nenhuma das etapas conducente à sua elaboração.

Mais declaro que conheço e que respeitei o Código de Conduta Ética da Universidade do Minho.

Desenvolvimento e Programação de um Sistema de Injeção e Ignição de um Motor de Combustão Interna

RESUMO

O desenvolvimento tecnológico dos motores de combustão interna tem sido crucial, permitindo um menor consumo de combustível, a diminuição na emissão de gases poluentes e uma melhor eficiência energética. Os sistemas de controlo eletrónico possibilitam uma maior flexibilidade para se controlar os sistemas de injeção de combustível, de ignição e de admissão, quando comparados aos sistemas mecânicos. Mesmo com sistemas de gestão eletrónica cada vez mais avançados, os motores continuam a apresentar uma eficiência relativamente baixa, contudo, várias tecnologias podem ainda ser estudadas e melhoradas de forma a contribuir para uma melhoria significativa na eficiência dos motores.

Dado o objetivo de futuramente se realizar testes com injeção de água, que é um dos métodos que podem ser usados para aumentar a eficiência dos motores, este trabalho visa a implementação de um sistema de gestão eletrónica no motor utilizado e de um sistema que permita a gestão da injeção de água. Para isso foram estudados e selecionados os sensores, os atuadores, o controlador e as modificações necessárias para a gestão do motor, assim como o injetor e controlador necessários para o sistema de injeção de água.

Com a gestão eletrónica do motor implementada é possível controlar tanto a dosagem de combustível como o avanço de ignição. O sistema de gestão da injeção de água implementado permite o controlo do início e da duração da injeção de água durante a realização de testes ao motor.

O motor utilizado já se encontrava mecanicamente acoplado a um gerador síncrono, que foi utilizado como freio e o ajuste do binário de frenagem aplicada no eixo do motor foi feito através do controlo da potência na carga ligada ao gerador.

Tanto para o acelerador como para o freio foi implementado um controlo "manual", que é gerido pelo utilizador, e um controlo "automático", que controla respetivamente o acelerador ou a potência na carga de forma a manter a rotação do motor constante.

PALAVRAS-CHAVE

Motor de combustão interna, sistema de injeção eletrónica, sistema de ignição eletrónica, injeção de água, freio elétrico

Development and Programming of an Injection and Ignition System of an Internal Combustion Engine

ABSTRACT

The technological development of internal combustion engines has been crucial, allowing for lower fuel consumption, lower emissions of pollutants and better energy efficiency. Electronic control systems allow greater flexibility to control fuel injection, ignition and intake systems when compared to mechanical systems. Even with more advanced electronic management systems, internal combustion engines continue to show relatively low efficiency, yet several technologies can still be studied and improved in order to contribute to a significant improvement in engine efficiency.

Given the objective of future water injection tests, which is one of the methods that can be used to increase the efficiency of the motors, this work aims at the implementation of an electronic management system in the engine used and a system that allows the management of water injection. For this, the sensors, actuators, the controller and the modifications necessary for the management of the motor, as well as the injector and controller required for the water injection system, were studied and selected.

With the electronic engine management implemented it is possible to control both the fuel dosage and the ignition advance. The implemented water injection management system allows control of the start and duration of water injection during engine testing.

The engine was already mechanically coupled to a synchronous generator, which was used as a brake and the adjustment of the braking torque applied to the motor shaft was made by controlling the power on the load connected to the generator.

For the control of both the throttle and the brake a "manual" control has been implemented, which is managed by the user, and an "automatic" control, which controls the throttle or the power in the load, respectively, in order to maintain a constant engine speed.

KEYWORDS

Internal combustion engine, electronic injection system, electronic ignition system, water injection, electric brake

ÍNDICE

Direitos de Autor e Condições de Utilização do Trabalho por Terceiros	ii
Agradecimentos.....	iii
Declaração de Integridade	iv
Resumo.....	v
Abstract.....	vi
Índice de Figuras	x
Índice de Tabelas	xiv
Lista de Abreviaturas, Siglas e Acrónimos	xv
1. Introdução	1
1.1 Motivação	1
1.2 Objetivos.....	2
2. Estado da arte	4
2.1 Motores de Combustão Interna.....	4
2.2 Sistemas de Alimentação.....	6
2.2.1 Carburadores	6
2.2.2 Injeção Eletrónica	6
2.3 Sistemas de Ignição	11
2.3.1 Sistema de Ignição Convencional.....	11
2.3.2 Sistema de Ignição Eletrónica	14
2.4 Controlo Eletrónico dos MCI	16
2.5 Injeção de Água.....	17
2.6 Freios Dinamométricos.....	18
2.6.1 Freio de Fricção (Freio de <i>Prony</i>).....	19
2.6.2 Freio de Correntes de <i>Foucault</i> (<i>eddy currents</i>)	20
2.6.3 Freio de Histerese.....	21
2.6.4 Freio Hidráulico	21
2.6.5 Freio Elétrico AC ou DC	21
3. Gestão Eletrónica do Motor e Gestão da Injeção de Água	26
3.1 Sistema de Alimentação e Sistema de Ignição do Motor Utilizado	26

3.2	Controlador do Motor	29
3.3	Sensores, Atuadores e Programação do Controlador do Motor	31
3.3.1	Sensor de Posição do Acelerador (TPS)	31
3.3.2	Bomba e Filtro de Combustível	32
3.3.3	Sonda Lambda	35
3.3.4	Sensor de Rotação da Cambota	38
3.3.5	Sensor de Posição da Árvore de Cames	41
3.3.6	Bobina de Ignição	46
3.3.7	Injetor de Gasolina	50
3.4	Injeção de Água	53
3.4.1	Injetor de Água	53
3.4.2	Controlador do Injetor de Água	55
3.5	Instalação Elétrica	59
3.6	Configuração do Início e Duração das Injeções de Combustível e Água	61
3.7	Configuração dos Avanços de Ignição	64
4.	Freio - Gerador Síncrono Monofásico sem Escovas	67
5.	Métodos Utilizados no Controle de Rotação do Motor	69
5.1	Controle do acelerador	69
5.1.1	Atuador da Borboleta	69
5.1.2	Sensor Utilizado no Controle da Posição do Acelerador	71
5.1.3	Sensor de Rotação	71
5.1.4	Controlador	72
5.1.5	Esquema das Ligações para o Controle do Acelerador	73
5.1.6	Implementação	74
5.2	Controle da Potência na Carga Ligada ao Gerador	76
5.2.1	Esquema de Ligações para Controle da Potência na Carga	80
5.2.2	Implementação	81
6.	Interferências Eletromagnéticas (EMI)	83
6.1	Técnicas de Supressão de Interferências Eletromagnéticas	83
6.2	Técnicas Utilizadas neste Projeto	84

7.	Resultados Experimentais	87
7.1	Medição Ângulos Reais da Ocorrência de Injeção e de Ignição	87
7.2	Potência na Carga Ligada ao Gerador em Função da Posição do Acelerador.....	92
8.	Conclusões e Sugestões de Trabalhos Futuros	94
8.1	Conclusões	94
8.2	Trabalhos Futuros	94
	Referências Bibliográficas	96
	Anexo I – Informações Técnicas do Injetor HDEV 5.2	99
	Anexo II – Documentação GDI Driver	102
	Apêndice I – Código C de Programação do Arduino para Controlo do Acelerador e para Controlo da Potência na Carga	103

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-Esquema de um motor 4 tempos de ciclo Otto	5
Figura 2- Injetores (assinalados pelas setas), de um Honda Civic 1.6, fixos na flauta e no coletor de admissão	7
Figura 3-Bomba de combustível	8
Figura 4-Injetor	9
Figura 5 - Resistência do termistor do tipo NTC em função da temperatura do ar.....	10
Figura 6-Sonda lambda.....	10
Figura 7 - Sistema de ignição convencional [11].....	12
Figura 8-Vela de ignição.....	13
Figura 9 - Esquemático da estrutura básica de um freio dinamométrico.....	19
Figura 10- Freio de correntes de <i>Foucault</i> existente no LaMoTA.....	20
Figura 11-Rotor de pólos lisos (esquerda) e rotor de pólos salientes (direita)	23
Figura 12 – Conjunto Motor-Gerador (motor à direita e gerador à esquerda): A- Sistema de alimentação do motor; B- Escape.	26
Figura 13 – Conjunto de corpo de borboleta e coletor de admissão utilizado no trabalho	27
Figura 14 - Sistema de ignição utilizado pelo motor	27
Figura 15 - Motor de combustão interna (vista de cima sem culassa): A- Válvula de admissão; B- Válvula de escape; C- Pistão.	28
Figura 16 - Motor de combustão interna (vista lateral): A- Condução de admissão; B-Condução de escape	28
Figura 17- Controlador EMU, da ECUMASTER	29
Figura 18- Numeração dos pinos dos conectores da EMU	30
Figura 19- Ligação do TPS	31
Figura 20- Corpo de borboleta: A- Borboleta; B-TPS.....	31
Figura 21- Janela de calibração do sensor TPS.....	32
Figura 22- Bomba de combustível da RIDEX (Número do artigo:458F0007).....	32
Figura 23- Filtro de combustível	33
Figura 24-Ligação das mangueiras ao depósito	33
Figura 25-Ligações das tubagens (bomba e filtro de combustível): A-Saída do filtro; B- Retorno; C- Entrada do filtro; D- Entrada da bomba; E- Saída da bomba.....	34

Figura 26- Ligação da alimentação de combustível ao injetor.....	34
Figura 27- Circuito de combustível	34
Figura 28- Ligação elétrica da bomba de combustível.....	35
Figura 29- Parâmetros de controlo do relé da bomba de combustível	35
Figura 30 - Instalação da sonda lambda.....	36
Figura 31 - Esquema de ligações da sonda lambda (LSU 4.2)	37
Figura 32 - Conector da sonda lambda.....	37
Figura 33 - Pinout conector LSU 4.2	37
Figura 34 - Configurações da sonda lambda utilizada	38
Figura 35 - Sensor de rotação da cambota (do tipo indutivo) e roda dentada.....	39
Figura 36 – Pinos de ligação do sensor indutivo.....	39
Figura 37 - Ligação do sensor indutivo à EMU	40
Figura 38 – Roda dentada 60-2	40
Figura 39 - Configuração do " <i>Primary trigger</i> "	41
Figura 40 – Sensor de efeito Hall (usado como sensor de posição da árvore de cames).....	42
Figura 41- Ligação do sensor de posição da árvore de cames à EMU	42
Figura 42 - Cambota (A) e árvore de cames (B).....	43
Figura 43 - Localização do sensor (A) e do íman (B).....	43
Figura 44 – Técnica usada para medição do ângulo de rotação da cambota em graus	44
Figura 45 - Configurações do " <i>Secondary trigger</i> ".....	45
Figura 46 - Seleção incorreta (esquerda) e seleção correta (direita) dos " <i>Trigger edges</i> " (" <i>Primary trigger</i> " (vermelho) e " <i>Secondary trigger</i> " (verde))	46
Figura 47 - Bobina de ignição STARK (Referência: SKCO-0070033).....	46
Figura 48 - Ligação da bobina de ignição à EMU	47
Figura 49 - Tensão aos terminais da resistência série: lado esquerdo- Bobina P35 (em cima- opção 5 A, 25,4 mJ; em baixo- opção 7 A, 38,4 mJ); lado direito- Bobina P65 (em cima- opção 5 A, 37,8 mJ; em baixo opção- 7 A, 69,8 mJ).....	48
Figura 50 - Seleção do tipo de bobina de ignição.....	49
Figura 51 - Tabela e gráfico do tempo de <i>dwell</i> em função da tensão da bateria para a bobina de ignição P35 (7 A, 38,4 mJ).....	49
Figura 52 - Configurações da ignição na EMU	49

Figura 53 –Vela de ignição fixa no motor (A) e bobina de ignição (B), à esquerda, e bobina de ignição encaixada na vela de ignição, à direita	50
Figura 54 – Conjunto corpo de borboleta e coletor de admissão: A- Entrada de ar no corpo de borboleta; B- Local de fixação do coletor de admissão à conduta de admissão do motor; C- Injetor de gasolina acoplado ao coletor de admissão.....	51
Figura 55 - Ligação elétrica do injetor à EMU	51
Figura 56 - Placa com informações acerca do motor (cilindrada assinalada a amarelo).....	52
Figura 57 - Configuração dos parâmetros do "Fueling"	53
Figura 58 - Configuração da fase de atuação dos injetores (" <i>Injectors phase</i> ")	53
Figura 59- Injetor HDEV 5.2.....	54
Figura 60 - Perfil de condução do HDEV 5.2: (A) Sinal de atuação proveniente da UCM (B) Corrente no HDEV 5.2 (C) Tensão medida entre os pinos do HDEV 5.2	54
Figura 61 - LifeRacing GDI Driver	55
Figura 62 - Pinos do GDI Driver.....	57
Figura 63- Ligações entre o controlador do injetor de água, o injetor de água e a EMU.....	57
Figura 64 - Tensão aos terminais do injetor.....	58
Figura 65 – Sinal obtido para a queda de tensão na resistência (0,1 Ω) em série (em cima do lado esquerdo) e ampliações do sinal (restantes).....	58
Figura 66 - Esquema elétrico da instalação	60
Figura 67 – Caixa metálica usada na instalação elétrica: Esquerda-interruptores, fusíveis, relé e fichas de ligação à EMU; Direita-indicação da funcionalidade de cada interruptor.....	60
Figura 68 - Mapa de eficiência volumétrica.....	62
Figura 69 - Configuração da fase dos injetores	63
Figura 70 - Tabela de configuração do ângulo de injeção.....	63
Figura 71 - " <i>Injectors trim</i> "	63
Figura 72 - "Tune Display": " <i>Injectors PW</i> ", assinalado a amarelo.	64
Figura 73 - Mapa de avanços de ignição	66
Figura 74 - Conjunto motor-gerador: A- Gerador; B- Máquina primária.....	67
Figura 75 - Características do gerador	67
Figura 76 - Tensão de saída do gerador, em vazio, para várias rotações da máquina primária	68
Figura 77 - Corpo de borboleta: Roldana (assinalada a amarelo) para controlo da posição da borboleta	69

Figura 78 - Peça de fixação do servo colada na roldana.....	70
Figura 79 - Acoplamento entre servo e eixo da borboleta	70
Figura 80 – Potenciômetro deslizante (DFR0053)	71
Figura 81 - Instalação do íman e do sensor de efeito Hall: A- Roda dentada solidária com a cambota; B- Íman; C-Sensor de efeito Hall.....	72
Figura 82 - Arduino UNO R3	73
Figura 83 - Step-down LM2596.....	73
Figura 84 - Esquema de ligações para controlo do acelerador.....	74
Figura 85 – <i>Dimmer</i> 4000 W.....	76
Figura 86 - Circuito do <i>dimmer</i>	77
Figura 87 – Tensão nos terminais do potenciômetro (vermelho e azul escuro) e queda de tensão no potenciômetro (azul ciano): resistência de 488 k Ω (limite máximo de resistência), em cima, e resistência de 200 k Ω , em baixo.....	79
Figura 88 - Esquema de ligações para controlo do brilho do LED.....	81
Figura 89 - Uso de cabo com malha na bobina (esquerda) e no sensor da cambota (direita).....	85
Figura 90 - Vela de ignição RJ19LM	85
Figura 91 – Tampa da caixa metálica usada para alojamento do arduino e instalação de interruptores e potenciômetros.....	86
Figura 92 - Posição relativa entre sensor de efeito Hall e íman: A- Sensor de efeito Hall; B- Íman; C- Pistão.....	87
Figura 93- Sinal da fase Z e sinal de saída do sensor de efeito Hall em função do ângulo de rotação da cambota.....	88
Figura 94 - Sinal da fase Z em função do ângulo de rotação da cambota	88
Figura 95 - Tensão de saída do sensor de efeito Hall em função do ângulo de rotação da cambota	89
Figura 96 - Queda de tensão na resistência (em série com primário da bobina de ignição) em função do ângulo de rotação da cambota para um avanço de ignição de 15°.....	89
Figura 97 - Queda de tensão na resistência (em série com primário da bobina de ignição) em função do ângulo de rotação da cambota para um avanço de ignição de 15° após correção do “Trigger angle” .	90
Figura 98 - Queda de tensão na resistência (em série com o injetor de gasolina) em função do ângulo de rotação da cambota para um início de injeção de 20° antes do PMS (20° APMS) após correção do “Trigger angle”	91

Figura 99 - Queda de tensão na resistência (em série com o injetor de gasolina) em função do ângulo de rotação da cambota para um início de injeção de 0° antes do PMS (2° evento de ignição-360°APMS) após correção do “Trigger angle”	91
Figura 100 - Potência na carga em função do duty cycle da saída ligada ao LED	93
Figura 101 - Potência na carga em função da posição do acelerador (3000 RPM)	93

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Valores do fator lambda	11
Tabela 2 - Pinout conectores da EMU	30
Tabela 3 - Pinout do GDI Driver	56
Tabela 4 - Parâmetros de controlo do injetor HDEV5.2	59
Tabela 5 - Queda de tensão no potenciômetro para vários valores de resistência e respetiva potência	79
Tabela 6 - Potência na carga para várias posições de acelerador, às 3000 RPM e com avanço de ignição de 15°	92

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÓNIMOS

AFR	<i>Air Fuel Ratio</i> (relação ar/combustível)
APMS	Antes do Ponto Morto Superior
CLT	<i>Coolant Liquid Temperature</i> (temperatura do líquido de arrefecimento)
DWI	<i>Direct Water Injection</i> (injeção direta de água)
EMI	<i>Electromagnetic Interference</i> (interferências eletromagnéticas)
EMU	<i>Engine Management Unit</i> (unidade de controlo do motor)
GND	<i>Ground</i> (terra)
IAT	<i>Intake Air Temperature</i> (temperatura do ar de admissão)
LDR	<i>Light Dependent Resistor</i> (fotorresistência)
LED	<i>Light Emitting Diode</i> (diodo emissor de luz)
MAP	<i>Manifold Absolute Pressure</i> (pressão absoluta no coletor)
MCI	Motor de Combustão Interna
NTC	<i>Negative Temperature Coefficient</i> (coeficiente de temperatura negativo)
PI	Proporcional Integral
PID	Proporcional Integral Derivativo
PMI	Ponto Morto Inferior
PMS	Ponto Morto Superior
PWI	<i>Port Water Injection</i> (injeção de água no coletor)
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i> (modulação por largura de pulso)
RPM	Rotações Por Minuto
SID	Sistemas de Ignição Direta
TPS	<i>Throttle Position Sensor</i> (sensor de posição do acelerador)
UCM	Unidade de Controlo do Motor
VE	<i>Volumetric Efficiency</i> (eficiência volumétrica)
VR	<i>Variable Reluctance</i> (relutância variável)

1. INTRODUÇÃO

Os motores de combustão interna são, nos dias de hoje, uma das principais formas de produção de trabalho mecânico. Devido ao aumento da poluição resultante da libertação de gases tóxicos para o meio ambiente, às limitações no que toca à emissão de gases de efeito de estufa e aos problemas com a disponibilidade e segurança de fornecimento dos combustíveis derivados do petróleo, são impostas regulamentações com medidas cada vez mais rigorosas no que toca às emissões de gases poluentes e ao consumo de combustível. Tais exigências têm sido uma das grandes motivações para a pesquisa e desenvolvimento, relativa aos motores de combustão interna. Com o objetivo de cumprir as regulamentações são implementados sistemas eletrónicos nos motores que são cada vez mais eficientes comparativamente aos sistemas mecânicos anteriores. Atualmente, o motor é geralmente gerido por uma unidade de controlo eletrónica que, através da leitura de diversos sensores instalados no motor, determina o comando dos atuadores garantindo um funcionamento cada vez mais otimizado, onde é controlada a formação da mistura de ar/combustível e a sua queima. Mesmo com sistemas de gestão eletrónica cada vez mais avançados, os motores continuam a apresentar uma eficiência relativamente baixa, dado que grande parte da energia do combustível é perdida através do sistema de arrefecimento e dos gases de escape. Várias tecnologias podem ainda ser estudadas e melhoradas de forma a contribuir para uma melhoria significativa na eficiência dos motores de combustão interna.

1.1 Motivação

A associação da eletrónica aos motores de combustão possibilita o seu controlo com mais eficiência e flexibilidade assim como uma mais fácil adaptação destes a diversas condições. Contudo, não é capaz de suprir a baixa eficiência dos motores devido às perdas de energia, em grande parte por transferências de calor. Os motores de combustão interna são dotados de sistemas de arrefecimento que são responsáveis por manter os componentes do motor numa temperatura que permita o seu funcionamento em condições mais próximas do pretendido, impedindo que sejam sujeitos a temperaturas excessivas. Contudo, o arrefecimento do motor diminui a sua eficiência visto que, como parte da energia do combustível é transferida sob a forma de calor para o sistema de arrefecimento, esta não será utilizada para produzir trabalho mecânico. O desenvolvimento de motores em que não existem perdas de energia seria o ideal, apesar de termodinamicamente impossível. Contudo, se parte

da energia das perdas por calor for regenerada, a eficiência dos motores poderia melhorar significativamente. A implementação de sistemas capazes de regenerar a energia das perdas de calor como, por exemplo, através do arrefecimento do motor pela injeção de água no interior da câmara de combustão, podem ser instalados com o objetivo de reduzir as transferências de calor para o sistema de arrefecimento e aproveitar, no caso da injeção de água, a vaporização da água para produzir trabalho útil à semelhança do que acontece num ciclo de expansão de vapor. No Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade do Minho pretendia-se testar o conceito do arrefecimento por injeção direta de água num pequeno motor de combustão interna acoplado a um gerador doméstico. Existia a necessidade de adaptar este motor para permitir a injeção direta de água, instrumentá-lo, controlá-lo eletronicamente e monitorizá-lo.

1.2 Objetivos

Este trabalho teve como objetivo inicial a implementação de um sistema de controlo flexível num motor de base, mas que pudesse ser implementado em qualquer motor de combustão interna de ciclo Otto, permitindo a gestão do motor de forma mais eficiente e controlada. Desta forma, com uma maior flexibilidade em termos de ajustes e configurações, foi possível implementar novos sistemas que pudessem ser testados no motor visando, por exemplo, o aumento da eficiência do mesmo. Para a implementação da gestão eletrónica do motor utilizado foi necessário fazer o estudo dos sensores, atuadores, controlador e modificações necessárias a realizar no motor para essa gestão. Após a montagem de todo o sistema de controlo, foi necessário configurar e definir os diversos parâmetros do mesmo. Com a gestão eletrónica do motor foi possível alterar as configurações definidas, em função dos sistemas a testar e de acordo com o objetivo pretendido. Este projeto teve como objetivo final, a implementação de um sistema global que fosse capaz de gerir eletronicamente o motor e que, para além disso, permitisse a gestão da injeção de água no motor, que vai ser realizada e testada no motor em trabalhos futuros. Tendo em vista a injeção de água diretamente na câmara de combustão foi necessário utilizar um injetor de alta pressão assim como um controlador adequado para este tipo de injetores.

Para que fosse possível testar o motor em várias posições de aceleração numa determinada rotação, foi necessária a utilização de um freio capaz de aplicar um binário de frenagem que permitisse manter a rotação constante, durante a realização de testes em diferentes posições de acelerador.

Outro dos objetivos, de forma a simplificar a realização de testes, foi a implementação de um controlo de rotação do motor quer pelo controlo da posição do acelerador, quer pelo controlo do binário aplicado ao eixo do motor.

2. ESTADO DA ARTE

2.1 Motores de Combustão Interna

Os motores de combustão interna (MCI) são máquinas que geram energia mecânica através do calor proveniente da queima da mistura de ar-combustível e da consequente expansão dos gases que ocorre devido à elevação da pressão e temperatura no interior da câmara de combustão.

Estas máquinas são construídas de forma a executar as operações de admissão, compressão, expansão e escape em 2 ou 4 ciclos, também conhecidos como 2 ou 4 tempos. Os motores de 2 tempos têm como vantagem a melhor relação peso-potência, contudo, os motores a 4 tempos são mais utilizados devido à sua maior eficiência na troca de calor, maior eficiência no sistema de lubrificação, melhor controlo do consumo de combustível e menor índice de emissão de poluentes [1].

Uma das características de um motor é o seu ciclo termodinâmico, sendo que o MCI pode operar, nomeadamente, segundo o ciclo Otto ou o ciclo Diesel. No ciclo Otto, a ignição da mistura ocorre devido à faísca gerada na vela. No ciclo Diesel, a ignição ocorre espontaneamente, à medida que o combustível é injetado na câmara de combustão, devido à alta pressão e temperatura criada no interior da câmara de combustão no final do tempo de compressão.

O sistema de arrefecimento desempenha um papel muito importante num MCI, podendo funcionar a ar ou a água. Os sistemas de arrefecimento a água são mais utilizados por possuírem vantagens tais como a maior eficiência e homogeneidade na transferência de calor em comparação com os sistemas de arrefecimento a ar. Os sistemas a água são mais utilizados em motores de médio e grande porte ao passo que os sistemas a ar são mais utilizados em motores de pequeno porte.

Existem ainda diversos sistemas de fornecimento de combustível e de ignição mas apenas serão abordados os sistemas relativos ao motor 4 tempos de ciclo Otto, que será o tipo de motor em que este estudo se baseia. Os MCI de ciclo Otto podem ser alimentados através de um sistema a carburador ou recorrendo a um sistema de injeção eletrónica. A ignição pode-se dar recorrendo a um sistema de ignição convencional ou a um sistema de ignição eletrónica. Estes sistemas de fornecimento de combustível e de ignição serão descritos com maior detalhe mais à frente.

Os motores de combustão interna podem ainda ser classificados quanto à forma como a expansão dos gases é convertida em trabalho mecânico, podendo ser rotativos, de impulso ou alternativos. No motor alternativo, o trabalho é obtido pelo movimento de vaivém do pistão, no interior do cilindro, que acoplado ao sistema biela-manivela, transmite à cambota um movimento rotativo [1–4].

Na Figura 1 é apresentado o esquema de um motor de 4 tempos de ciclo Otto.

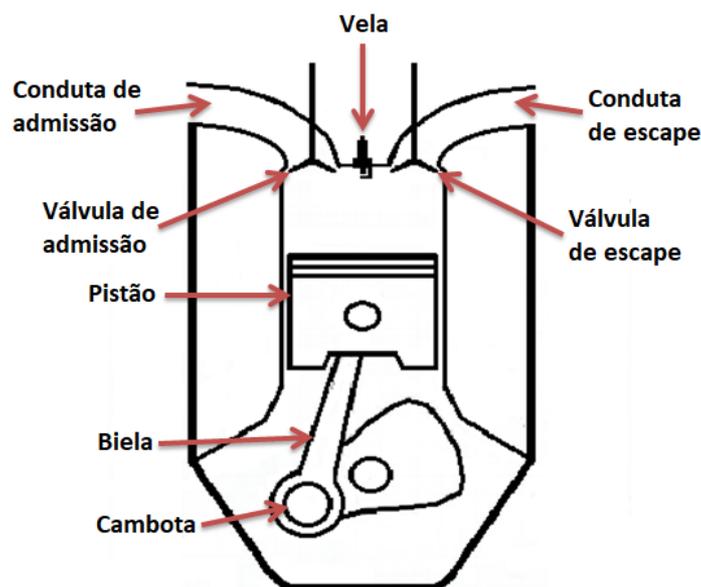


Figura 1-Esquema de um motor 4 tempos de ciclo Otto

O funcionamento do motor a 4 tempos de ciclo Otto, no qual este estudo se baseia, pode ser entendido através da descrição dos 4 processos denominados admissão, compressão, expansão e escape [1-4]:

Admissão: O pistão move-se do ponto morto superior (PMS) para o ponto morto inferior (PMI), enquanto a válvula de admissão se abre. Este movimento descendente do pistão cria uma depressão que causa a aspiração da mistura de ar-combustível para dentro do cilindro. A cambota roda 180° durante este processo.

Compressão: A válvula de admissão fecha-se e o pistão move-se do PMI para o PMS comprimindo assim a mistura ar-combustível que se encontra dentro do cilindro. Esta compressão resulta no aumento da pressão e da temperatura da mistura, o que torna a combustão termodinamicamente mais eficiente. A cambota roda mais 180° , efetuando assim a primeira volta completa (360°).

Expansão: Quando o pistão se encontra próximo do PMS, o sistema de ignição é responsável por transmitir alta tensão elétrica à vela, que vai resultar na ocorrência de uma faísca entre os seus elétrodos e, conseqüentemente, provocar a ignição da mistura ar-combustível. O pistão é assim empurrado do PMS para o PMI devido aos gases em expansão, resultantes da combustão. A cambota roda assim mais 180° . É neste tempo que se dá a produção de trabalho mecânico.

Escape: A válvula de escape abre-se e o pistão move-se do PMI para o PMS expelindo assim os gases resultantes da combustão para fora do cilindro. A cambota roda mais 180° , efetuando assim a segunda volta completa (720°). Após este tempo, o motor volta ao tempo de admissão.

2.2 Sistemas de Alimentação

2.2.1 Carburadores

O sistema de preparação de mistura por carburador foi inventado em 1883 pelos húngaros Donát Bánki e János Csonka e a sua primeira utilização ocorreu em 1896 na Inglaterra. Este sistema foi utilizado por mais de um século e teve uma grande importância nos MCI [5].

O carburador é um dispositivo totalmente mecânico responsável por realizar a mistura de ar/combustível. Este possui uma câmara de combustível onde é armazenado o combustível que vai ser utilizado na mistura. À medida que o ar passa pelo carburador e se dirige para a câmara de combustão é criado o efeito de *Venturi* que causa a sucção do combustível para a conduta de admissão e promove a mistura do ar com o combustível. Existe um pulverizador principal para que seja possível controlar o caudal de combustível que é aspirado e uma borboleta para limitar a quantidade de ar que é aspirada para a câmara de combustão [6, 7].

Este sistema tinha como principais vantagens a sua confiabilidade, facilidade de produção, fácil manutenção e instalação em vários tipos de motores a um baixo custo. Contudo, este sistema a carburador necessita de manutenção periódica (principalmente limpeza), e embora tenha sofrido várias modernizações, não conseguiu reduzir a emissão de poluentes para níveis aceitáveis, acabando por ser substituído pelos sistemas de injeção eletrônica [8].

2.2.2 Injeção Eletrônica

Os sistemas mecânicos de injeção de combustível começaram a ser desenvolvidos na década de 1950. Em 1954, a Mercedes-Benz desenvolveu um sistema de injeção direta para o Mercedes-Benz SL300. Este sistema era pouco usado por ser complexo e caro comparativamente com o sistema a carburador, sendo que a injeção direta no cilindro era também complexa de otimizar naquela altura. Contudo, como o sistema de injeção mecânica trazia melhorias, deu lugar mais tarde a sistemas de injeção indireta, mais simples de otimizar.

Em 1967 a Bosch lançou o D-Jetronic, que é um sistema eletrônico analógico de injeção de combustível, onde a pressão no coletor de admissão é medida e usada para calcular o tempo de injeção. Em 1973 foi lançado o K-Jetronic, um sistema mecânico no qual o combustível é continuamente injetado de acordo com a massa de ar admitida pelo motor. Em 1974 foi lançado o L-Jetronic, um sistema de injeção eletrônico analógico que usa um sensor de caudal de ar para calcular

o combustível a ser injetado. O sistema L-Jetronic, disponibilizava modelos com controle em malha fechada do fator lambda, que é um valor indicativo da riqueza da mistura.

Em 1979 a Bosch lançou o Motronic, um sistema digital de controle do motor que junta os controladores de injeção e ignição num único módulo. As variáveis medidas são usadas como entradas em mapas que determinam os comandos dos atuadores. A partir deste sistema, o único módulo de controle chamado unidade de controle do motor (UCM) passou a controlar as funções de injeção, ignição, entre outras [6, 8].

A principal função da injeção eletrônica é fornecer ao motor a quantidade certa de ar e combustível para o seu correto funcionamento em todas as condições de operação. O sistema de injeção pode ser dividido em dois subsistemas, o subsistema de combustível e o subsistema de ar. O subsistema de combustível envia combustível sob pressão recorrendo a uma bomba de combustível que geralmente se encontra dentro do tanque de combustível. O combustível sob pressão passa pelo filtro e é conduzido pela tubulação até à flauta. Os injetores, como mostra a Figura 2, são fixados na flauta e no coletor de admissão, onde vão injetar o combustível. É necessário que o sistema mantenha uma pressão estável e isso é feito recorrendo a um regulador de pressão e um circuito de retorno sendo que o sistema terá que funcionar com maior caudal de combustível do que aquele que é utilizado. O subsistema de ar é normalmente formado pelo filtro de ar, corpo de borboleta, coletor de admissão, sensor de posição do acelerador (TPS - *Throttle Position Sensor*), sensor de temperatura do ar (IAT - *Intake Air Temperature*), sensor de fluxo de ar e sensor de pressão absoluta (MAP - *Manifold Absolute Pressure*) [5].

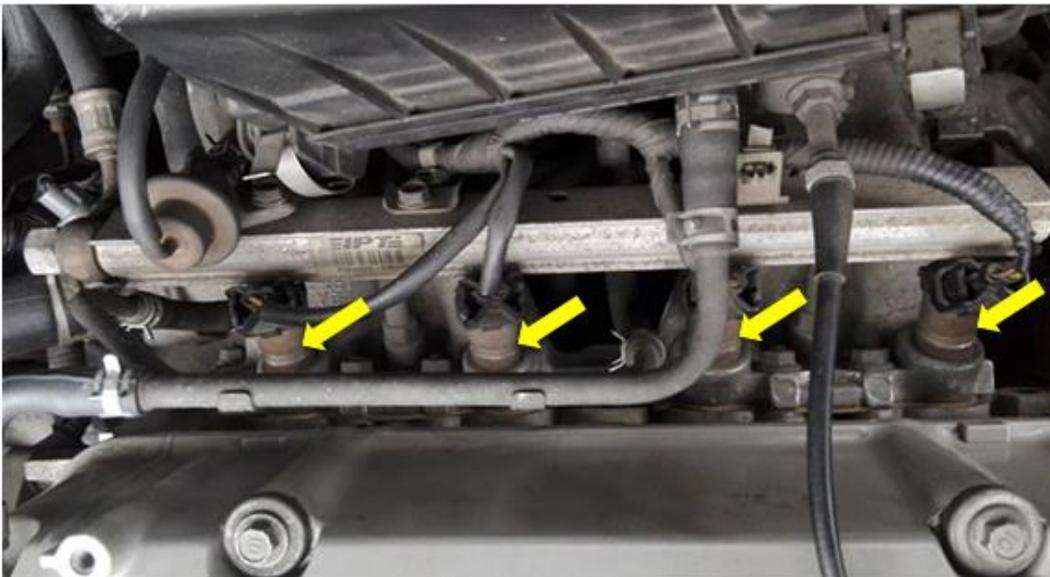


Figura 2- Injetores (assinalados pelas setas), de um Honda Civic 1.6, fixos na flauta e no coletor de admissão

A unidade de controlo é informada do caudal de ar admitido pelo motor através dos valores lidos pelos sensores, podendo assim estimar a quantidade de combustível ideal a ser injetada pelos injetores, gerando uma mistura ar/combustível de acordo com a necessidade do motor. Após a combustão, os gases queimados passam pela sonda lambda, que é um sensor que mede a quantidade de oxigénio presente nos gases de escape. O valor lido pela sonda lambda é enviado para a unidade de controlo, que realiza um ajuste na quantidade de combustível injetado em função dos dados da sonda lambda [5].

Bomba de combustível

As principais características de uma bomba de combustível são:

- Caudal máximo;
- Pressão de funcionamento;
- Tensão elétrica de funcionamento;
- Localização de instalação (dentro ou fora do depósito de combustível).

Na Figura 3 é mostrada uma bomba de combustível externa, onde é possível identificar uma entrada e uma saída de combustível e dois terminais para alimentação elétrica da mesma.



Figura 3-Bomba de combustível

Injetor

O injetor de combustível, tal como o da Figura 4, contém uma válvula eletromagnética controlada eletronicamente. Dentro deste, existe um eletroímã que abre a válvula permitindo que o combustível pressurizado esguiche através da agulha do injetor.

O controlo do injetor é feito através de dois terminais que ligam à unidade de controlo que, por sua vez, varia o tempo do impulso elétrico em função da quantidade de combustível a injetar considerando o caudal de combustível injetado a uma pressão constante [8].

As principais características de um injetor de combustível são:

- Resistência da bobina, podendo ser de:
 - Alta impedância: 12-16 Ω
 - Baixa impedância: < 2,4 Ω
- Capacidade do injetor (caudal máximo em função de uma determinada pressão, normalmente 3 bar);
- Tempo morto do injetor.



Figura 4-Injetor

Sensor de posição do acelerador

O sensor de posição do acelerador fornece informação acerca da posição angular da borboleta. Este sensor é basicamente constituído por um potenciômetro cujo cursor é solidário com o eixo da borboleta. Sendo assim, é possível medir uma tensão variável que depende da posição do cursor. Este sensor está localizado no corpo da borboleta [9].

Sensor de temperatura do ar de admissão e sensor de temperatura do líquido de arrefecimento (CLT - *Coolant Liquid Temperature*)

O sensor de temperatura do ar de admissão está localizado antes do corpo de borboleta e o sensor de temperatura do líquido de arrefecimento está montado no fluxo do líquido de arrefecimento. Estes sensores consistem num termistor do tipo NTC (*Negative Temperature Coefficient*), ou seja, a sua resistência é inversamente proporcional à temperatura [10]. Na Figura 5 é apresentada a curva característica deste tipo de sensores.

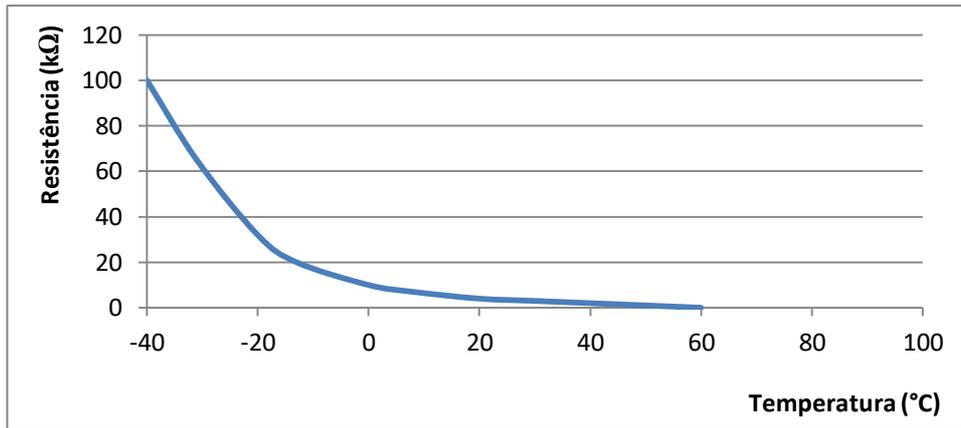


Figura 5 - Resistência do termistor do tipo NTC em função da temperatura do ar

As informações acerca da temperatura do ar e da temperatura do líquido de arrefecimento são utilizadas para [10]:

- Cálculo da quantidade de combustível;
- Controlo do avanço de ignição;
- Controlo do ar de *ralenti*.

Sensor de oxigénio (sonda lambda)

A sonda lambda é um sensor colocado no tubo de escape, tal como mostra a Figura 6, com o objetivo de medir a quantidade de oxigénio nos gases de escape para que seja possível avaliar a riqueza da mistura.



Figura 6-Sonda lambda

A sonda é constituída basicamente por um elemento cerâmico com um revestimento poroso de platina que é protegido por um invólucro metálico. Os sensores de óxido de zircônio enviam à unidade de controlo uma tensão que pode variar entre aproximadamente 100 mV, quando a mistura é pobre, e 900 mV, quando a mistura é rica. Os sensores de óxido de titânio alteram a sua resistência elétrica em função da concentração de oxigénio variando a sua resistência entre 20 k Ω , para uma mistura pobre (presença de oxigénio), e 1 k Ω para uma mistura rica (ausência de oxigénio). Os sensores de oxigénio só se tornam ativos quando o seu elemento cerâmico atinge temperaturas superiores a cerca de 300 °C. Para facilitar a análise é definido um fator lambda, com base no qual a unidade de controlo ajusta a injeção. O fator lambda, indicado na Tabela 1, é dado pela razão entre a relação ar-combustível real e a relação ar-combustível estequiométrica [10].

Tabela 1 - Valores do fator lambda

Valores Lambda	Misturas	Excessos
>1	Pobre	Ar
=1	Estequiométrica	—
<1	Rica	Combustível

2.3 Sistemas de Ignição

2.3.1 Sistema de Ignição Convencional

O sistema de ignição foi um dos que mais sofreu modificações relativamente ao controlo dos MCI. É fundamental estudar o sistema de ignição convencional que, embora já esteja praticamente extinto, permite compreender o funcionamento dos sistemas atuais. Este sistema, tal como mostrado na Figura 7, é basicamente constituído pela bateria, chave de ignição, bobina de ignição, distribuidor, cabos de alta tensão e velas de ignição. Quando a chave de ignição fecha o circuito, a corrente proveniente da bateria passa pelo primário da bobina e pelos contactos do ruptor, caso se encontre fechado, dando passagem à massa. Quando a came gira e abre os contactos do ruptor é interrompida a passagem da corrente e devido à indução eletromagnética é induzida uma tensão muito alta no enrolamento secundário. É então criado um impulso de alta tensão que é enviado até à cabeça do distribuidor pelo

cabo. O contacto móvel do distribuidor vai repartindo a alta tensão, sucessivamente para cada vela de ignição, de modo a ocorrer uma faísca na vela adequada [11, 12].

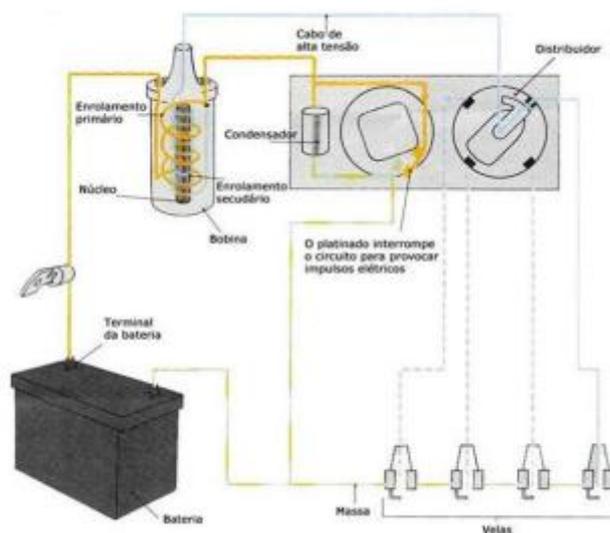


Figura 7 - Sistema de ignição convencional [11]

Uma das desvantagens destes sistemas é a sua incapacidade de controlar o tempo de *dwell*, que é o tempo de carga da bobina de ignição. Para além disso, o avanço de ignição, dado em graus relativamente ao PMS do cilindro em que ocorre a faísca, é geralmente fixo e, mesmo nos sistemas com controlo mecânico do avanço, não é possível otimizar o avanço em todas as condições de operação [11, 12].

Bobina de ignição

A bobina de ignição é constituída por dois enrolamentos, o enrolamento primário e o enrolamento secundário, que permitem a conversão de uma baixa tensão elétrica numa alta tensão elétrica. Quando é aplicada uma tensão ao enrolamento primário (geralmente 12 V) a corrente flui e é criado um campo magnético em volta deste. Se essa corrente for interrompida repentinamente vai ocorrer uma elevada variação da mesma num curto período de tempo, que vai originar uma elevada variação do campo magnético, induzindo desta forma uma tensão no enrolamento secundário nesse período de tempo. Dado que o enrolamento secundário possui um número de espiras muito superior ao do enrolamento primário, a tensão induzida no secundário será também muito superior [11].

Distribuidor

Existem dois tipos de sistemas de ignição, os sistemas que usam distribuidor, que são sistemas convencionais, e os sistemas que não usam distribuidor.

Nos sistemas com distribuidor existe apenas uma bobina que é responsável por alimentar todas as velas de ignição. A função do distribuidor é direcionar a alta tensão da bobina de ignição para cada vela de ignição de forma sequencial. O distribuidor possui o ruitor, através do qual se interrompe a corrente pelo enrolamento primário da bobina. Pode possuir dispositivos de avanço automático que gerem o momento da ocorrência da faísca na vela de acordo com a velocidade de rotação do motor e possui o contacto móvel distribuidor da alta tensão para cada uma das velas do motor [11].

Velas de ignição

As velas de ignição são os elementos onde se produz a faísca que vai desencadear a combustão da mistura. A faísca resulta da elevada diferença de potencial existente entre dois elétrodos, em que um se encontra ligado à massa e o outro ao cabo de alta tensão que está ligado ao distribuidor. Na Figura 8 é mostrada a constituição básica de uma vela de ignição.



Figura 8-Vela de ignição

2.3.2 Sistema de Ignição Eletrônica

Com a evolução da eletrônica, o sistema de ignição começou a incorporar na sua constituição uma unidade de controlo que era capaz de processar as informações enviadas pelos vários sensores distribuídos pelo motor. Esta unidade de controlo é conhecida como UCM, e desempenha várias funções de controlo como já foi referido no capítulo da injeção eletrónica. A partir da década de 90 a UCM foi evoluindo, assim como os sensores a ela associados, o que resultou no desaparecimento do distribuidor e no surgimento dos sistemas de ignição direta (SID), que usam uma bobina para cada par de cilindros ou uma bobina para cada cilindro.

Os sistemas de ignição mais modernos apresentam grandes vantagens em relação aos sistemas convencionais, tais como:

- Maior tensão para a ignição;
- Maior disponibilidade de faíscas por minuto;
- Maior consistência e durabilidade face a variações de temperatura e vibrações.

Estas vantagens permitem:

- Aumentar o desempenho do motor;
- Diminuir o consumo de combustível;
- Diminuir a emissão de gases poluentes.

Um sistema de ignição direta é constituído por uma UCM, por um módulo de ignição, pelas bobinas de ignição, pelos cabos das velas e pelas velas de ignição. Vários sensores posicionados no motor enviam informações para a UCM, que processa a informação e determina o instante ideal para a ignição. Portanto, é a UCM que tem a função de indicar ao módulo de ignição quando este deve ou não cortar o fluxo de corrente no enrolamento primário de cada bobina. Para que este sistema funcione, a UCM deve saber a posição da cambota e para isso é usado um sensor de posição da cambota. A UCM faz ainda o processamento de dados de outros sensores, como é o caso do sensor de temperatura, para determinar o instante ótimo da ocorrência da ignição. Dado que este ocorre sempre antes do PMS, é usual falar do avanço de ignição, ou seja, os graus antes do PMS em que a ignição irá ser desencadeada. Depois de feito este cálculo, a UCM espera que a cambota atinja uma determinada posição para enviar um sinal ao módulo de ignição, que está encarregue de fornecer a devida tensão elétrica à vela correspondente de modo a ocorrer a ignição [11, 12].

Sensor de rotação

A função do sensor de rotação é enviar um sinal para a unidade de comando que, por sua vez, usa esse sinal para calcular a posição e/ou velocidade de rotação do eixo onde o sensor está instalado.

Os sensores de rotação podem ser utilizados como sensor de rotação da cambota, sensor de posição da árvore de cames, sensor de velocidade do veículo ou sensor de velocidade da roda.

O sensor de rotação está sempre associado a uma roda dentada ou a um disco magnetizado alternadamente. No caso do sensor de rotação do motor, o sensor está associado a uma roda dentada solidária à cambota. No caso do sensor de posição da árvore de cames, o sensor está associado a um dente no eixo de comando.

Os tipos de sensores de rotação mais comuns são [11, 13]:

- Sensor de relutância magnética variável (indutivo)

Estes sensores são constituídos por um núcleo ferromagnético abraçado por uma bobina e associado a um ímã permanente. Sempre que um dente da roda dentada passa pela frente do sensor, a relutância do circuito magnético diminui, e quando nenhum dente está na frente, a relutância aumenta. Sendo assim, a variação do fluxo magnético que ocorre quando a roda dentada gira, induz uma tensão variável no enrolamento do sensor. Nos terminais do sensor é possível medir a tensão que é induzida no enrolamento.

- Sensor de efeito Hall

Estes sensores, cujo seu princípio de funcionamento é baseado no efeito Hall, são constituídos por uma pastilha de um material semicondutor que é percorrida por uma corrente contínua. Quando a pastilha é sujeita a um campo magnético perpendicular ao fluxo de corrente, surge uma diferença de potencial denominada tensão de Hall, com direção perpendicular ao campo magnético e ao fluxo de corrente. A amplitude da tensão de Hall varia com a corrente e com o campo magnético. Esta tensão pode ser usada por um circuito eletrônico associado para gerar a tensão de saída do sensor.

No caso de um distribuidor onde é utilizado um sensor de rotação, a variação do campo magnético a que o sensor está sujeito deve-se à alternância de janelas ou abas do rotor, quando este gira, entre o ímã e o sensor.

- Sensor Magneto-resistivo

Estes sensores são constituídos por um elemento magneto-resistivo, que varia a sua resistência em função do campo magnético a que está sujeito. Este elemento é instalado sobre um disco magnetizado

alternadamente. Quando o disco gira, ocorre uma variação do fluxo magnético que atravessa o elemento magneto-resistivo, variando assim a resistência do mesmo. Um circuito eletrônico transforma as variações de resistência em variações de tensão, gerando assim um sinal pulsado que pode ser medido aos terminais do sensor.

2.4 Controlo Eletrónico dos MCI

A unidade de controlo do motor recebe informações enviadas pelos vários sensores espalhados pelo motor e determina os comandos que têm de ser enviados para os atuadores.

A unidade de controlo do motor é constituída pelos seguintes módulos [14]:

- Conversor A/D, que transforma o sinal analógico recebido dos sensores num sinal digital;
- Conversor D/A, que transforma o sinal digital num sinal analógico que é enviado para os atuadores;
- Processador digital de sinal (DSP – *Digital Signal Processor*), responsável pelo processamento dos sinais recebidos pelos sensores, realizando os cálculos necessários para gerar sinais que serão enviados para os atuadores;
- Memória EEPROM ou FLASH, onde é permitido escrever inúmeras vezes e onde se encontram os mapas que regem a gestão eletrónica;
- Memória RAM, onde o DSP guarda temporariamente os dados acerca do funcionamento do automóvel em cada instante;
- Portas de entradas e saídas para a comunicação entre o DSP e os conversores A/D e D/A.

A informação é processada em função dos vários parâmetros definidos na EEPROM ou FLASH controlando assim os atuadores de forma adequada às diversas condições de operação do motor.

Um sistema de controlo como este pode executar funções tais como [15]:

- Controlo de injeção;
- Controlo de ignição;
- Controlo de *ralenti*;
- Controlo da recirculação dos gases de escape;
- Controlo da pressão de sobrealimentação;
- Controlo da válvula borboleta eletrónica;
- Controlo do comando de válvulas variável;

- Controlo de tração.

O controlo da injeção é fundamental pois proporciona a mistura ar-combustível adequada em todos os pontos de operação do motor permitindo também acelerações rápidas e arranques a frio. O controlo da ignição é fundamental pois garante a ocorrência de uma faísca no instante adequado e com energia suficiente para que a combustão da mistura seja iniciada. O controlo do *ralenti* permite o funcionamento do motor quando a válvula borboleta se encontra fechada. Os restantes controlos desempenham funções relacionadas com o desempenho do motor, controlo das emissões de gases, entre outras.

2.5 Injeção de Água

Os motores de combustão interna, que são utilizados em inúmeras aplicações, são constantemente alvo de diversas investigações que têm como objetivo o desenvolvimento de novas tecnologias capazes de aumentar a eficiência e a densidade de potência destes motores. O aumento da eficiência torna-se mais difícil em motores de pequena escala, nos quais a eficiência é mais baixa comparativamente a motores de maior escala devido à sua maior relação entre a área superficial e o volume, o que leva ao aumento da transferência de calor e perdas por atrito (fenómenos que dependem da área de superfície) relativamente à potência que debitam (que depende fundamentalmente do volume ou cilindrada).

Em geral, num motor de pequena escala, 35 % da energia total do combustível é perdida como calor através do sistema de arrefecimento do motor, outros 35 % são perdidos através dos gases de escape e outros 10 % representam as perdas por atrito restando apenas 20 % da energia total do combustível para produção de trabalho. Sendo assim, podem ser sugeridos alguns métodos que podem ser usados para aumentar a eficiência do motor [16]:

- Recuperação do calor de escape;
- Reduzir as perdas de transferência de calor para as paredes do motor usando barreiras térmicas ou combustão de temperatura reduzida da chama para diminuir o gradiente de temperatura através das paredes;
- Regeneração de energia do calor transferido para o líquido de arrefecimento do motor;
- Redução das perdas por atrito.

A gestão da injeção de água neste trabalho vai-se basear num sistema de injeção de água que visa a redução das perdas por transferência de calor visto que terá como objetivo a injeção de água no interior da câmara de combustão, de modo a permitir o arrefecimento interno da câmara de combustão e a regeneração de parte desta energia perdida através da expansão do vapor produzido por esta forma. A injeção de água não é um conceito totalmente novo dado que já foi usada como forma de aumentar a eficiência dos motores ou melhorar o seu arrefecimento.

A água pode ser injetada durante a admissão no coletor de admissão (PWI – *Port Water Injection*) ou então pode ser injetada diretamente na câmara de combustão (DWI – *Direct Water Injection*).

A injeção de água no coletor de admissão é usada por vezes em motores turboalimentados de forma a diminuir a temperatura da mistura, evitando assim o sobreaquecimento do motor e a ocorrência de *knock* o que permite aumentar a pressão no coletor de admissão, a taxa de compressão e o avanço de ignição conduzindo a um aumento do binário, da potência e da eficiência do motor. A injeção de água pode também ser usada em motores aspirados com o objetivo de aumentar a densidade de carga e aumentar o avanço de ignição sem a ocorrência de *knock* [17].

A injeção de água na fase de compressão é feita recorrendo à injeção direta na câmara de combustão e permite reduzir o trabalho necessário para a compressão pois faz com que o aquecimento da mistura não seja tão intenso durante esta fase. Na fase de combustão ou pós combustão, pode ser injetada água com o objetivo de aumentar a eficiência do ciclo, reduzir as emissões de poluentes nos motores de diesel ou hidrogénio, controlar a combustão, entre outros [18]. No entanto, fazê-lo de forma eficaz é um enorme desafio, daí que este método esteja a ser explorado pelo Laboratório de Motores Térmicos e Termodinâmica Aplicada (LaMoTA).

2.6 Freios Dinamométricos

Os freios dinamométricos são dispositivos capazes de impor uma carga mecânica de travagem do motor em toda a gama de rotações do dispositivo a ser testado, mantendo, por exemplo, a rotação ou o binário constante. Estes freios permitem a realização de testes em bancada em toda a gama de binário, potência e velocidade do motor sendo, por isso, muito utilizados no teste de motores. De entre os testes realizados aos motores podem ser referidos a obtenção das curvas de binário do motor, a medição e o controlo da velocidade de rotação do motor, o consumo de combustível (com o auxílio de uma balança ou de caudalímetros), a emissão de poluentes (com o auxílio de dispositivos de medição dos mesmos), a temperatura do motor, a temperatura do líquido de arrefecimento, o rendimento, entre

outros. O uso do freio é ainda necessário para se conseguir definir e afinar os mapas de injeção e de ignição dos motores e analisar os ganhos de potência, binário e rendimento, obtidos pela modificação quer dos mapas, quer das características do motor.

Os freios dinamométricos são constituídos basicamente por um rotor e um estator como mostrado na Figura 9. O rotor é acoplado à cambota do motor e gira no interior do estator. Nos freios são ainda usados rolamentos dado que o estator tem o mesmo eixo de rotação do rotor. A medição do binário, em [N.m], é possível pela fixação de um dispositivo medidor de força (célula de carga, dinamómetro ou balança) ao estator como mostrado na Figura 9, e é calculado pelo produto entre a força exercida no dispositivo medidor de força, em [N], e a distância entre o local de fixação do dispositivo medidor de força e o eixo do rotor, em [m]. Para além do dispositivo medidor de força, podem ser usados outros elementos eletrónicos que permitam a obtenção de outras variáveis como, por exemplo, o uso de sensores de rotação que permitem medir em tempo real a velocidade de rotação do motor [19].

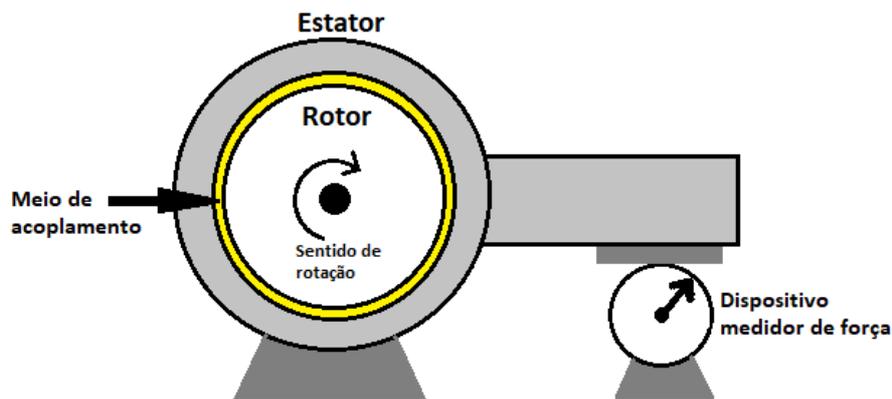


Figura 9 - Esquemático da estrutura básica de um freio dinamométrico

2.6.1 Freio de Fricção (Freio de *Prony*)

O freio de *Prony* foi considerado o primeiro freio para motores e foi inventado em 1821 por Gaspard de Prony. Este tipo de freio é formado por um volante que é acionado pelo motor e que é circundado por uma cinta conectada a um braço, cuja extremidade se apoia num dispositivo medidor de força. O movimento do volante é restringido pela pressão aplicada à cinta, que transmite o esforço ao braço apoiado sobre o dispositivo medidor de força. O procedimento é realizado de forma a manter o motor na rotação desejada. O esforço do motor é calculado a partir dos valores lidos no dispositivo medidor de força. Este mecanismo apresenta vários inconvenientes, tais como o rápido desgaste do dispositivo de fricção, a instabilidade, as dificuldades de arrefecimento, as dificuldades de regulação e a manutenção da carga constante independentemente da velocidade de rotação empregada [20].

2.6.2 Freio de Correntes de *Foucault* (*eddy currents*)

Em 1855, Jean Bernard Leon Foucault demonstrou que era necessária mais força para girar um disco de cobre quando este se encontrava entre os pólos de um eletroímã do que quando não existia o eletroímã. Este facto ocorre devido ao surgimento de correntes parasitas no interior do metal. Estas correntes parasitas ficaram assim conhecidas como correntes de Foucault. Em 1935 este método começou a ser usado nos freios dinamométricos.

O freio de correntes de *Foucault* tem como princípio de funcionamento a criação de correntes no interior de um disco metálico, que gira no interior de um campo magnético constante. Assim que o disco gira no campo magnético, é induzida uma força eletromotriz no disco que faz mover os eletrões livres do disco produzindo desta forma correntes de *Foucault*. Segundo a lei de *Lenz*, as correntes de *Foucault* produzidas geram campos magnéticos que se opõem à sua origem. As correntes de *Foucault* criam pólos magnéticos no disco que são repelidos pelos pólos do eletroímã dando origem a uma força que se opõe ao movimento do disco. Quando maior for a corrente nos enrolamentos do eletroímã, maiores serão as correntes parasitas e mais forte será a força de frenagem.

Estes freios têm como vantagens o funcionamento silencioso, ausência de cheiros, de fricção e de desgaste e a necessidade de pouca ou nenhuma manutenção. Isto faz com que este tipo de freios se torne mais atraentes comparativamente com os freios de fricção, que são barulhentos, apresentam desgaste e necessitam de inspeção regular [19].

Na Figura 10 é mostrado um freio deste tipo, existente no LaMoTA.



Figura 10- Freio de correntes de *Foucault* existente no LaMoTA

2.6.3 Freio de Histerese

O freio de histerese fornece um binário de carga sem atrito entre a estrutura e o rotor. Este tipo de freio possui uma bobina na sua estrutura, que quando é atravessada por corrente cria um campo magnético que faz com que o rotor se magnetize devido ao fluxo magnético que o atravessa. Desta forma, é criado um binário de arrasto entre o rotor e a estrutura onde se encontra a bobina. O binário de frenagem pode assim ser controlado pela corrente que percorre a bobina.

Os freios de histerese podem possuir um íman permanente para criar o campo magnético em vez de uma bobina. Dado que o campo magnético criado por um íman é constante, a posição do íman em relação ao rotor tem de ser alterada, para que se consiga variar o binário de frenagem. Nos freios de histerese o binário de frenagem gerado é independentemente da rotação [19].

2.6.4 Freio Hidráulico

No freio hidráulico, o binário que se opõe à rotação do motor é criado por atrito viscoso. Quando o rotor é acionado, a força centrífuga resultante deste acionamento cria uma circulação toroidal da água transferindo momento do rotor para o estator.

Existem dois tipos de freios hidráulicos, o *variable fill* onde o binário de frenagem é controlado pela quantidade de água que atravessa o freio através de uma válvula à saída e pela quantidade de água dentro do mesmo e o *constant fill* em que o binário de frenagem é controlado pelo ajuste de placas finas entre o rotor e o estator, sendo assim possível controlar o fluxo toroidal da água.

Para que o freio funcione é necessário o fornecimento de um fluxo contínuo de água que vai permitir absorver a energia mecânica e trocar o calor gerado no processo. Estes freios apresentam uma baixa inércia e permitem absorver elevadas potências para um baixo peso do mesmo, para reduzidas dimensões e um baixo custo de aquisição. O binário de frenagem destes freios nunca é nulo, o que pode ser considerada uma desvantagem para ensaios com motores a baixa carga e velocidades de rotação elevadas [19].

2.6.5 Freio Elétrico AC ou DC

Os freios elétricos consistem no uso de um motor/gerador elétrico que irá travar ou ajudar ao movimento do motor de teste conforme estejam em modo gerador ou em modo motor. Quando funcionam como gerador o dispositivo a ser testado funciona como o seu acionador e a potência

mecânica absorvida é transformada em energia elétrica, podendo ser devolvida à rede. Quando funcionam como motor acionam o dispositivo a ser testado consumindo energia da rede. Uma das vantagens da operação dos freios elétricos como motor é a possibilidade de obter as perdas por atrito do dispositivo testado.

Os freios elétricos DC (*Direct Current*) são constituídos por um motor DC controlado através de circuitos de potência e apresenta vantagens tais como a boa capacidade de regulação da velocidade de rotação, robustez, facilidade de controlo, funcionamento como motor ou gerador. Contudo apresentam desvantagens tais como a velocidade de rotação máxima reduzida, uma inércia elevada, elevado custo de aquisição, elevado volume e massa e uma manutenção mais dispendiosa, se comparados com motores de indução da mesma potência, devido ao seu funcionamento com comutador [2, 19].

Os freios elétricos AC (*Alternating Current*) consistem geralmente em motores síncronos ou motores de indução nos quais a variação da velocidade de rotação é feita por inversores de frequência. Os inversores de frequência transformam a tensão da rede elétrica, de amplitude e frequência fixas, numa tensão de amplitude e frequência variáveis. Com isto, é possível variar a velocidade do campo girante que, por conseguinte, varia a velocidade de rotação da máquina.

Os dispositivos com motor de indução possuem uma inércia de rotação mais baixa do que a dos freios elétricos DC permitindo assim um melhor desempenho transiente. Além disso apresentam uma reduzida necessidade de manutenção.

Os freios elétricos AC apresentam vantagens tais como a elevada confiabilidade e robustez. Contudo, são caros e necessitam de controlador, tal como os freios elétricos DC [19, 21].

Como neste projeto o freio se baseou num gerador síncrono, é feita em seguida uma abordagem a este tipo de geradores.

Gerador síncrono

O gerador síncrono é constituído por um induzido e um enrolamento de campo. O enrolamento de armadura, que pode ser monofásico ou trifásico, situa-se na parte fixa da máquina, denominada estator, e o enrolamento de campo situa-se na parte móvel da máquina, denominado rotor.

O enrolamento de campo é alimentado por corrente contínua criando-se assim um campo magnético. Para o funcionamento do gerador é feito um acoplamento mecânico de uma máquina primária ao rotor que fará com que este gire. O movimento relativo entre o campo do rotor e o enrolamento da armadura faz com que o campo magnético induza uma tensão alternada no enrolamento da armadura com

frequência proporcional à velocidade de rotação do rotor e ao número de pólos da máquina, conforme a equação (1) [22].

$$f = \frac{P \times N}{120} \quad (1)$$

Onde:

f - frequência (Hz);

P - número de pólos magnéticos do gerador;

N - velocidade de rotação, em rotações por minuto (RPM).

O gerador produz assim uma tensão alternada sinusoidal, que pode ser monofásica ou trifásica.

Um gerador síncrono é basicamente constituído por:

- Estator (Armadura): Parte fixa da máquina. O estator da máquina síncrona é semelhante ao de um motor de indução. É composto por chapas laminadas com ranhuras axiais onde é alojado o enrolamento do estator. A construção a partir de chapas tem como objetivo diminuir as perdas por correntes parasitas que seriam maiores caso fosse utilizada uma construção maciça. O enrolamento do estator pode ser trifásico ou monofásico;
- Rotor (Campo): Parte girante da máquina. O rotor é também formado por chapas laminadas justapostas. Existem dois tipos de rotores: rotor de pólos salientes e rotores de pólos lisos, sendo que o princípio de funcionamento é idêntico para ambos. No rotor de pólos lisos (Figura 11, à esquerda), o enrolamento de campo é alojado nas ranhuras. No rotor de pólos salientes (Figura 11, à direita), o enrolamento de campo é alojado no espaço interpolar. O número de pólos do gerador é escolhido mediante a rotação da máquina primária;

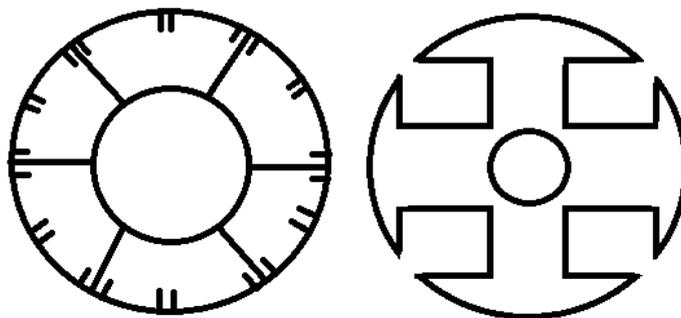


Figura 11-Rotor de pólos lisos (esquerda) e rotor de pólos salientes (direita)

- Ventilador: É responsável por refrigerar o gerador evitando o seu sobreaquecimento e está acoplado ao eixo de rotação;
- Carcaça: É o invólucro do gerador e tem como função evitar o contato com os circuitos internos e permitir que o gerador seja fixado.

A potência nominal do gerador é a potência aparente fornecida ao circuito elétrico ligado aos terminais do gerador. A potência aparente monofásica e dada pela equação (2) e a trifásica pela equação (3).

$$S = V_s \cdot I_l \quad (2)$$

$$S = \sqrt{3} \cdot V_c \cdot I_l \quad (3)$$

A potência ativa fornecida pelo gerador depende da característica da carga. A potência ativa monofásica é dada pela equação (4) e a trifásica pela equação (5).

$$P_e = V_s \cdot I_l \cdot \cos \varphi \quad (4)$$

$$P_e = \sqrt{3} \cdot V_c \cdot I_l \cdot \cos \varphi \quad (5)$$

Onde:

V_s - Tensão simples;

V_c - Tensão composta;

I_l - Corrente de linha;

$\cos \varphi$ - Fator de potência do gerador (igual ao da carga quando o gerador trabalha isolado).

Quando o gerador trabalha de forma isolada, como é o caso, o fator de potência com que o gerador trabalha depende da característica da carga a ele ligada. Neste caso, o gerador deve ser capaz de fornecer a potência nominal dentro dos limites de fator de potência estabelecidos pelo fabricante. A faixa de valores para o fator de potência encontra-se normalmente entre 0,8 e 1. Sendo assim, a

potência ativa e reativa fornecida pelo gerador é idêntica à da carga a ele ligada. A máquina primária deve ser controlada de forma a fornecer a potência ativa, que o gerador fornece aos sistemas a ele ligados, mais as perdas [23].

O rendimento do gerador é dado pela equação:

$$\eta = \frac{P_e}{P_m} \cdot 100 = \frac{P_m - P_p}{P_m} \cdot 100 \quad (6)$$

Onde:

η - Rendimento (%);

P_e - Potência elétrica fornecida à carga ligada aos terminais (W);

P_m - Potência mecânica fornecida pela máquina primária no eixo (W);

P_p - Perdas (W).

3. GESTÃO ELETRÔNICA DO MOTOR E GESTÃO DA INJEÇÃO DE ÁGUA

3.1 Sistema de Alimentação e Sistema de Ignição do Motor Utilizado

O motor que foi adquirido para a realização deste projeto é um motor de 4 tempos de ciclo Otto monocilindrico. O motor é proveniente de um conjunto motor-gerador (gerador doméstico). Na Figura 12 é mostrado o conjunto motor-gerador, o sistema de alimentação do motor e o escape.

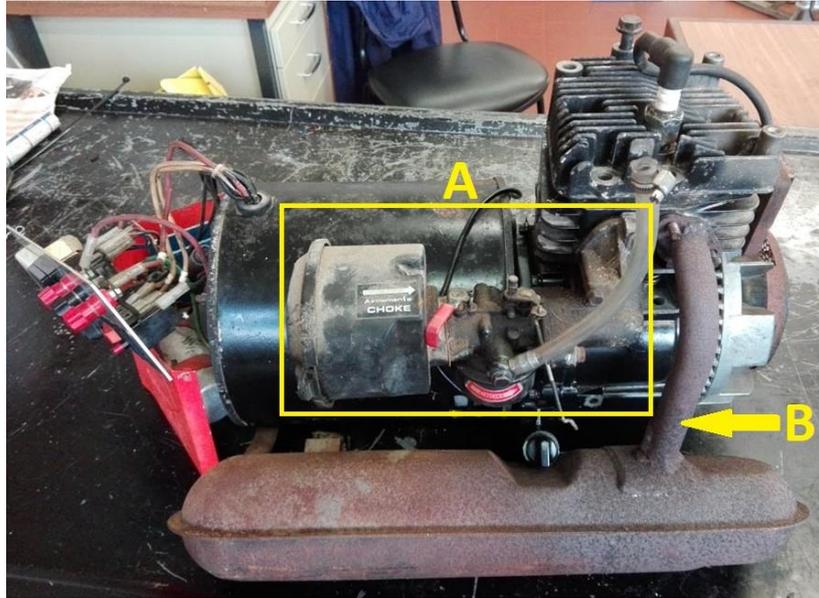


Figura 12 – Conjunto Motor-Gerador (motor à direita e gerador à esquerda): A- Sistema de alimentação do motor; B- Escape.

Visando a implementação da injeção eletrônica, foi substituído o sistema de alimentação do motor por um conjunto de corpo de borboleta e coletor de admissão. O coletor de admissão tem integrado um injetor, que vai ser controlado pelo controlador utilizado neste projeto, e o corpo de borboleta tem integrado um sensor TPS, necessário para que o controlador do motor receba a informação acerca da posição da borboleta. O conjunto, mostrado na Figura 13, foi escolhido tendo em conta a proximidade do seu diâmetro interno com o diâmetro interno da conduta de admissão do motor.



Figura 13 – Conjunto de corpo de borboleta e coletor de admissão utilizado no trabalho

O sistema de ignição do motor, mostrado na Figura 14, não possibilitava qualquer controle do avanço de ignição. Visando a implementação da ignição eletrônica, foi utilizada uma bobina de ignição de uma vela que vai ser atuada pelo controlador do motor, com o objetivo de se controlar o avanço de ignição. A descrição da gestão do motor, onde é incluído o injetor, o sensor TPS e a bobina de ignição, será feita mais à frente.



Figura 14 - Sistema de ignição utilizado pelo motor

No motor utilizado, as válvulas apresentam uma disposição lateral em relação ao pistão e ficam localizadas no bloco do motor, como pode ser visualizado na Figura 15. Tendo em vista a posterior instalação do sistema de injeção de água, este tipo de motor revela-se vantajoso dado que a culassa (tampa superior do motor) tem apenas alojada a vela de ignição sobrando assim bastante espaço para o posterior alojamento de um injetor utilizado para injeção de água no interior da câmara de combustão.

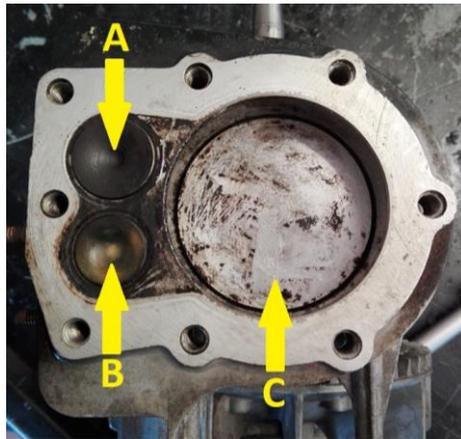


Figura 15 - Motor de combustão interna (vista de cima sem culassa): A- Válvula de admissão; B- Válvula de escape; C- Pistão.

Na Figura 16 é possível visualizar a conduta de admissão, por onde é admitida a mistura de ar-combustível, e a conduta de escape, por onde são expelidos os gases resultantes da combustão.



Figura 16 - Motor de combustão interna (vista lateral): A- Conduta de admissão; B-Conduta de escape

3.2 Controlador do Motor

A unidade de controlo do motor escolhida para este projeto foi a EMU (*Engine Management Unit*) da ECUMASTER, e que é mostrada na Figura 17. É um sistema autónomo de controlo de motores e é projetado para operar os mecanismos mais complexos disponíveis atualmente. É um dispositivo totalmente reprogramável que permite lidar com tempos de injeção, avanços de ignição, cortes de injeção, entre outros, e ainda controlar vários periféricos como ventoinhas de arrefecimento, a bomba de combustível, entre outros. O controlador pode ser usado em circuito aberto e a programação é feita pelo utilizador ou pode ser usado em circuito fechado onde o utilizador define alguns parâmetros alvo e o controlador ajusta os restantes parâmetros automaticamente.



Figura 17- Controlador EMU, da ECUMASTER

A EMU funciona com uma tensão operacional de 6-20V, e permite a comunicação por USB usando o *software* de cliente (para Windows XP, VISTA, 7) fornecido no site da ECUMASTER. Com este controlador é possível controlar motores de 1 a 12 cilindros, tendo o máximo de 6 com injeção e ignição sequencial e 12 através de *wasted spark*. Possui 6 saídas protegidas para injetores e 6 saídas para bobinas ativas ou passivas. Possui também 7 entradas analógicas protegidas para sensores (TPS, IAT, CLT, entre outros). No manual da EMU são indicadas, para além destas, mais algumas especificações tais como sensores lambda, sensores de cambota e sensores de árvores de cames permitidos, tempos de injeção, avanços de ignição, entre outros, e ainda várias funções disponíveis no controlador tais como algoritmos de cálculo de injeção, configuração dos injetores, configuração de parâmetros de sincronização da ignição, calibração de sensores IAT e CLT, tabelas de injeção e de ignição, entre outros [24].

Na Figura 18 é apresentada a numeração dos pinos dos conectores e na Tabela 2 é apresentado o *pinout* desses conectores permitindo assim a ligação dos vários sensores e atuadores ao controlador.

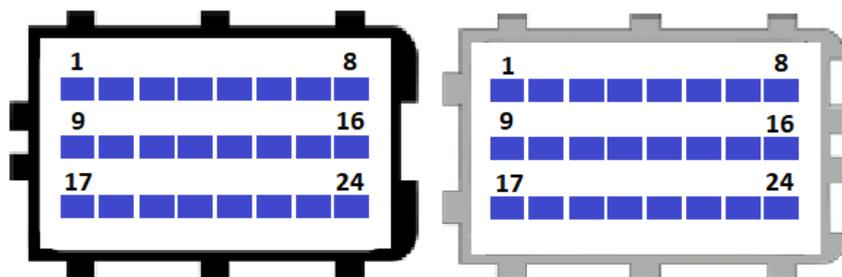


Figura 18- Numeração dos pinos dos conectores da EMU

Tabela 2 - Pinout conectores da EMU

Conector Preto		Conector Cinzento	
1	EGT #1	1	Bobina ignição #6
2	Sensor <i>Knock</i> #1	2	Motor passo #1 (A)
3	Entrada analógica #2	3	Motor passo #2 (A)
4	CLT	4	AUX 6
5	WBO Vs	5	AUX 3
6	<i>Camsync</i> #2	6	Injetor #4
7	<i>Primary Trigger</i>	7	Injetor #1
8	Bobina ignição #5	8	Bobina ignição #1
9	EGT #2	9	Bobina Ignição #3
10	Sensor <i>Knock</i> #2	10	Motor passo #1 (B)
11	Entrada analógica #3	11	Motor passo #2 (B)
12	TPS	12	AUX 5
13	WBO Ip	13	AUX 2
14	VSS	14	Injetor #5
15	<i>Camsync</i> #1	15	Injetor #2
16	Bobina ignição #4	16	Bobina ignição #2
17	GND da EMU	17	GND
18	GND sensores	18	+12V
19	Entrada analógica #4	19	WBO <i>Heater</i>
20	Entrada analógica #1	20	AUX 4/ <i>Tacho</i>
21	IAT	21	AUX 1
22	WBO Vs/Ip	22	Injetor #6
23	+5V	23	Injetor #3
24	GND	24	GND

3.3 Sensores, Atuadores e Programação do Controlador do Motor

3.3.1 Sensor de Posição do Acelerador (TPS)

O sensor de posição do acelerador é constituído por um potenciômetro que traduz, em tensão, a posição da borboleta do corpo de borboleta. Para ser feita esta tradução, a rotação do potenciômetro é solidária com o eixo da borboleta. A Figura 19 indica como ligar o sensor ao controlador.

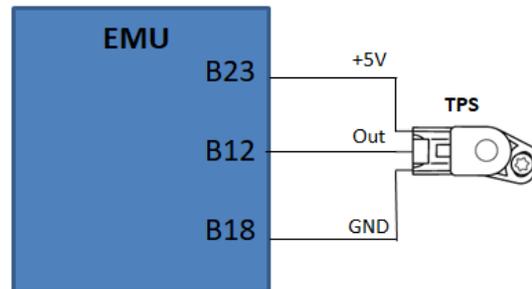


Figura 19- Ligação do TPS

A Figura 20 mostra o corpo de borboleta utilizado, identificando a posição da borboleta e do sensor da posição do acelerador (TPS).

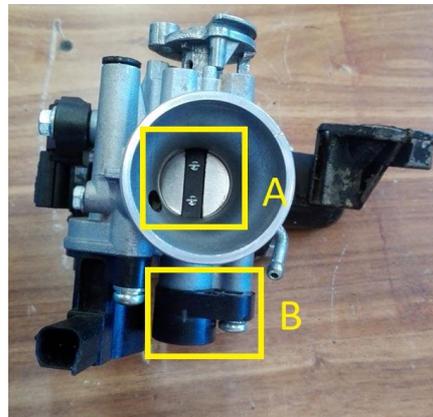


Figura 20- Corpo de borboleta: A- Borboleta; B-TPS.

Na Figura 21 é apresentada a janela de calibração onde são definidos os dois limites de posição da borboleta. Com a borboleta totalmente fechada, o valor de tensão dado pelo potenciômetro é de 0,45 V e com a borboleta totalmente aberta, o valor de tensão dado pelo potenciômetro é de 3,57 V.

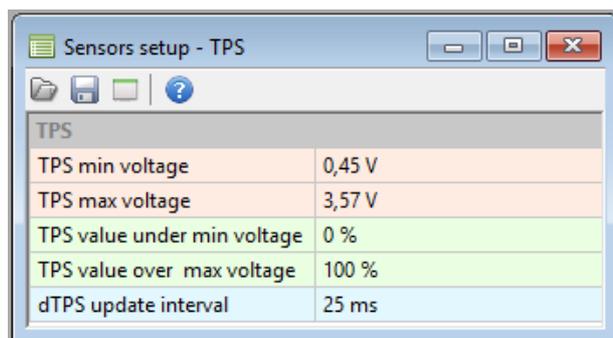


Figura 21- Janela de calibração do sensor TPS

O controlador interpreta o valor de tensão lido no potenciômetro como a percentagem de abertura da borboleta (entre 0 e 100 %).

3.3.2 Bomba e Filtro de Combustível

O circuito de combustível é composto pelo depósito, pela bomba, pelo filtro de combustível e pelas tubagens. A bomba de combustível que foi utilizada é mostrada na Figura 22 e apresenta as seguintes características:

- Tensão de entrada – 12 V;
- Pressão de funcionamento – 4 bar;
- Caudal – 100 l/h.



Figura 22- Bomba de combustível da RIXEX (Número do artigo:458F0007)

O filtro de combustível (Figura 23), para além de filtrar as impurezas que se encontrem na gasolina, reduz a pressão de alimentação para 3 bar, sendo esta a pressão de funcionamento do injetor de gasolina.



Figura 23- Filtro de combustível

No depósito foi adaptada uma saída para a bomba e uma entrada para o combustível retornado pelo filtro. Estas duas mangueiras ligam-se, no topo do depósito, a dois tubos que são estendidos até ao fundo do depósito como se pode ver pela Figura 24.



Figura 24-Ligação das mangueiras ao depósito

Uma das mangueiras que está ligada ao depósito é ligada à entrada da bomba. A saída da bomba é ligada à entrada do filtro. A outra mangueira que está ligada no depósito é então ligada ao retorno do filtro. Por fim, a saída do filtro é ligada ao injetor. Na Figura 25 são indicadas as ligações das tubagens na bomba e no filtro. A Figura 26 mostra a ligação da mangueira, que está ligada à saída do filtro, ao injetor.

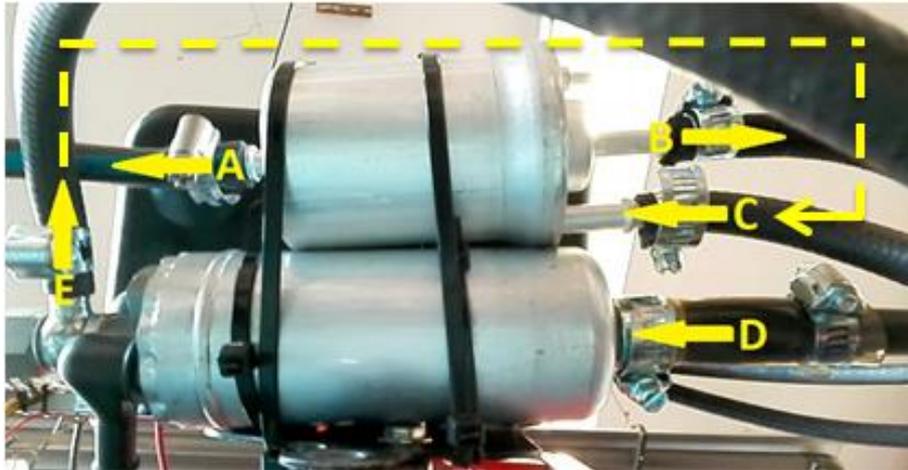


Figura 25-Ligações das tubagens (bomba e filtro de combustível): A-Saída do filtro; B- Retorno; C- Entrada do filtro; D- Entrada da bomba; E- Saída da bomba



Figura 26- Ligação da alimentação de combustível ao injetor

A Figura 27 mostra o circuito de combustível utilizado para alimentar o injetor com uma pressão constante de 3 bar.

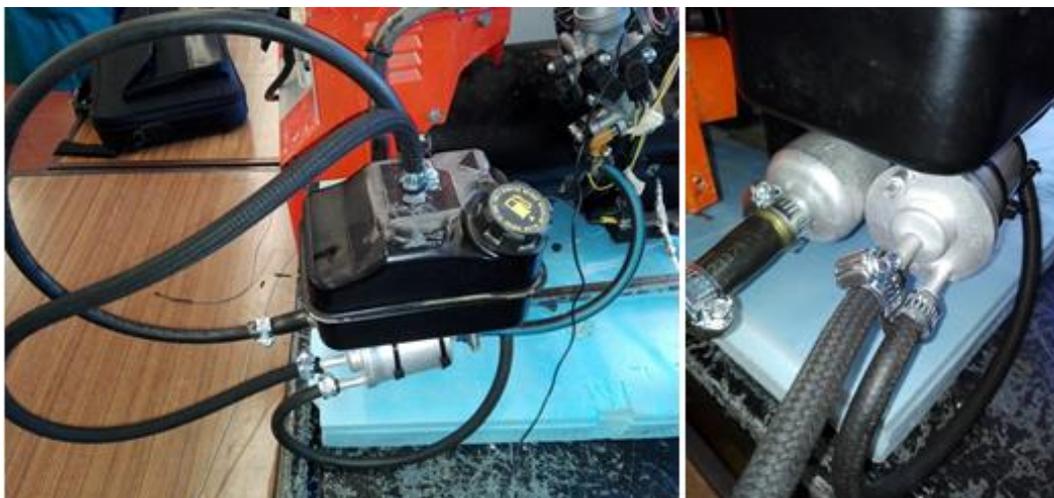


Figura 27- Circuito de combustível

A ligação elétrica da bomba de combustível foi a indicada na Figura 28. O terminal negativo da bomba foi ligado ao bloco do motor e o terminal positivo foi ligado aos 12 V através de um relé e de um fusível.

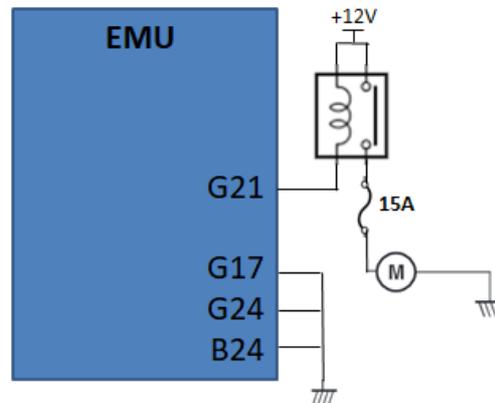


Figura 28- Ligação elétrica da bomba de combustível

O relé da bomba de combustível é controlado pelo controlador do motor. Os parâmetros no controlador foram definidos como indicado na Figura 29.

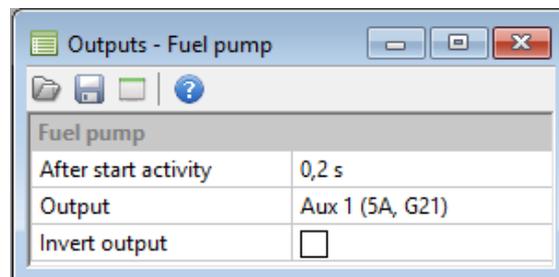


Figura 29- Parâmetros de controlo do relé da bomba de combustível

3.3.3 Sonda Lambda

A medição da mistura de ar/combustível é um dos aspetos mais importantes num motor de combustão dado que é de grande importância que a quantidade de ar e de combustível seja a adequada para a combustão.

O fator de lambda permite estabelecer uma relação entre a quantidade de ar e de combustível, para qualquer combustível. Para uma mistura estequiométrica o valor de lambda vai ser 1, para uma mistura pobre, o valor de lambda vai ser superior a 1 e para uma mistura rica, o valor de lambda vai ser inferior a 1. Se, por exemplo, para um determinado combustível a mistura estequiométrica seja

dada por 14,7 g de ar para cada grama de combustível, a mistura será estequiométrica para estas quantidades ($\lambda = 1$), será pobre para uma mistura com uma quantidade maior de ar para a mesma quantidade de combustível ($\lambda > 1$) e será rica para uma mistura com uma menor quantidade de ar para a mesma quantidade de combustível ($\lambda < 1$).

O controlador utilizado suporta sensores do tipo *Narrow band* e do tipo *Wide band* (Bosch LSU 4.2).

O sensor *Narrow band* dá informação apenas se a mistura está estequiométrica, se está rica ou se está pobre. Portanto, este tipo de sensor não consegue informar acerca do valor da riqueza ou da pobreza da mistura, ou seja, o quão rica ou pobre a mistura se encontra.

O sensor *Wide band* é muito mais sofisticado e pode ser utilizado como uma ferramenta de ajuste. Este tipo de sensor permite indicar a relação entre ar e combustível atual do motor. Sendo assim, este tipo de sensor é preferível, principalmente em modificações, devido à maior gama de informação sobre a relação entre ar e combustível presente na mistura.

Para que a sonda inicie o seu funcionamento é necessário que esta seja aquecida a cerca de 300°C. As sondas mais antigas eram aquecidas pelos gases de escape pelo que demorava ainda algum tempo até que o sensor pudesse entrar em funcionamento. As sondas atuais são dotadas de uma resistência de aquecimento que se situa junto ao elemento cerâmico e que permite o seu aquecimento em muito menos tempo.

O sensor utilizado neste projeto é do tipo *Wide band* (LSU 4.2). O sensor foi instalado numa posição vertical em relação ao tubo de escape como é possível verificar pela Figura 30.



Figura 30 - Instalação da sonda lambda

O esquema de ligações para a sonda lambda utilizada é dado pelo esquema da Figura 31.

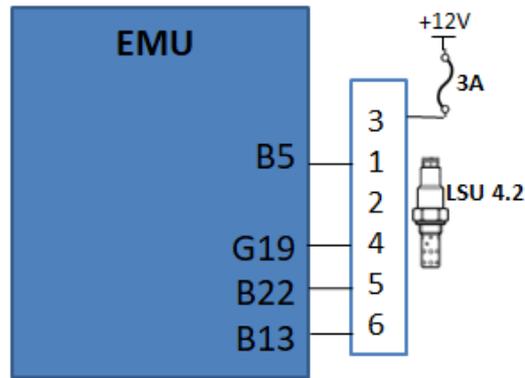


Figura 31 - Esquema de ligações da sonda lambda (LSU 4.2)

O pinout do conector da sonda lambda mostrado na Figura 32 é dado na Figura 33.



Figura 32 - Conector da sonda lambda

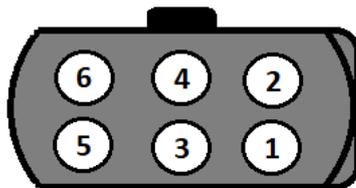


Figura 33 - Pinout conector LSU 4.2

No controlador foi necessário definir o tipo de combustível utilizado, que neste caso é gasolina, e o valor de "*Rca*", que é dado pela resistência entre os pinos 2 e 6 e para o qual se obteve 117 Ω . A configuração para a sonda lambda utilizada é a indicada na Figura 34.

Oxygen Sensor	
Sensor type	Wide band (LSU 4.2)
Fuel type	Gasoline
Heater Kp	32
Heater Ki	2
Heater Kd	1
Heater integral limit	250
Pump Kp	3
Pump Ki	9
Pump Kd	0
Pump integral limit	350
Rcal	117
Enable when no RPM	<input type="checkbox"/>
Enable Lambda filter	<input type="checkbox"/>

Figura 34 - Configurações da sonda lambda utilizada

3.3.4 Sensor de Rotação da Cambota

Para o controlo da injeção e da ignição, o controlador necessita da informação proveniente do sensor de rotação da cambota. Como tal, foi usado um sensor de rotação da cambota do tipo indutivo que foi montado próximo a uma roda dentada com 21 dentes igualmente espaçados (sem falha de dentes). A roda dentada foi fixada ao eixo da cambota, girando assim solidariamente com esta. Em alguns motores de combustão é possível verificar que a roda dentada que se encontra junto da cambota tem “falhas” de dentes. Essas “falhas”, propositadas, são usadas como uma referência para o controlador do motor, permitindo a sincronização da posição da cambota e correspondem geralmente ao PMS do primeiro cilindro. Neste projeto, não foi necessária a existência de “falhas” na roda dentada pois a sincronização do motor foi feita com base na informação recebida do sensor de posição da árvore de cames.

Na Figura 35 é possível visualizar a montagem do sensor indutivo e da roda dentada.



Figura 35 - Sensor de rotação da cambota (do tipo indutivo) e roda dentada

Os pinos de ligação do sensor indutivo são mostrados na Figura 36. A ligação do sensor à EMU é feita pela ligação de um pino (2) à massa (B18) e o outro (1) à entrada da indicada para leitura do sensor (B7), como mostra a Figura 37.



Figura 36 – Pinos de ligação do sensor indutivo

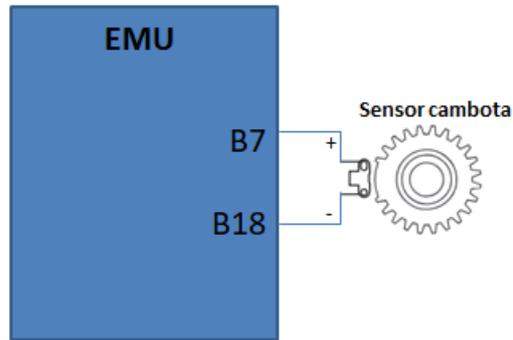


Figura 37 - Ligação do sensor indutivo à EMU

Na EMU as configurações do sensor de rotação da cambota são definidas nas opções do “*Primary trigger*”. No “*Primary trigger*” foi necessário definir o tipo de sensor utilizado que, neste caso, é indutivo ou, como referido no *software*, do tipo VR (*Variable Reluctance*). A EMU suporta ainda vários tipos de rodas dentadas sendo que para definir a roda dentada utilizada foi escolhida a opção “*Multitooth*” e definido o número de dentes que ela possui (21 dentes), ou seja, uma roda dentada com 21 dentes igualmente espaçados. Na opção de roda dentada “*Multitooth*” é necessária a sincronização pela árvore de cames para determinar o dente nº 0 que, nas rodas dentadas com falhas, é assumido como o primeiro dente após a falha.

As definições do “*First trigger tooth*” e do “*Trigger angle*” podem ser entendidas através da análise da Figura 38 para o caso de uma roda dentada 60-2 (58 dentes e falha de 2 dentes). O dente nº 0 é definido como o primeiro dente a seguir à falha. Dado que o PMS é atingido quando o 19º dente passa em frente ao sensor e considerando um “*Trigger angle*” de 60°, o “*First trigger tooth*” vai ser definido como o dente nº9.

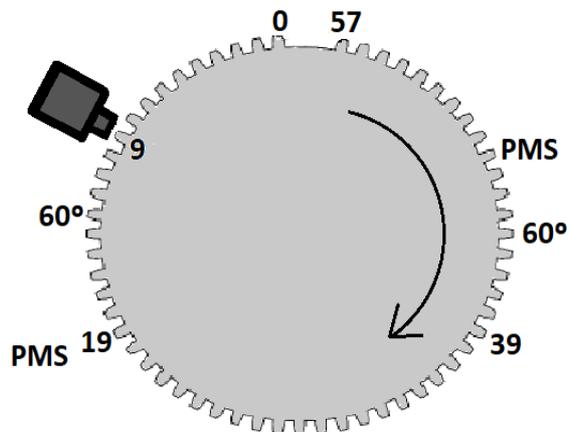


Figura 38 – Roda dentada 60-2

Neste projeto, como foi usada a opção de roda dentada “*Multitooth*”, o dente nº0 da roda dentada é assumido como o primeiro dente após a passagem do “dente” da árvore de cames pelo sensor de efeito Hall. Como será referido e descrito mais à frente, o “dente” na árvore de cames surge 80° (ângulo de cambota) antes do PMS que precede a fase de expansão. Dado que o primeiro dente da roda dentada após o surgimento do “dente” na árvore de cames é assumido como dente nº 0, esse mesmo dente na roda dentada estará 80° adiantado do PMS. Desta forma, o “*First trigger tooth*” foi considerado 0 e o “*Trigger angle*” foi definido como 80°.

Nas configurações foi também necessário definir o número de cilindros. O motor utilizado tem apenas um cilindro mas, dado que o número mínimo de cilindros que pode ser definido no *software* é dois, foi esse o valor definido, não representando qualquer tipo de problema. A configuração do “*Primary trigger*” foi a indicada na Figura 39.

A opção “*Enable scope*” deve ser selecionada para que seja possível a visualização do registo dos sinais de rotação da cambota e de posição da árvore de cames (“*Primary trigger*” e “*Secondary trigger*”).

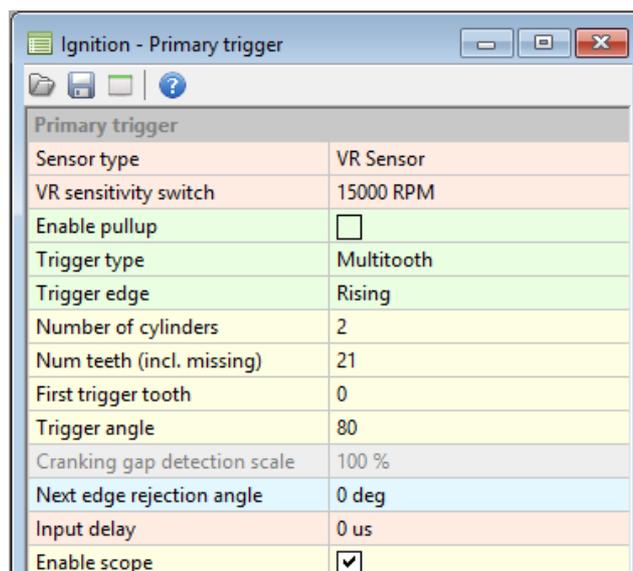


Figura 39 - Configuração do “*Primary trigger*”

3.3.5 Sensor de Posição da Árvore de Cames

As informações fornecidas pelo sensor de posição da árvore de cames e pelo sensor de rotação da cambota, permitem que a EMU realize a ignição e a injeção de forma sequencial, ou seja, a faísca ocorre somente no cilindro que iniciará a fase de expansão e o combustível é somente injetado no cilindro que iniciará a fase de admissão. Isto acontece porque a cambota executa duas voltas por cada

ciclo do motor, ou seja, duas voltas a cada 4 tempos e se a EMU receber apenas a informação da rotação da cambota não tem como saber quais os tempos que ocorrem na primeira e na segunda volta pelo que terá de ocorrer uma injeção e uma faísca em cada uma das voltas para garantir que ocorre pelo menos uma injeção e uma faísca nos tempos corretos. Se a EMU receber também informações acerca da posição da árvore de cames, que executa apenas uma rotação em cada 4 tempos do motor, pode, como descrito acima, realizar ignição e injeção sequencial dado que já tem as informações necessárias para saber quando ocorre cada tempo do motor.

Como sensor da posição da árvore de cames foi utilizado um sensor de efeito Hall. O sensor é mostrado na Figura 40 e possui 3 fios para a sua ligação, um para a alimentação positiva (DC 5V-30V), outro para ligação ao GND e outro que é a saída do sinal do sensor. A saída do sensor apresenta uma tensão de 0V na presença do íman e uma tensão igual à tensão de alimentação sem a presença do íman. O sensor liga ainda um LED quando o sensor está na presença do íman (tensão de saída igual a 0V).



Figura 40 – Sensor de efeito Hall (usado como sensor de posição da árvore de cames)

A ligação deste sensor à EMU é a indicada na Figura 41.

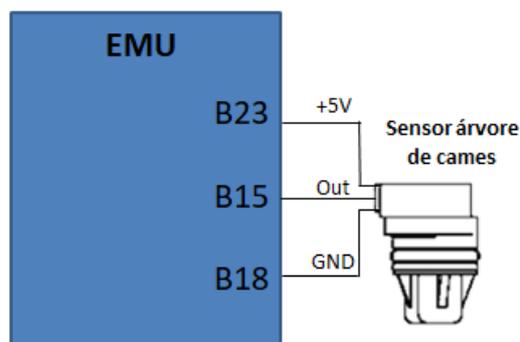


Figura 41- Ligação do sensor de posição da árvore de cames à EMU

Para a instalação do íman e do sensor de efeito Hall foi necessária remoção do óleo do motor e a posterior remoção da tampa lateral do motor. Depois de tirada a tampa foi possível visualizar o que é mostrado na Figura 42. Assinalado com a letra A tem-se a cambota e com a letra B tem-se a árvore de

comes, com as respectivas engrenagens interligadas. A relação das engrenagens é de 2:1 fazendo com que a árvore de cames dê apenas uma volta a cada duas voltas da cambota.

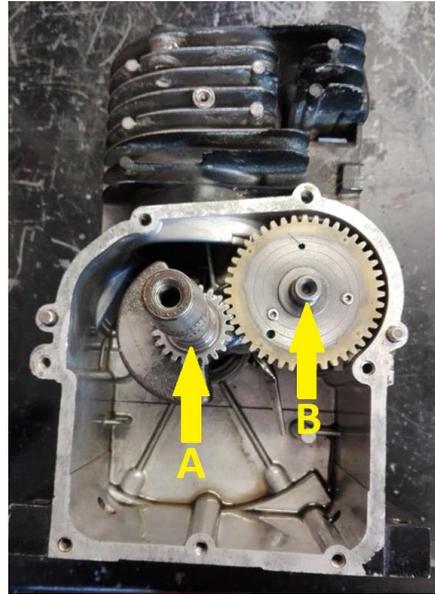


Figura 42 - Cambota (A) e árvore de cames (B)

O resultado da fixação do ímã na engrenagem da árvore de cames e do sensor de efeito Hall na tampa do motor pode ser visto na Figura 43. Para a fixação do ímã foi necessário fazer um furo na roda dentada para permitir o alojamento do ímã. Para a instalação do sensor foi feito um furo na tampa com o mesmo diâmetro do sensor e a sua fixação foi feita através das anilhas e porcas do sensor. O ímã e o sensor de efeito Hall foram colocados de forma que o ímã passasse em frente do sensor 80° antes do PMS que antecede a fase de expansão.

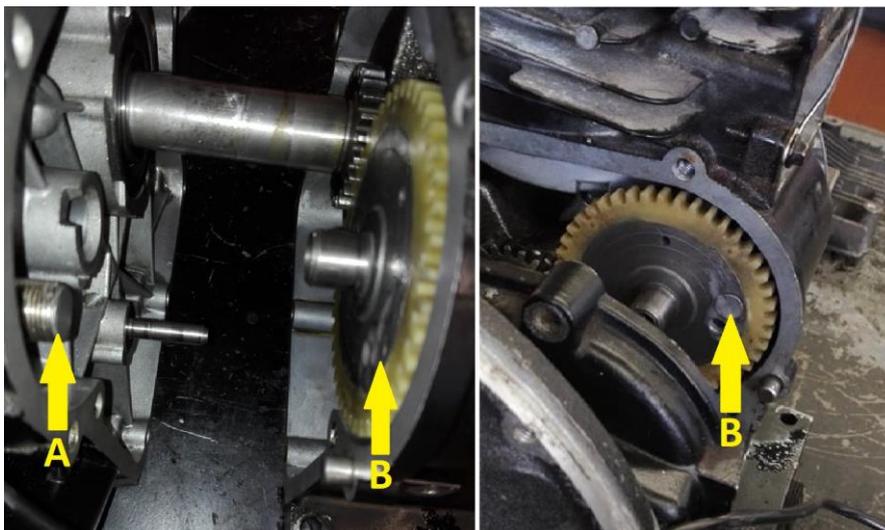


Figura 43 - Localização do sensor (A) e do ímã (B)

Na Figura 44 é mostrada uma técnica para medir os ângulos de rotação da cambota em graus usando um círculo com a indicação dos ângulos para uma volta completa (0° a 360°) que é fixado ao eixo da cambota e um arame fixo para marcação da referência ou ponto de partida. Foi considerado como referência o ângulo 0 para o cilindro no PMS que antecede o tempo de expansão. Alimentando o sensor de efeito Hall e rodando a cambota é possível verificar que o LED do sensor acende, ou seja, o ímã passa na frente do sensor quando o pistão se encontra exatamente 80° antes do ponto de referência (0°) que era o PMS que antecede a fase de expansão, confirmando desta forma o que foi definido anteriormente durante a instalação do sensor e do ímã.

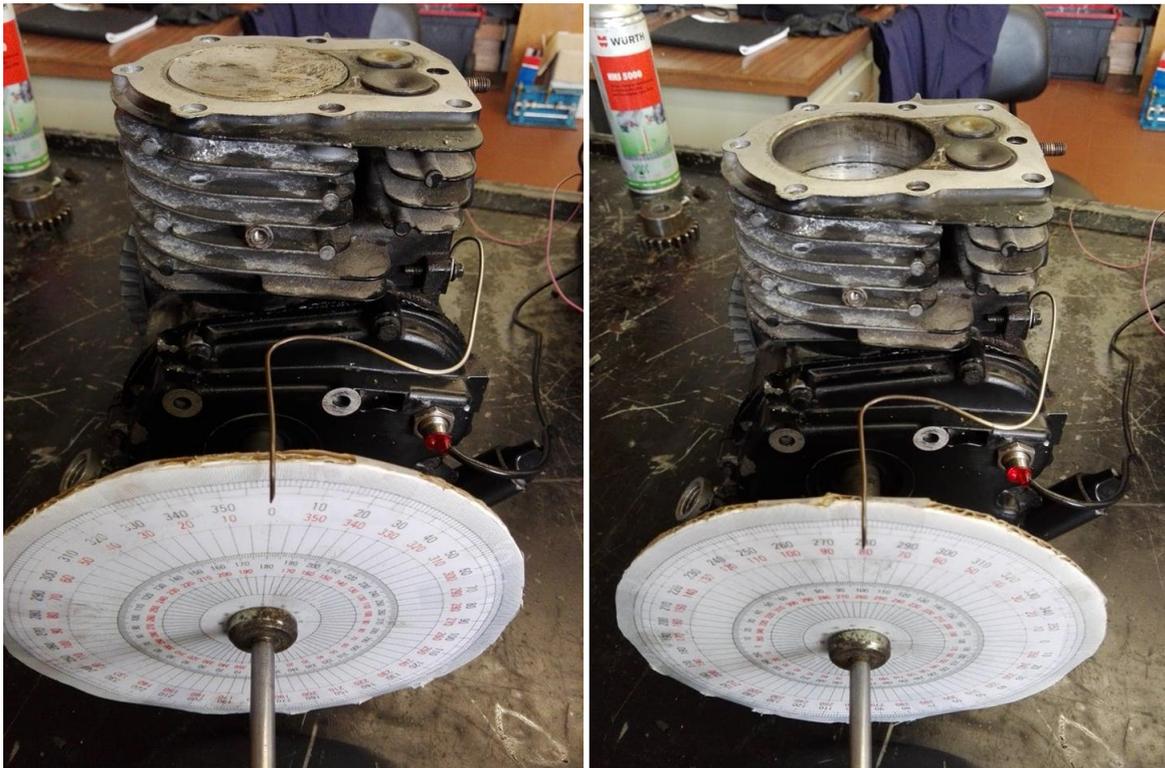


Figura 44 – Técnica usada para medição do ângulo de rotação da cambota em graus

No controlador EMU, as configurações do sensor de posição da árvore de cames são definidas nas opções do “*Secondary trigger*”. No “*Secondary trigger*” foi necessário definir o tipo de sensor utilizado que neste caso é um sensor de efeito Hall. Foi também necessário definir qual o “*Trigger type*”, onde foi escolhida a opção “*1 tooth*” dado que foi colocado apenas um ímã na árvore de cames fazendo desta forma a simulação de um único “dente”. Na opção “*Trigger edge*” foi escolhida a opção “*Falling*” dado que é pretendido que a EMU assuma a passagem do “dente” quando o sinal do sensor sofre uma queda para 0V, ou seja, quando o ímã começa a passar na frente do sensor. Se fosse escolhida a opção “*Rising*”, a EMU assumiria a passagem do “dente” quando o sensor estivesse na presença do

ímã e de seguida deixasse de detetar a sua presença, ou seja, quando a tensão do sinal fosse de 0V para a tensão de alimentação do sensor de efeito Hall.

Na Figura 45 são mostradas as configurações utilizadas para o “*Secondary trigger*”.

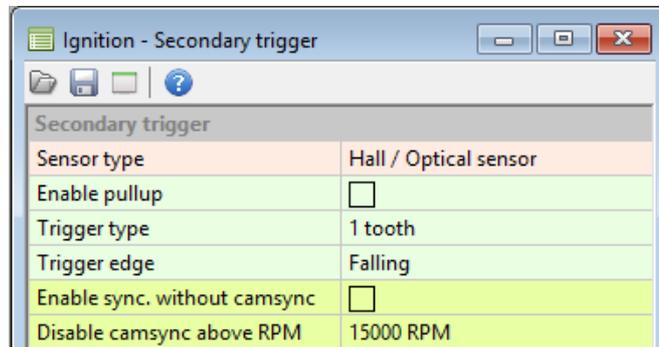


Figura 45 - Configurações do “*Secondary trigger*”

Para um processamento dos sinais de rotação da cambota e da posição da árvore de cames de forma adequada, por parte da EMU, é importante que o “*Trigger edge*” do “*Primary trigger*” e do “*Secondary trigger*” sejam corretamente selecionados. A EMU possui uma ferramenta de “*Scope*” que permite verificar se os sinais estão a ser processados corretamente.

Como visto anteriormente, no “*Trigger edge*” do “*Secondary trigger*” foi escolhida a opção “*Falling*” pelo que apenas teve de ser ajustado o “*Trigger edge*” do “*Primary trigger*”. Foi então usada a ferramenta de “*Scope*” e após a análise dos sinais foi escolhida a opção “*Rising*”. Esta configuração foi escolhida de forma a que os sinais tivessem a disposição mostrada na Figura 46, à direita, onde é possível verificar uma maior distância entre os “*edges*” dos sinais (“*Primary trigger*” e “*Secondary trigger*”). Na Figura 46, à esquerda, é mostrada uma seleção incorreta dos “*Trigger edges*” dado que a distância entre os “*edges*” dos sinais é muito pequena e, neste caso, a sincronização pelo “dente” da árvore de cames pode mudar a altas rotações [24].

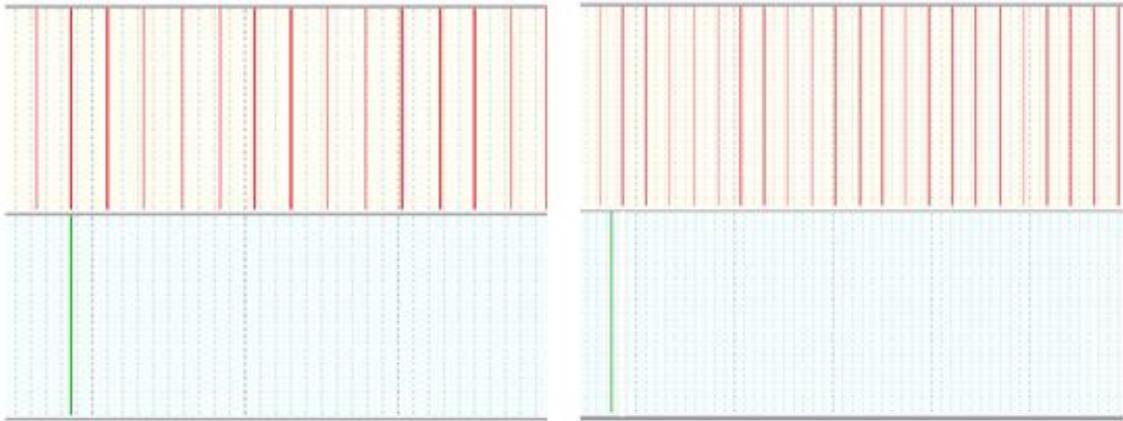


Figura 46 - Seleção incorreta (esquerda) e seleção correta (direita) dos "Trigger edges" ("Primary trigger" (vermelho) e "Secondary trigger" (verde))

3.3.6 Bobina de Ignição

A bobina de ignição utilizada é da marca STARK com referência SKCO-0070033 e é uma bobina de ignição de uma vela. As perdas de tensão de ignição com este tipo de bobinas são mais baixas devido ao seu design mais compacto e à ausência de cabos de ignição. O conector da bobina possui dois pinos: um pino que tem uma indicação B+ e que é ligado à alimentação da bateria (12 V) e outro pino que é ligado ao controlador, sendo através deste pino que o controlador atua a bobina. A bobina utilizada é mostrada na Figura 47.



Figura 47 - Bobina de ignição STARK (Referência: SKCO-0070033)

O esquema da ligação da bobina à EMU é mostrado na Figura 48. Como foi utilizada apenas uma bobina, apenas foi usado o pino G8 e o fusível foi reduzido para 10 A.

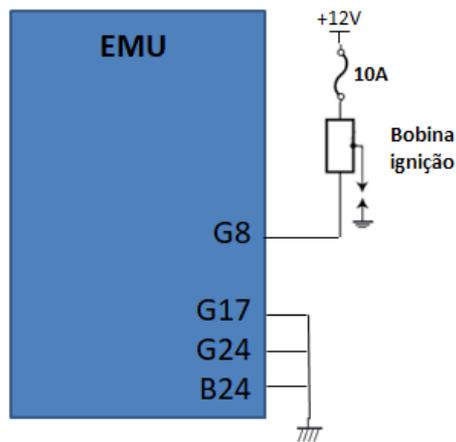


Figura 48 - Ligação da bobina de ignição à EMU

De seguida, foi feita a configuração no controlador começando-se por definir o tipo de bobina utilizada que, neste caso, é uma bobina de ignição individual. Além do tipo de bobina foi necessário definir a tabela relativa ao tempo de energização da bobina em função da tensão da bateria, ou seja, o tempo de *dwell*. A escolha de um tempo de *dwell* muito curto fará com que a faísca não ocorra ou então que seja muito fraca e, pelo contrário, quando é escolhido um tempo de *dwell* muito longo, a bobina tenderá a sobreaquecer. A tabela onde são definidos os tempos de *dwell* para a bobina utilizada pode ser criada a partir do *datasheet* da bobina ou através da escolha de uma das opções predefinidas no *software*. Como o *datasheet* da bobina de ignição utilizada não se encontra disponível para consulta, foram analisadas as 4 opções disponíveis de forma a escolher a melhor opção para a bobina utilizada. As tabelas de *dwell* disponíveis são referentes à bobina de ignição P35 0221504030 para uma corrente de 5 A e uma energia de 25,4 mJ e para uma corrente de 7 A e uma energia de 38,4 mJ e à bobina de ignição P65 0221504024 para uma corrente de 5 A e uma energia de 37,8 mJ e para uma corrente de 7 A e uma energia de 69,8 mJ.

De forma a analisar o tempo de *dwell* e a corrente no primário da bobina para cada opção, foi ligada uma resistência em série com o primário da bobina de ignição e recorreu-se a um osciloscópio para monitorizar a queda de tensão na resistência, permitindo a análise da corrente do primário assim como o tempo em que a bobina esteve energizada. A introdução da resistência em série aumenta a resistência total, contudo foi usada uma resistência de valor baixo para que esse efeito fosse desprezível. A resistência utilizada, com referência PWR4412-2SDR1000F, tem um valor de resistência de $0,1 \Omega$ com 1 % de tolerância. O valor de tensão lido aos seus terminais pelo osciloscópio pode facilmente ser convertido em corrente através da lei de Ohm, dividindo o valor de tensão lido por 0,1,

que é o valor da resistência. Os testes foram realizados para uma tensão de bateria de 13 V logo só se analisou o tempo de *dwell* para esta tensão.

Para as 4 opções disponíveis foram obtidos os sinais da Figura 49.

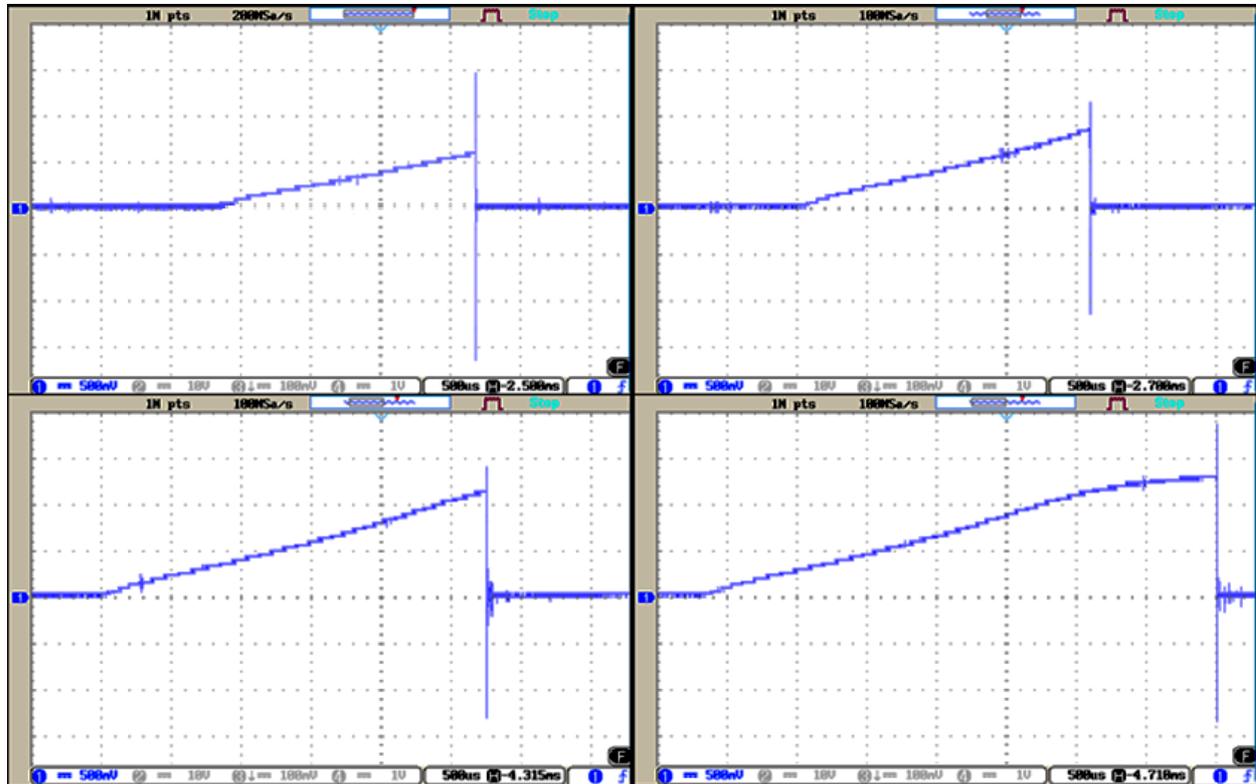


Figura 49 - Tensão aos terminais da resistência série: lado esquerdo- Bobina P35 (em cima- opção 5 A, 25,4 mJ; em baixo- opção 7 A, 38,4 mJ); lado direito- Bobina P65 (em cima- opção 5 A, 37,8 mJ; em baixo opção- 7 A, 69,8 mJ)

Como a energia do primário da bobina de ignição, tal como em qualquer bobina, depende apenas da corrente que a percorre e da sua indutância, o tempo de duração da rampa é o tempo que a bobina do primário precisa para armazenar energia e qualquer tempo além deste, em que a corrente se mantém constante, apenas resultará na geração de calor por parte da bobina.

Pela análise da Figura 49, é possível verificar que a opção que permite uma maior energia é a opção P65 (7 A, 69,8 mJ) contudo, foi escolhida a opção P35 (7 A, 38,4 mJ) visto que, neste caso, a corrente máxima obtida não apresenta uma diferença significativa e não se verifica uma diminuição significativa da variação da corrente durante o tempo de energização, comparativamente com a opção P65 (7 A, 69,8 mJ). Na opção P35 (7 A, 38,4 mJ) o tempo de *dwell* para 13V é de 2,75 ms e a corrente no primário da bobina de ignição utilizada atinge cerca de 11,5 A. A seleção desta opção é mostrada na Figura 50. A Figura 51 mostra a tabela e o gráfico do tempo de *dwell* em função da tensão da bateria para a opção selecionada.

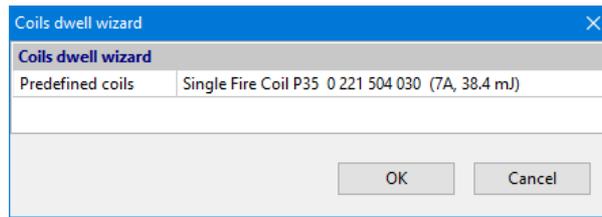


Figura 50 - Seleção do tipo de bobina de ignição

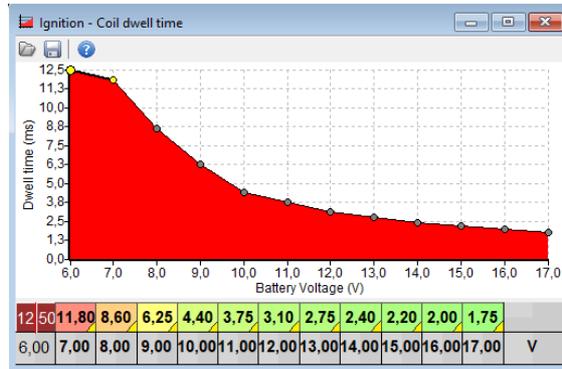


Figura 51 - Tabela e gráfico do tempo de *dwell* em função da tensão da bateria para a bobina de ignição P35 (7 A, 38,4 mJ)

Foi necessário definir mais alguns parâmetros tais como: “*Spark distribution*” onde é definido se é utilizado um distribuidor ou se são utilizadas bobinas, sendo que neste caso é utilizada uma bobina; “*Coils type*” onde é definido qual o tipo de bobinas utilizadas, ou seja, se são usadas bobinas passivas (sem amplificadores de ignição) ou bobinas ativas (com módulo de ignição) logo, dado que não é usado um amplificador de ignição a bobina utilizada é passiva; “*Ignition outputs*” onde é definida a ordem de ativação das bobinas de ignição ligadas à EMU através da atribuição das várias saídas para as bobinas aos eventos de ignição, onde apenas teve que ser configurada uma saída para a única bobina de ignição utilizada. As configurações adotadas para estes parâmetros são mostradas na Figura 52.

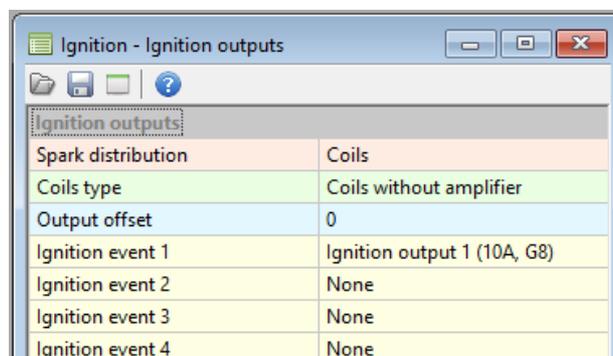


Figura 52 - Configurações da ignição na EMU

Na Figura 53, à esquerda, é possível visualizar a localização da vela de ignição no motor. Para que a alta tensão gerada pela bobina de ignição seja transmitida à vela é necessário o encaixe da bobina de ignição na vela de ignição como mostrado na Figura 53, à direita.



Figura 53 –Vela de ignição fixa no motor (A) e bobina de ignição (B), à esquerda, e bobina de ignição encaixada na vela de ignição, à direita

Inicialmente, foi confirmado o funcionamento do sistema de ignição pela verificação da ocorrência de faísca na vela. Para que fosse possível visualizar a ocorrência de faísca, foi retirada a vela de ignição, sendo encostada no motor num ponto que permitisse fechar o circuito de passagem da corrente de forma a ocorrer faísca. De seguida fez-se o uso da ferramenta de teste disponibilizada no *software* da EMU e foi possível visualizar a ocorrência de faísca na vela de ignição confirmando assim a operacionalidade do sistema de ignição.

3.3.7 Injetor de Gasolina

Dado que o motor utilizado tem apenas um cilindro, apenas foi necessária a utilização de um injetor. O injetor utilizado já se encontrava acoplado no coletor de admissão, quando este foi adquirido. A localização do injetor no coletor de admissão pode ser vista na Figura 54.

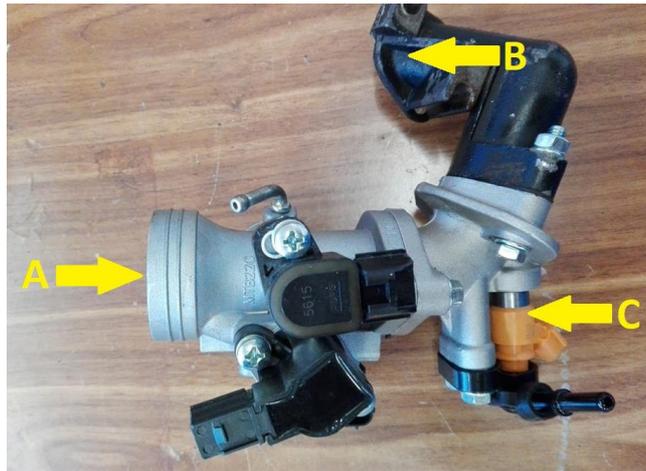


Figura 54 – Conjunto corpo de borboleta e coletor de admissão: A- Entrada de ar no corpo de borboleta; B- Local de fixação do coletor de admissão à conduta de admissão do motor; C- Injetor de gasolina acoplado ao coletor de admissão.

A resistência medida aos terminais do injetor é de $12,2 \Omega$ logo é considerado um injetor de alta impedância. Como o injetor é de alta impedância, pode ser ligado diretamente à EMU, caso contrário, se fosse utilizado um injetor de baixa impedância, seria necessária a utilização de uma resistência limitadora de corrente para cada injetor. A ligação do injetor à EMU foi feita de acordo com a ligação indicada na Figura 55. Como foi utilizado apenas um injetor de gasolina, apenas foi utilizado o pino G7 e o fusível foi reduzido para 5 A.

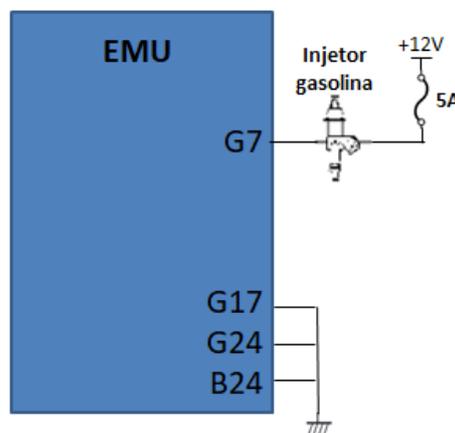


Figura 55 - Ligação elétrica do injetor à EMU

Para a configuração no controlador foi necessário definir a capacidade do motor. Dado que o número mínimo de cilindros aceite no *software* é dois e como o motor tem apenas um, foi definida o dobro da capacidade do motor simulando assim dois cilindros, cada um com a mesma capacidade do cilindro do motor utilizado. Sendo assim, no parâmetro “*Engine displacement*” foram definidos 344 cc (dobro

de 172 cc que é a capacidade do cilindro do motor). A cilindrada do motor está indicada na placa do motor, que é mostrada na Figura 56.



Figura 56 - Placa com informações acerca do motor (cilindrada assinalada a amarelo)

De seguida, foi definido o “*Fueling type*”, que diz respeito à estratégia adotada pelo controlador para controlar as injeções de combustível. A EMU possibilita o uso da estratégia “*Speed density*”, “*ALPHA-N*” ou “*ALPHA-N with MAP multiplication*”. A estratégia “*Speed density*” é um algoritmo que pode ser caracterizado pelo facto de a carga do motor ser definida pelo valor absoluto da pressão no coletor de admissão (MAP). A estratégia “*ALPHA-N*” é caracterizada pelo facto carga ser definida pelo valor da percentagem de acelerador (TPS). A estratégia “*ALPHA-N with MAP multiplication*” combina características das estratégias “*Speed density*” e “*ALPHA-N*” sendo que a carga do motor é definida pelo valor de TPS, de maneira que o valor da tabela que relaciona a percentagem de acelerador e a rotação do motor (tps, rpm) é multiplicado pelo valor do MAP.

Como o motor utilizado tem apenas um cilindro, as medições de pressão no coletor de admissão (MAP) teriam grandes variações pelo que se optou por não utilizar um sensor MAP. Sendo assim, a estratégia utilizada foi a estratégia “*ALPHA-N*” onde o controlo de injeção é feito ponto a ponto para várias posições do acelerador e para várias rotações do motor através da tabela que relaciona o valor de TPS (percentagem de acelerador) e o valor de RPM (rotações por minuto do motor).

Foi também necessário definir o caudal do injetor. Para isso, usou-se a função de teste, e realizaram-se 300 injeções, com o tempo de energização do injetor a 10 e a 5 ms. A gasolina injetada nessas 300 injeções foi recolhida e posteriormente pesada de forma a obter a massa de combustível injetada, que neste caso foi de 2,5 g e 1,1 g, respetivamente. Considerando uma densidade de gasolina de 0,75 kg/l, obteve-se, um tempo morto de 1,07 ms e um caudal de aproximadamente 75 cc/min.

As configurações definidas no controlador relativamente ao “*Fueling*” são mostradas na Figura 57.

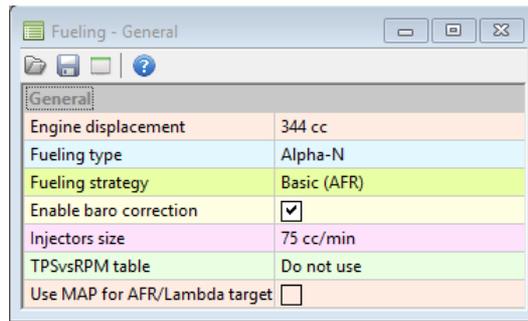


Figura 57 - Configuração dos parâmetros do "Fueling"

De seguida, foi associada a atuação do injetor ao primeiro evento de ignição como mostrado na Figura 58.

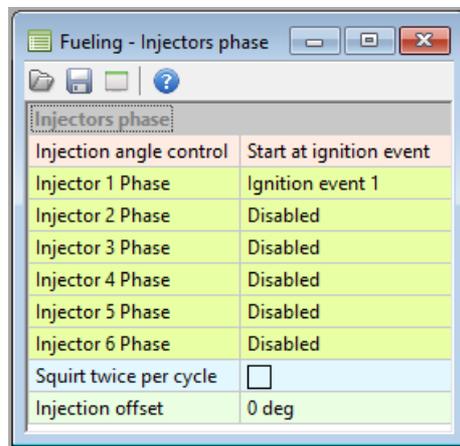


Figura 58 - Configuração da fase de atuação dos injetores ("Injectors phase")

3.4 Injeção de Água

Para o sistema de gestão de injeção de água a implementar será usado um injetor que terá de ser de alta pressão, visto que, futuramente, será utilizado para injeção direta de água na câmara de combustão, e um controlador capaz de gerar os sinais complexos necessários à ativação deste tipo de injetores.

3.4.1 Injetor de Água

O injetor de água utilizado é o injetor de alta pressão (20 MPa) HDEV 5.2, mostrado na Figura 59.



Figura 59- Injetor HDEV 5.2

A atuação do HDEV 5.2 ocorre em 4 fases, que podem ser identificadas na Figura 60 (fases 1, 2, 3 e 4).

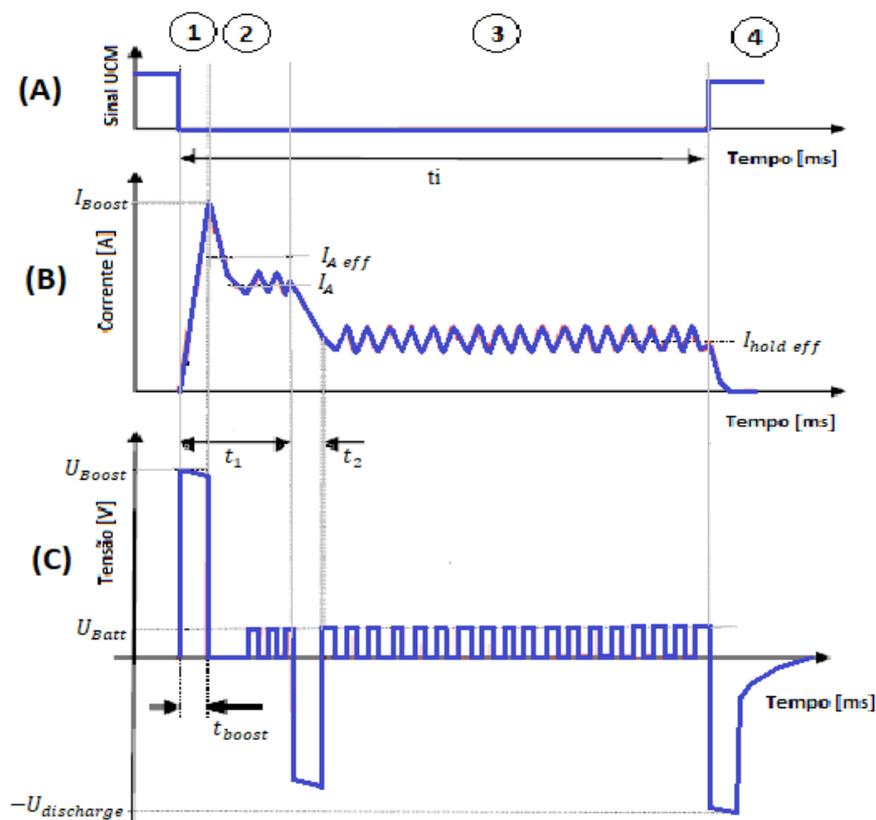


Figura 60 - Perfil de condução do HDEV 5.2: (A) Sinal de atuação proveniente da UCM (B) Corrente no HDEV 5.2 (C) Tensão medida entre os pinos do HDEV 5.2

Na fase 1 ("Booster phase"), a abertura do HDEV 5.2 é iniciada pela alta tensão U_{Boost} , e completada pela obtenção da corrente I_{boost} . O tempo máximo de "booster" $t_{Boost\ max}$ não deve ser excedido. Na fase 2 ("Pickup phase"), o HDEV5.2 é completamente aberto através do controlo de corrente em torno da corrente de "pickup" I_A . O tempo t_1 compreende a fase 1 e 2, ou seja, o tempo desde o início da fase "booster" até ao deslocamento da corrente de "pickup" até à corrente de "holding". No

final da fase de “*pickup*”, a corrente é comutada do nível de “*pickup*” para o nível de “*holding*”. O tempo t_2 não deve ser excedido durante a comutação. Na fase 3 (“*Holding phase*”), o HDEV5.2 já se encontra aberto e é mantido aberto através do controlo de corrente em torno da corrente de “*holding*”, $I_{hold\ eff}$. O baixo nível de corrente permite um fechamento rápido e uma baixa dissipação de calor no HDEV5.2 e no estágio de saída. Na fase 4 (“*Switching-off phase*”), a corrente é interrompida após o final do tempo de injeção t_I . Nesta fase, a tensão $U_{discharge}$ deve ter pelo menos o nível de U_{Boost} [25].

Mais informações acerca das tolerâncias e dos parâmetros de condução podem ser adquiridas no manual de informações técnicas do HDEV 5.2.

3.4.2 Controlador do Injetor de Água

O controlador utilizado para acionar o injetor de água é o GDI Driver da LifeRacing mostrado na Figura 61.



Figura 61 - LifeRacing GDI Driver

Este controlador permite a ativação de 4 injetores e, juntamente com uma UCM, é capaz de gerar os sinais complexos necessários para ativação dos injetores de alta pressão. O GDI Driver tem quatro entradas com *pull-up* interno que são projetadas para serem ligadas à massa por controladores convencionais de injetores de combustível, ou seja, possui 4 entradas para leitura de pulsos de injeção. As quatro saídas do GDI Driver, que são ligadas aos injetores, são acionadas e controladas em função da duração dos sinais de entrada. O GDI Driver permite a escolha de quatro níveis de energia que são: “*Low*”, “*Standard*”, “*High*” e “*Very High*”. Para selecionar a configuração de energia pretendida são usados os pinos G (Config #1) e S (Config #2), que são pinos que também têm *pull-up* interno. Para selecionar os níveis de energia os pinos são ligados das seguintes formas:

- “*Low*”- Pinos G e S desligados;
- “*Standard*”- Pino G desligado e pino S ligado à massa;
- “*High*”- Pino G ligado à massa e pino S desligado;
- “*Very high*”- Pinos G e S ligados à massa.

Como é possível verificar pela Tabela 3, onde é apresentado o pinout do GDI Driver, os pinos A e B são destinados à ligação à alimentação da bateria, os pinos T, U e V são destinados à ligação à massa, os pinos C, D, E e F são as entradas, os pinos de H até R correspondem às 4 saídas para os injetores (um pino com sinal “+” e um pino com sinal “-” para cada injetor) e os pinos G e S são os pinos utilizados para seleção do nível de energia [26].

Tabela 3 - Pinout do GDI Driver

A	+Vcc
B	+Vcc
C	Pulso de injeção #1
D	Pulso de injeção #2
E	Pulso de injeção #3
F	Pulso de injeção #4
G	Config #1
H	GDI #1 -
J	GDI #1 -
K	GDI #1 -
L	GDI #1 -
M	GDI #1 +
N	GDI #1 +
P	GDI #1 +
R	GDI #1 +
S	Config #2
T	GND
U	GND
V	GND

Os pinos de alimentação e os pinos de massa estão ligados internamente, portanto existem vários pinos apenas por confiabilidade e redundância.

Na Figura 62 é mostrada a identificação dos pinos do controlador.

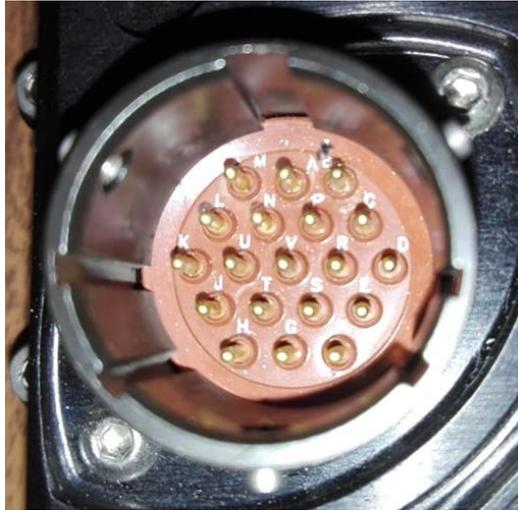


Figura 62 - Pinos do GDI Driver

Depois de ligados os pinos de alimentação ao positivo da bateria e os pinos de massa ao negativo da bateria, foi ligado o pino C, que permite a leitura dos pulsos de injeção, ao pino G15 da EMU, que corresponde ao injetor 2. Desta forma o injetor de água é controlado como sendo um segundo injetor de gasolina. De seguida, ligou-se o pino H ao negativo e o pino M ao positivo do injetor. O nível de energia selecionado, mediante indicação do fornecedor, foi o modo "High". Para seleção deste nível de energia o pino G foi ligado à massa. Na Figura 63 são apresentadas as ligações referidas anteriormente.

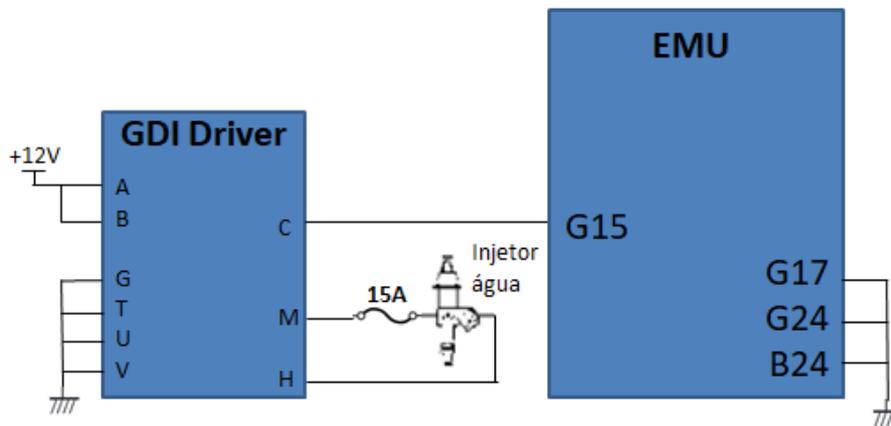


Figura 63- Ligações entre o controlador do injetor de água, o injetor de água e a EMU

De forma a comparar os 4 modos foi medida, para cada modo, a tensão aos terminais do injetor e a queda de tensão numa resistência em série com o injetor, de forma a analisar a corrente no injetor, contudo, não se obteve quaisquer diferenças entre os 4 modos.

Na Figura 64 é apresentado o sinal de tensão aos terminais do injetor e na Figura 65 é apresentada a queda de tensão na resistência em série, através da qual se vai obter a corrente que percorre o injetor.

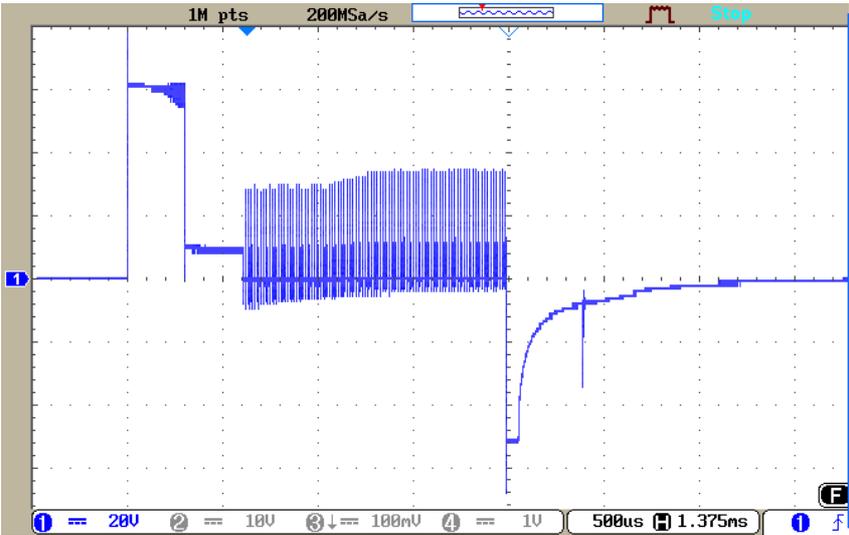


Figura 64 - Tensão aos terminais do injetor

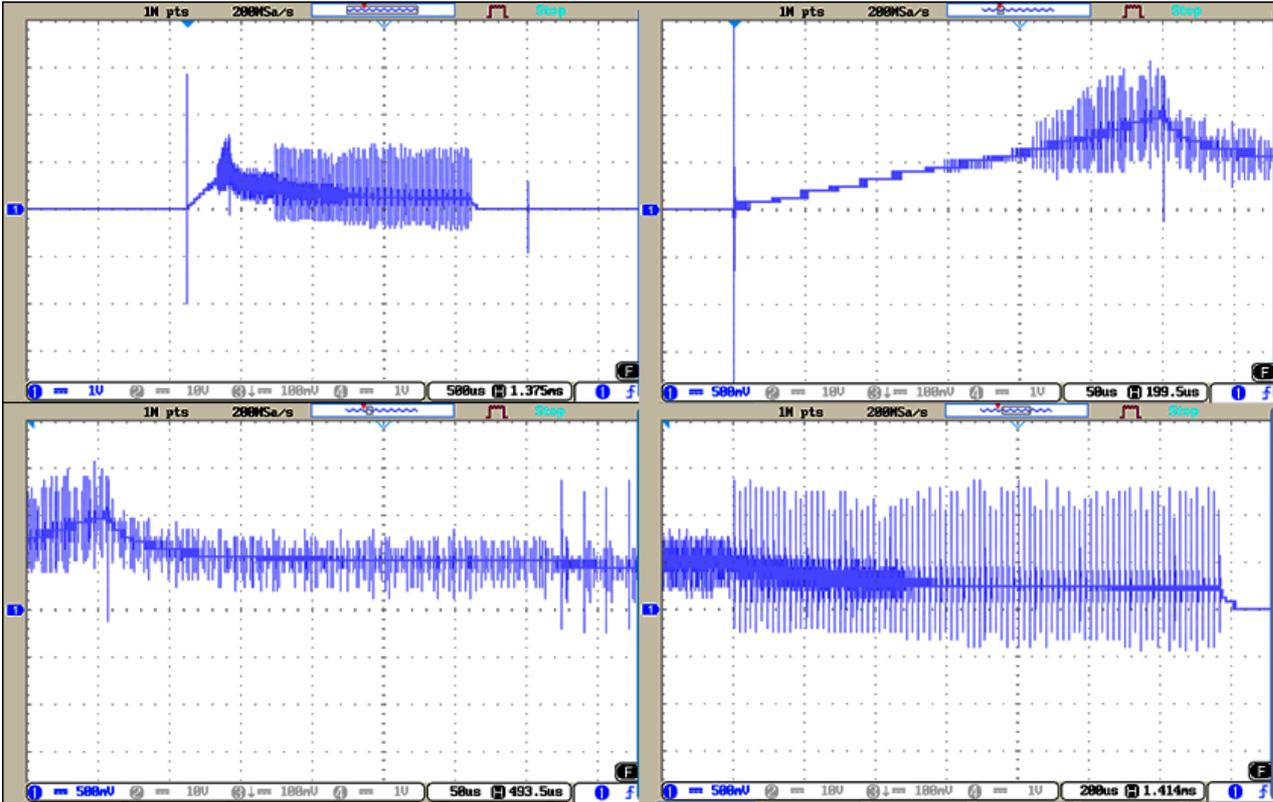


Figura 65 – Sinal obtido para a queda de tensão na resistência (0,1Ω) em série (em cima do lado esquerdo) e ampliações do sinal (restantes)

Na Tabela 4 foram comparados os valores de alguns parâmetros obtidos no *datasheet* do injetor HDEV 5.2, para uma pressão máxima de 22 MPa (modo normal de operação) e um caudal de 13,5 cm³/s (valor mais baixo), com os valores de tensão e corrente obtidos pelo controlo do injetor através do controlador GDI Driver.

Tabela 4 - Parâmetros de controlo do injetor HDEV5.2

Parâmetros	Valores obtidos no datasheet do HDEV5.2 (considerando como referência $p_{max} = 22 \text{ MPa}$ e $Q_{stat} = 13,5 \text{ cm}^3/\text{s}$)	Valores obtidos no modo "High"
U_{Boost} (V)	65	62
t_{Boost} (us)	410 (máx.)	300
t_1 (us)	640	600
$-U_{discharge}$ (V)	65	52
I_{Boost} (A)	10.5	10
I_{hold} (A)	2.8	2.5

3.5 Instalação Elétrica

Para uma melhor compreensão e uma análise mais simplificada da instalação elétrica realizada foi elaborado um esquema elétrico, mostrado na Figura 66, com os controladores, do motor (EMU) e do injetor de água (GDI Driver), sensores, atuadores, fusíveis e relé da bomba de combustível. Além disso, foram utilizados interruptores para corte da alimentação de partes do circuito. Foi usado interruptor para o controlador do motor (EMU), outro para a sonda lambda, outro para o injetor, bobina de ignição e relé da bomba de combustível e outro para o controlador GDI Driver. Para configurações na EMU apenas será necessário ligar o interruptor destinado à sua alimentação. Para o arranque e funcionamento do motor são ligados os interruptores da EMU, da sonda lambda e o do injetor, bobina e relé da bomba. Caso se pretenda que seja realizada injeção de água mediante as configurações definidas, é necessário ligar também o interruptor destinado à alimentação do controlador GDI Driver.

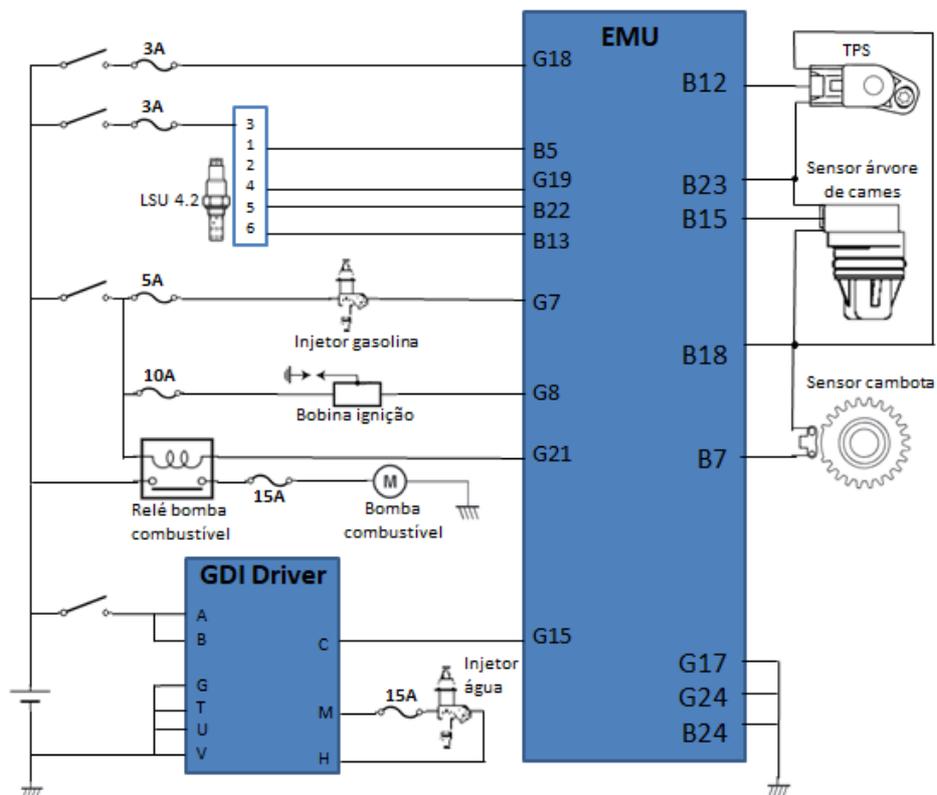


Figura 66 - Esquema elétrico da instalação

Na Figura 67, onde é mostrada a caixa metálica que foi utilizada para alojar parte da instalação, é possível identificar os fusíveis, os interruptores, o relé e as fichas de ligação ao controlador EMU.

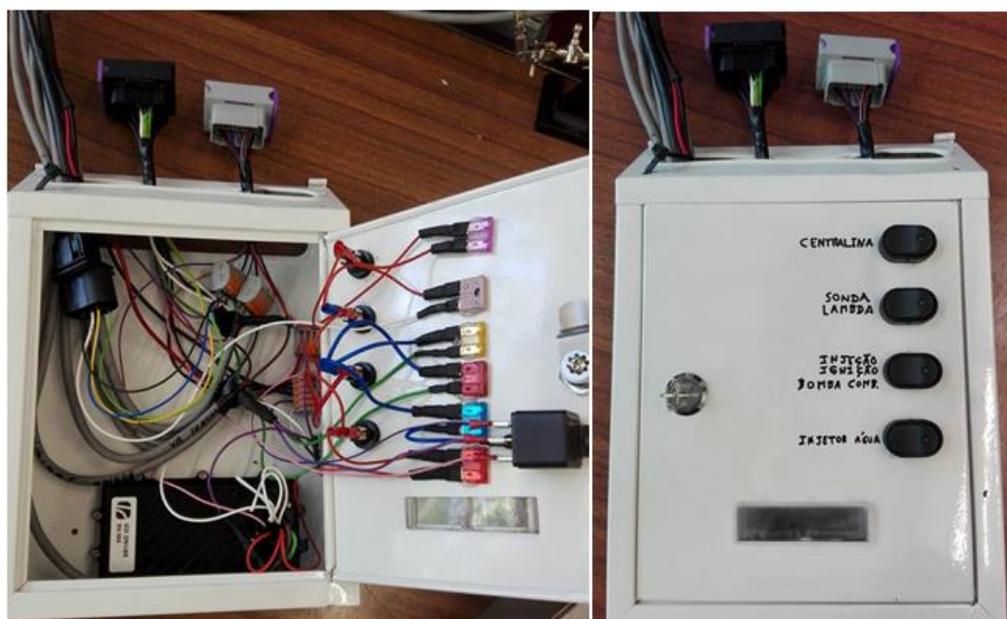


Figura 67 – Caixa metálica usada na instalação elétrica: Esquerda-interruptores, fusíveis, relé e fichas de ligação à EMU; Direita-indicação da funcionalidade de cada interruptor.

3.6 Configuração do Início e Duração das Injeções de Combustível e Água

O tempo de abertura do injetor é dado pelo valor de PW (*Pulse Width*). O valor de PW é obtido pela expressão dada para a estratégia de injeção selecionada, que neste caso é a “ALPHA-N”. A expressão do cálculo do PW para esta estratégia é dada pela seguinte equação:

$$PW = INJ_CONST * VE(tps, rpm) * AirDensity * Corrections + AccEnrich + InjOpeningTime \quad (7)$$

Onde:

- “*INJ_CONST*” é uma constante calculada pelo controlador e que é dada pelo tempo necessário de abertura do injetor de forma a obter uma mistura estequiométrica para uma eficiência volumétrica de 100 %, para uma pressão de 100 kPa e uma temperatura do ar de admissão de 21 °C, tendo por base o caudal definido para o injetor e o volume definido para o total de cilindros, ou seja, a cilindrada do motor;
- “*VE (tps, rpm)*” é o valor de eficiência volumétrica definido no mapa VE;
- “*AirDensity*” é a percentagem de diferença entre a densidade do ar à temperatura do ar de admissão e a densidade do ar a uma temperatura de 21 °C;
- “*Corrections*” é dado pelas várias correções que podem ser definidas para a quantidade de combustível injetada;
- “*AccEnrich*” refere-se ao enriquecimento em aceleração;
- “*InjOpeningTime*” é o tempo que o injetor demora a abrir, desde que é energizado até ao momento em que se encontra totalmente aberto, e é obtido pela tabela de calibração do injetor.

Neste projeto, o tempo de injeção é apenas definido pelo valor do mapa VE multiplicado pela constante “*INJ_CONST*” visto que foi considerada uma temperatura do ar de admissão constante, não foram introduzidas correções nem enriquecimento em aceleração e, como não foi possível consultar o *datasheet* para se consultar a tabela de calibração do injetor, o “*InjOpeningTime*” é sempre definido como 0. Desta forma, o tempo de abertura do injetor é apenas ajustado pelos valores definidos para a eficiência volumétrica no mapa VE. A eficiência volumétrica é o valor, em percentagem, que resulta da razão entre a massa de mistura efetivamente admitida pelo motor e a massa de mistura que caberia no volume do cilindro à pressão do coletor de admissão. O mapa VE (tps, rpm) é assim ajustado ponto

a ponto, para várias posições do acelerador e para várias rotações. O valor definido em cada ponto é ajustado de forma que o valor de lambda se aproxime o mais possível de 1, ou seja, de forma a que a mistura seja estequiométrica. Se para um determinado ponto, dado para uma rotação e uma posição de acelerador, o valor de lambda é maior que 1 (mistura pobre), aumenta-se o valor definido para a eficiência volumétrica nesse ponto. Se, pelo contrário, o valor de lambda é menor que 1 (mistura rica), diminui-se o valor definido para a eficiência volumétrica nesse ponto. Na Figura 68 é mostrado o mapa onde são definidas as eficiências volumétricas para os vários pontos.

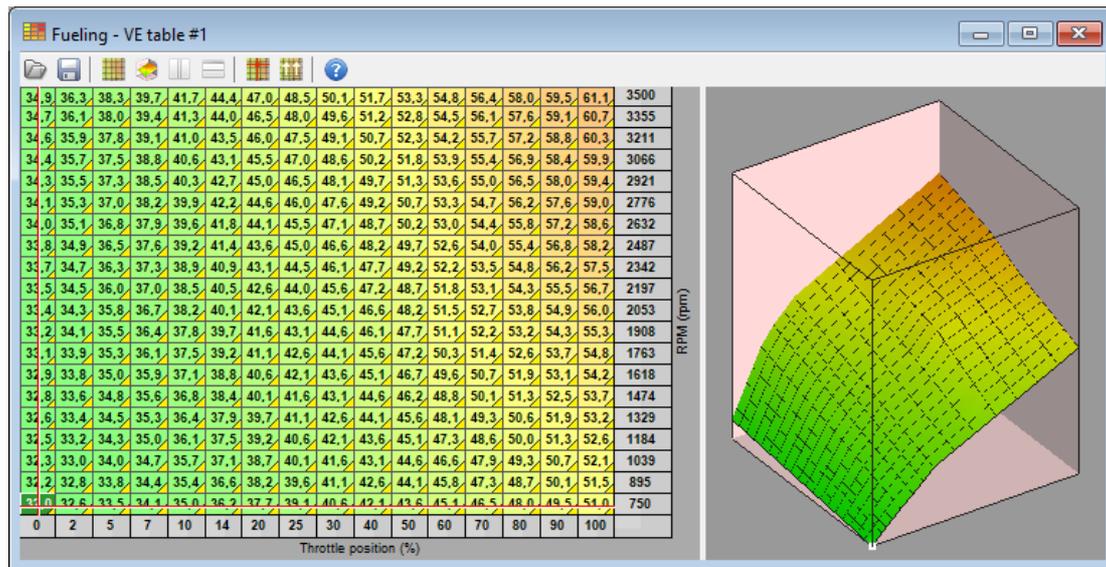


Figura 68 - Mapa de eficiência volumétrica

Além da configuração do mapa de eficiência volumétrica, que permite o ajuste dos tempos de injeção, pode ainda ser definido quando é que a injeção vai ocorrer. A ocorrência de injeção pode ser definida com início no evento de ignição. Para esta opção a injeção começa num ângulo, igual ao "Trigger angle" definido na configuração do "Primary trigger", antes do PMS do cilindro conectado com evento de ignição ao qual o injetor está associado. A ocorrência da injeção pode ainda ser definida com início ou término num determinado ângulo antes do PMS do tempo de compressão. A escolha do momento de ocorrência da injeção, de entre os 3 mencionados, e a associação dos eventos de ignição aos injetores é feita pela janela que é mostrada na Figura 69 ("Injectors phase"). O ângulo para início ou término da injeção é definido na tabela do ângulo de injeção que é mostrada na Figura 70.

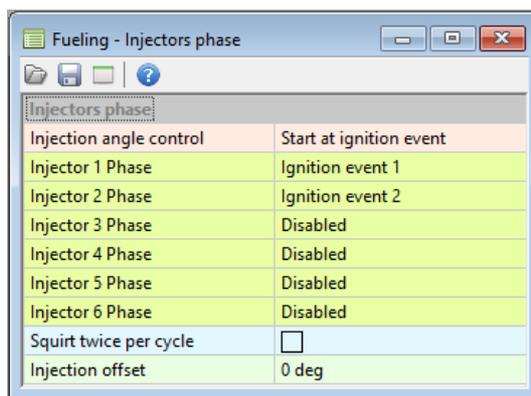


Figura 69 - Configuração da fase dos injetores

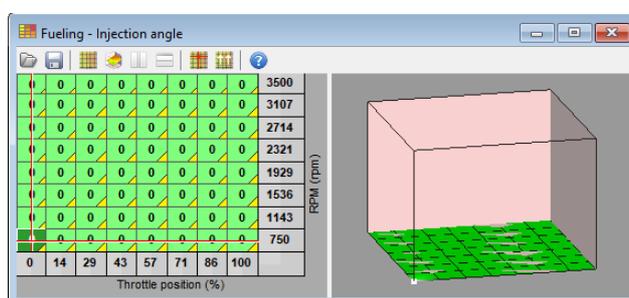


Figura 70 - Tabela de configuração do ângulo de injeção

O início da injeção de água, tal como para a injeção de gasolina, pode ser definido com início num ângulo antes do PMS da fase de compressão, dado pela tabela "Injection angle". O ângulo refere-se ao PMS do cilindro que se encontra conectado ao evento de ignição ao qual o injetor está associado. Nesta situação, com a associação entre um determinado injetor e um evento de ignição e com a variação dos valores do ângulo de injeção da tabela, é possível iniciar a injeção de água em qualquer instante do ciclo do motor. O tempo de abertura para a injeção de água pode ser ajustado através da janela da Figura 71, onde é possível aplicar ao tempo de abertura uma correção entre 0 e 200 %.

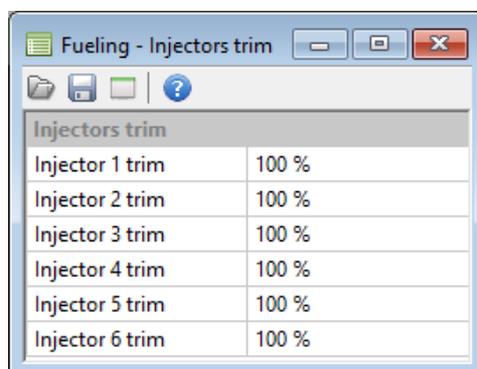


Figura 71 - "Injectors trim"

O tempo de abertura do injetor, calculado pelo controlador, pode ser constantemente monitorizado pelo valor de “*Injectors PW*” da janela da Figura 72.

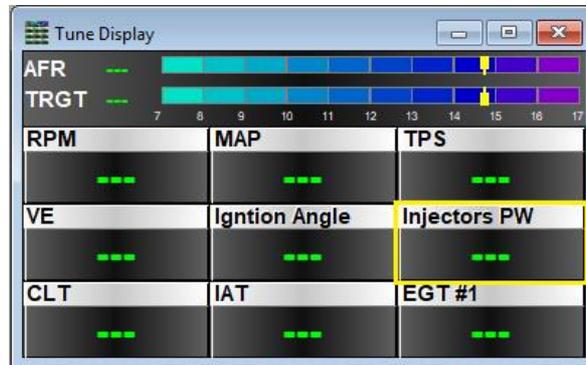


Figura 72 - "Tune Display": "*Injectors PW*", assinalado a amarelo.

3.7 Configuração dos Avanços de Ignição

Desde a ocorrência da faísca na vela de ignição até à combustão completa da mistura e a correspondente elevação da pressão decorre um intervalo de tempo. Sendo assim, para que a subida da pressão ocorra no ponto ótimo (após o PMS, com o pico da pressão à volta de 10° após o PMS), é necessário que a faísca ocorra antes do PMS. Esta antecipação da faísca tem o nome de avanço de ignição e é definida em graus de rotação da cambota antes do PMS. Um valor de avanço de ignição positivo indica que a ocorrência da faísca se dá num ângulo anterior ao PMS e, pelo contrário, um valor de avanço de ignição negativo indica que a ocorrência da faísca se dá num ângulo posterior ao PMS.

No controlador, o valor do avanço de ignição é obtido pela seguinte equação:

$$\begin{aligned} & \text{Angle} \\ & = \text{IGN}(\text{load}, \text{rpm}) + \text{CYLCorr}(\text{cyl}) + \text{IATCorr} + \text{CLTCorr} + \text{KSCorr} + \text{IDLECorr} + \text{LCCorr} \\ & \quad + \text{Nitro}(\text{load}, \text{rpm}) + \text{TPSvsMAP}(\text{tps}, \text{MAP}) \end{aligned} \quad (8)$$

Onde:

- “*IGN (load, rpm)*” é o valor do ângulo definido no mapa de ignição;
- “*CYLCorr (cyl)*” é a correção do ângulo de ignição definida para cada evento de ignição;
- “*IATCorr*” é a correção da ignição baseada na temperatura do ar de admissão;
- “*CLTCorr*” é a correção da ignição baseada na temperatura do líquido de arrefecimento do motor;

- “*KSCorr*” é a correção do ângulo de ignição baseada na ocorrência de *knock*;
- “*IDLECorr*” é a correção do ângulo de ignição baseada na estratégia de controlo do *ralenti*;
- “*LCCorr*” é a correção do ângulo de ignição baseada na estratégia de “*Launch Control*”;
- “*Nitro (load, rpm)*” é a correção do ângulo de ignição baseada na tabela de modificação de ignição, que é responsável pela modificação do ângulo de ignição durante a injeção de óxido nítrico;
- “*TPSvsMAP (tps, MAP)*” é a correção do ângulo de ignição baseada na tabela de ignição TPSvsMAP.

Como não foram usadas quaisquer correções, o avanço de ignição é apenas definido pelo valor do mapa de ignição. Os avanços de ignição são definidos ponto a ponto no mapa de ignição, para várias rotações do motor e para várias posições do acelerador. O valor de avanço de ignição em cada ponto, para uma rotação e uma posição do acelerador, deve ser definido de forma a que a maior parte da pressão gerada pela combustão seja convertida em trabalho pelo motor, ou seja, de forma que a potência do motor seja máxima para esse ponto. O aumento do avanço de ignição promove um aumento da pressão no cilindro. Contudo, o avanço de ignição pode ser limitado pelo efeito de detonação (*knock*). A detonação ocorre quando a temperatura e a pressão da mistura não queimada excede determinados valores, causando autoignição detonante em pontos quentes da câmara de combustão e causando frentes de chama secundárias com propagação sónica onde são atingidas temperaturas elevadíssimas que levam à rápida deterioração do motor, pelo que este fenómeno deve ser evitado. Sendo assim, o avanço de ignição deve ser aumentado até se obter a potência máxima sem que ocorra *knock*. A informação acerca da ocorrência de *knock* pode ser obtida ligando-se um sensor de *knock* ao controlador e efetuando as configurações necessárias.

Na Figura 73 é mostrado o mapa de ignição onde são definidos os avanços de ignição para os vários pontos de rotação e de posição do acelerador.

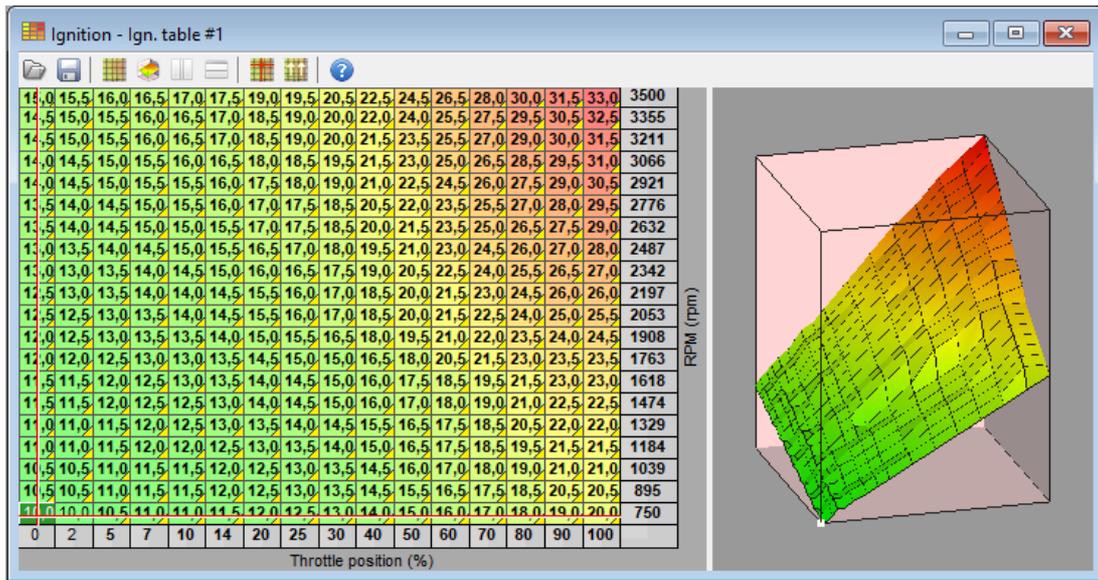


Figura 73 - Mapa de avanços de ignição

4. FREIO - GERADOR SÍNCRONO MONOFÁSICO SEM ESCOVAS

O freio utilizado neste projeto é o gerador síncrono monofásico sem escovas, que já se encontrava mecanicamente acoplado à máquina primária, como se pode ver pela Figura 74.



Figura 74 - Conjunto motor-gerador: A - Gerador; B - Máquina primária.

Na Figura 75 é mostrada a placa onde são indicadas as características do gerador.

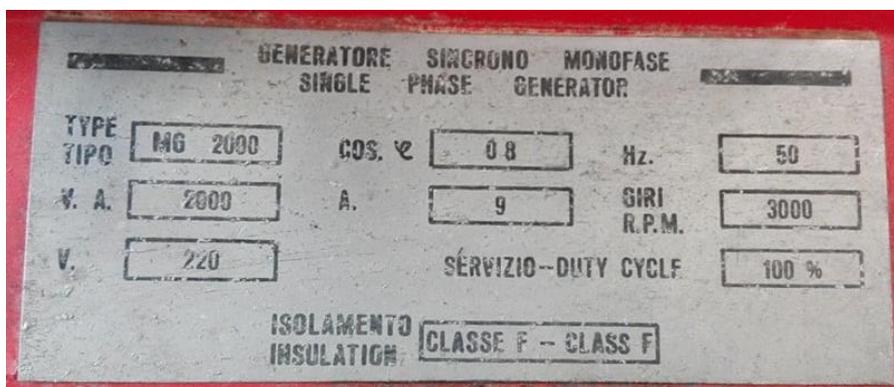


Figura 75 - Características do gerador

Na Figura 76 é apresentada a tensão de saída do gerador, em vazio, para várias rotações. Para 3000 RPM tem-se que a tensão é de cerca de 230 V, decrescendo à medida que a rotação diminui. Para valores de rotação abaixo de 2200 RPM tem-se que a tensão de saída é praticamente nula.

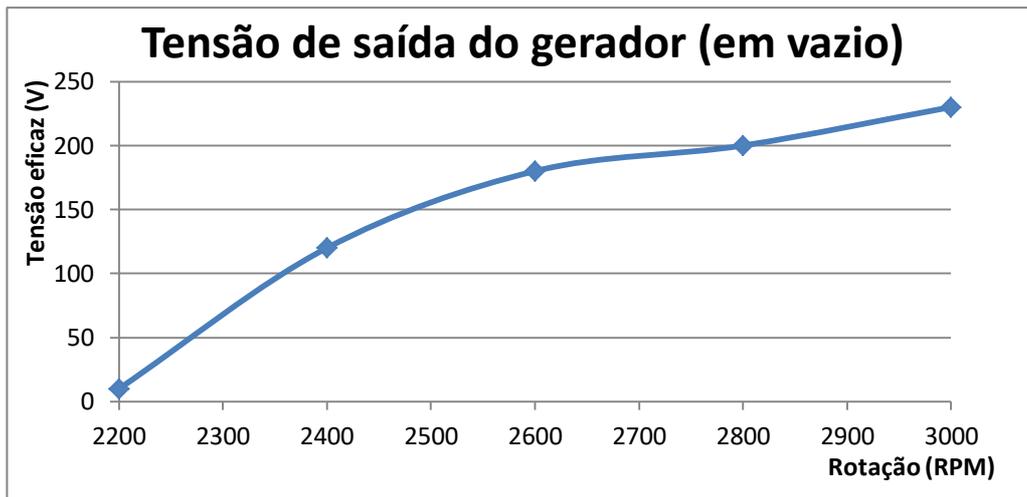


Figura 76 - Tensão de saída do gerador, em vazio, para várias rotações da máquina primária

Como, futuramente, os testes ao motor serão realizados apenas a uma determinada rotação, os controlos de acelerador e de potência na carga terão como objetivo manter o motor às 3000 RPM, que foi a rotação escolhida por ser a rotação nominal do gerador.

5. MÉTODOS UTILIZADOS NO CONTROLO DE ROTAÇÃO DO MOTOR

5.1 Controlo do acelerador

5.1.1 Atuador da Borboleta

No corpo de borboleta adquirido, o controlo da posição da borboleta era feito por cabo. O cabo era fixo na roldana, que está assinalada na Figura 77, sendo depois ligado a um pedal de acelerador, por exemplo. Desta forma, caso se pretendesse manter o acelerador numa posição constante, seria necessário segurar o pedal na mesma posição o que não seria muito prático tendo em vista a realização de testes.



Figura 77 - Corpo de borboleta: Roldana (assinalada a amarelo) para controlo da posição da borboleta

Sendo assim, optou-se por fazer o controlo do acelerador usando um servo como atuador da borboleta. Dado que a borboleta apresenta uma rotação de cerca de 90° entre a sua posição totalmente fechada e a sua posição totalmente aberta, o servo tem que ter um alcance de rotação maior ou igual a 90° . Além disso, o servo tem de apresentar um binário que seja suficiente para “segurar” a borboleta quando esta sofrer uma força devido à sucção por parte do motor na fase de admissão.

O servo escolhido foi o DF15RMG, que apresenta as seguintes especificações:

- Faixa do ângulo de rotação: 170° ;
- Binário: cerca de 19 kg.cm (a 7.4 V de alimentação);
- Tensão de alimentação: 5 - 7.4 V.

Para que fosse possível este controlo, o eixo do servo teve de ser fixado ao eixo da borboleta e para isso foi colada uma peça, que permite a ligação ao eixo do servo, na roldana como mostrado na Figura 78.



Figura 78 - Peça de fixação do servo colada na roldana

De seguida, foi feito um suporte para a fixação do servo ao corpo de borboleta. O resultado do acoplamento do servo ao eixo da borboleta de aceleração pode ser visto na Figura 79.



Figura 79 - Acoplamento entre servo e eixo da borboleta

Os três fios que fazem ligação ao servo são: castanho para ligação ao GND, vermelho para ligação à tensão de alimentação positiva (Vcc) e um laranja que é destinado ao sinal de controlo da posição do servo.

5.1.2 Sensor Utilizado no Controlo da Posição do Acelerador

Para que o microcontrolador, usado no controlo do acelerador, controle o servo de forma a manter a borboleta numa posição pretendida, necessita primeiro de saber a posição desejada para a borboleta. Para isso, foi usado um potenciômetro deslizante, mostrado na Figura 80, que permite que o utilizador ajuste a posição do acelerador para o valor pretendido. Este potenciômetro foi escolhido porque permite simplificar a interpretação da posição do acelerador, assim como, manter a referência da posição da borboleta constante sem que seja necessário “segurar” no acelerador quando se quer manter uma determinada posição de acelerador como acontece, por exemplo, no caso do acelerador de um automóvel. O uso do potenciômetro para o controlo da posição do acelerador permite assim uma maior comodidade na realização de testes ao motor.

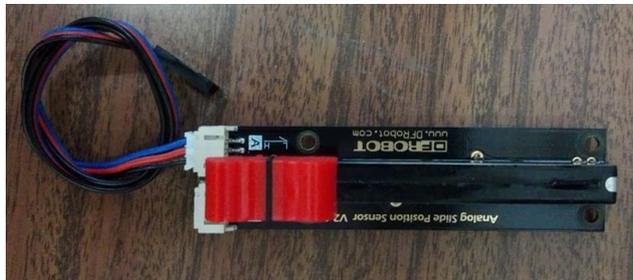


Figura 80 – Potenciômetro deslizante (DFR0053)

Este potenciômetro, tal como os outros, possui 3 pinos: um para ligação aos 5 V, outro para ligação ao GND e outro que é o sinal analógico de saída.

5.1.3 Sensor de Rotação

Para além do controlo manual da posição da borboleta através do potenciômetro, foi também implementado um controlo automático da borboleta de forma a manter a velocidade de rotação do motor constante. Este modo é útil quando se requer uma rotação constante durante a aplicação de diferentes binários de frenagem no eixo do motor.

Para implementar este controlo o microcontrolador precisa de saber a rotação do motor e para isso foi usado um sensor baseado num detetor de efeito Hall igual ao que usado como sensor de posição da árvore de cames. Como já foi visto, este sensor comuta a sua saída sempre que um íman passa na sua frente. Como tal, foi usada uma configuração de rodas dentadas em que um íman colado numa das rodas dentadas, como se vê pela Figura 81, passa na frente do sensor a cada duas voltas de

rotação do motor, permitindo a comutação da saída do sensor, que pode ser analisada pelo microcontrolador de forma a determinar a velocidade de rotação do motor.

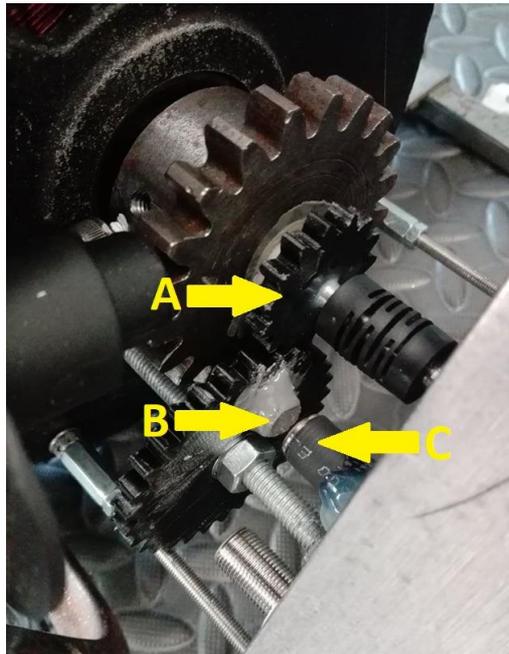


Figura 81 - Instalação do ímã e do sensor de efeito Hall: A- Roda dentada solidária com a cambota; B- Ímã; C-Sensor de efeito Hall.

5.1.4 Controlador

O controlador escolhido foi o Arduino UNO R3 (Figura 82) que é uma placa de desenvolvimento baseada no microcontrolador ATmega328 e que possui as seguintes características:

- Tensão de operação: 5 V;
- Tensão de alimentação: 7 – 12 V;
- 14 pinos digitais de entrada/saída, dos quais 6 podem ser usados como saídas PWM;
- 6 entradas analógicas.



Figura 82 - Arduino UNO R3

O *software* utilizado para a programação do microcontrolador foi o Arduino IDE e a linguagem de programação utilizada foi a linguagem C.

5.1.5 Esquema das Ligações para o Controlo do Acelerador

Para a alimentação do todo o circuito foi usada uma bateria de 12 V, que alimentou diretamente o arduino, e um step-down para redução da tensão da bateria para 5 V para alimentação do servo e do sensor de efeito Hall.

O step-down utilizado, com referência LM2596, é mostrado na Figura 83.

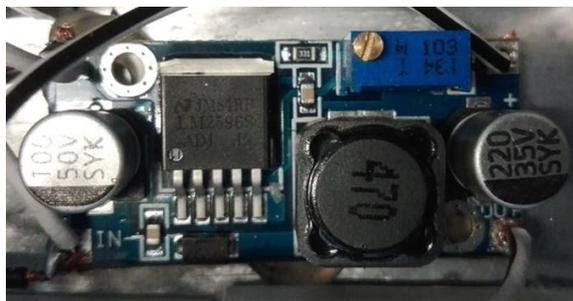


Figura 83 - Step-down LM2596

Foi ainda instalado um interruptor para seleção entre o modo “manual” e o modo “automático” de controlo do acelerador.

Na Figura 84 são apresentadas as ligações efetuadas para os componentes utilizados no controlo do acelerador.

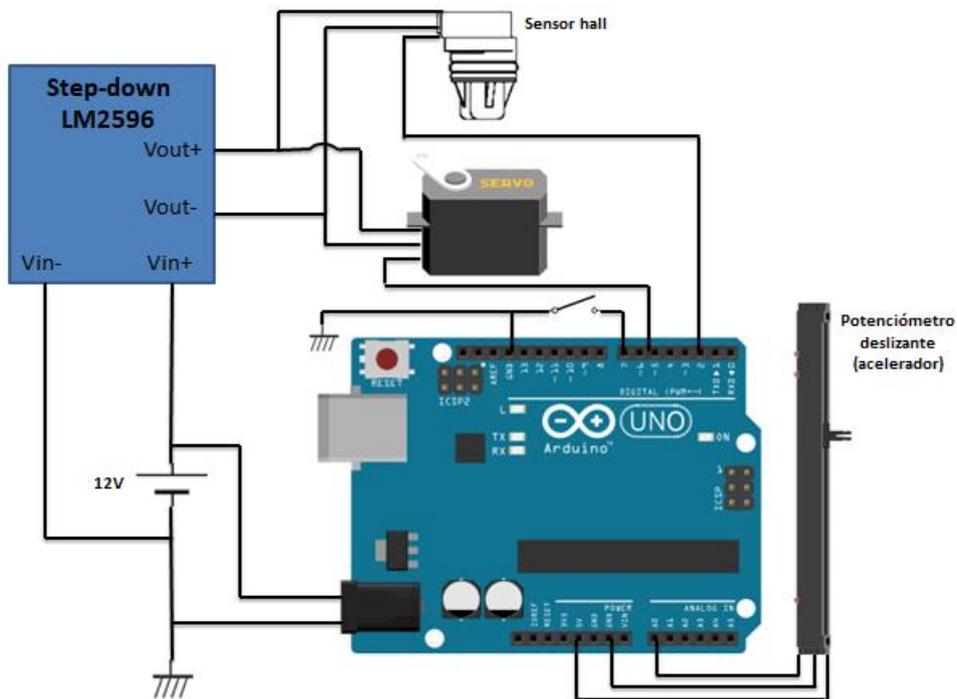


Figura 84 - Esquema de ligações para controle do acelerador

5.1.6 Implementação

De modo a escolher entre os modos “manual” e “automático” definiu-se o pino digital 7 como entrada com pull-up interno. Foi usado um interruptor entre o GND da placa e o pino 7. Caso o interruptor esteja aberto a entrada 7 assume o valor digital ‘1’, caso contrário, assume o valor digital ‘0’, permitindo assim a seleção entre o modo “manual” ou modo “automático”.

No modo “manual” começou-se pela ligação da saída do potenciômetro a uma entrada analógica (A0) que permite a leitura da tensão de saída do potenciômetro. Os valores obtidos encontram-se entre 0 e 1023 (correspondentes à tensão lida, entre 0 e 5 V) e correspondem à percentagem de acelerador, entre 0 e 100 %. O fio destinado ao sinal de comando do servo foi ligado no pino digital 5, que foi configurado como uma saída destinada ao controlo do servo. A posição do servo foi controlada recorrendo-se à função “servo.write (ângulo)”, onde “servo” é uma variável do tipo Servo, sendo apenas necessário definir a posição pretendida para o servo. O valor obtido para a posição do potenciômetro, entre 0 e 1023, foi então convertido para um valor entre 65 e 152. Os valores 65 e 152 correspondem, respetivamente, aos limites mínimo e máximo para a posição do servo visto que a borboleta encontra-se na posição totalmente fechada quando o valor definido para a posição do servo é 65 e totalmente aberta quando o valor definido para a posição do servo é 152. A conversão do valor lido no potenciômetro entre 0 (0 % de acelerador) e 1023 (100 % de acelerador) para um valor entre

65 e 152, relativo à posição do servo, permite controlar a abertura da borboleta entre 0 e 100 % da sua abertura máxima.

No modo “automático” começou-se por definir o pino digital 2 como interrupção externa. A interrupção foi configurada de modo a ser ativada por “falling”, ou seja, quando o estado do pino for de *HIGH* para *LOW*. A saída do sensor de rotação usado foi ligada a este pino, acionando a interrupção sempre que o íman passa na frente do sensor dado que a tensão de saída do sensor sofre uma queda sempre que o íman passa na sua frente. Sendo assim, foi possível o cálculo da rotação do motor com base do tempo que decorre entre interrupções. Como a velocidade de um motor monocilíndrico apresenta alguma irregularidade, o cálculo da velocidade de rotação pode ser baseado na soma do intervalo de tempo de algumas interrupções seguidas de forma as oscilações na velocidade calculada. O controlo da posição do servo foi feito recorrendo a um controlo PI (proporcional integral).

O controlo PID (proporcional integral derivativo) é uma técnica de controlo que une as ações proporcional, integral e derivativa de forma a calcular um valor de atuação sobre o processo tendo apenas informação acerca do valor desejado para a variável do processo e do valor real da variável do processo. A ação proporcional apresenta uma correção proporcional ao erro, ou seja, a correção a ser aplicada aumenta na mesma proporção do erro (o erro é dado pela diferença entre o valor real e o valor desejado para a variável do processo). A ação integral apresenta uma correção proporcional ao produto do erro pelo tempo que possibilita que sejam corrigidos erros que permanecem ao longo do tempo. A ação derivativa apresenta uma correção proporcional à taxa de variação do erro permitindo assim uma correção antecipada do erro.

O algoritmo PID pode ser definido pela seguinte equação:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (9)$$

Onde:

- K_p – Ganho proporcional;
- K_i – Ganho integral;
- K_d – Ganho derivativo;
- e – Erro;
- t – Tempo;
- τ – Tempo de integração.

No controlo do servo não foi usada a ação derivativa visto que a velocidade de rotação apresenta uma constante variação (pequenas oscilações em torno de uma velocidade de rotação mesmo para as mesmas condições de teste do motor), que por ser natural do motor utilizado não necessita de uma constante correção por parte da ação derivativa. Os ganhos proporcional e integral do controlo PI implementado foram ajustados por tentativa e erro até se obter uma boa resposta do motor à aplicação de binários de frenagem no eixo do motor, assim como, a estabilidade da velocidade de rotação do motor. O valor do erro foi dividido por 10 de modo a operar com valores de erro mais pequenos e, conseqüentemente, ganhos maiores. O ganho definido para a ação proporcional, tal como o ganho da ação integral, foi de 0,1. Ao valor obtido pelo controlo PI para a posição do servo foi aplicada uma histerese entre 65 e 152 que, como foi visto, representam os valores limite de abertura da borboleta.

5.2 Controlo da Potência na Carga Ligada ao Gerador

De forma a ser possível realizar testes ao motor de combustão, foi necessária a utilização de um freio que aplicasse um binário de frenagem ao eixo do motor. Para isso utilizou-se o gerador apresentado anteriormente com uma carga a ele ligado. O controlo do binário de frenagem aplicado foi então feito pelo controlo da potência na carga ligada ao gerador.

Para o controlo da potência na carga ligada ao gerador foi adquirido o *dimmer* de 4000 W da Figura 85.



Figura 85 – Dimmer 4000 W

O princípio de funcionamento do circuito *dimmer* é baseado no controlo do ângulo de disparo de um TRIAC. Variando o ponto do semiciclo do sinal sinusoidal de energia em que o disparo do TRIAC ocorre, é possível variar a potência aplicada a uma carga. Desta forma, a potência na carga será máxima quando o disparo ocorre no início do semiciclo, diminuindo à medida que o instante do disparo do TRIAC se aproxima do final do semiciclo.

O circuito do *dimmer* que foi utilizado é apresentado na Figura 86.

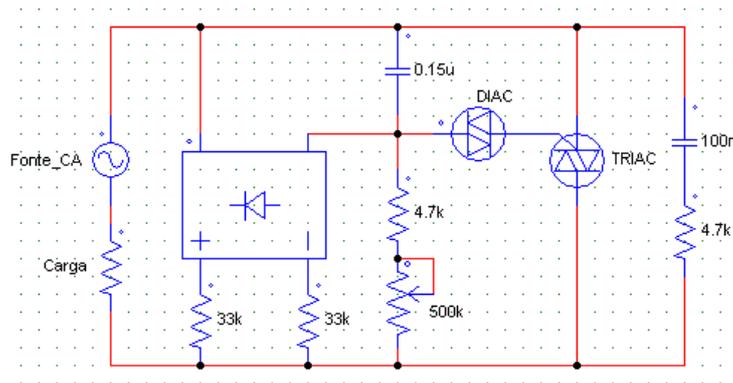


Figura 86 - Circuito do *dimmer*

No circuito *dimmer*, o disparo do TRIAC é obtido usando-se um condensador, uma resistência variável e um DIAC.

O TRIAC é um semicondutor que é capaz de bloquear tensões e conduzir correntes em ambos sentidos, sendo equivalente a dois SCR ligados em antiparalelo com *gate* comum. O disparo do TRIAC é feito aplicando-se um impulso de corrente na *gate*. Os TRIACs são normalmente disparados por DIACs, como acontece no circuito *dimmer*. O DIAC é um diodo de disparo bidirecional que conduz corrente apenas quando a tensão de disparo é atingida e interrompe a condução quando a corrente passa abaixo do valor da corrente de corte.

Em cada semiciclo do sinal sinusoidal, o condensador do circuito *dimmer* vai carregar e, quando for atingida a tensão de disparo do DIAC, este entrará em condução fazendo com que um impulso de corrente seja aplicada na *gate* do TRIAC, fazendo com que este entre também em condução. O ângulo de disparo do TRIAC irá variar de acordo com a posição do potenciômetro (resistência variável). Com o potenciômetro na posição de resistência máxima, o condensador demora mais tempo a atingir a tensão de disparo do DIAC, fazendo com que o disparo do TRIAC ocorra no final do semiciclo. Com o potenciômetro na posição de resistência mínima, o condensador demora menos tempo a atingir a tensão de disparo do DIAC, fazendo com que o disparo do TRIAC ocorra no início do semiciclo (potência máxima na carga) e, pelo contrário, quando o potenciômetro está na posição de resistência máxima, o condensador demora mais tempo a atingir a tensão de disparo do DIAC, fazendo com que o disparo

do TRIAC ocorra no início do semiciclo (potência mínima na carga). O controle da posição do potenciômetro permite assim controlar o ângulo de disparo do TRIAC que, por sua vez, permite variar a potência entregue à carga.

Com o *dimmer*, o controle da potência na carga é apenas manual visto que é controlado pelo potenciômetro. Para se implementar, além do modo “manual”, um modo “automático” tal como o que foi implementado para o acelerador, o potenciômetro teve de ser substituído por um componente onde a resistência pudesse ser variada recorrendo de algum modo a um microcontrolador. Para se escolher e determinar as características do componente foi medida a queda de tensão no potenciômetro para vários valores de resistência, obtidos em várias posições do cursor. Na Figura 87 é mostrada, a vermelho, a queda de tensão no potenciômetro para dois casos, na posição máxima de resistência a 488 k Ω e na posição de resistência de 200 k Ω . Os sinais da Figura 87 apresentam uma atenuação de 10 vezes, pelo que terá de se multiplicar o sinal obtido por 10 de modo a obter os valores reais. Outros casos são ainda apresentados na Tabela 5, onde é indicada a queda de tensão eficaz no potenciômetro para os diferentes valores de resistência, que foi obtida através da equação (10).

$$V_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T [v(t)]^2 \cdot dt} \quad (10)$$

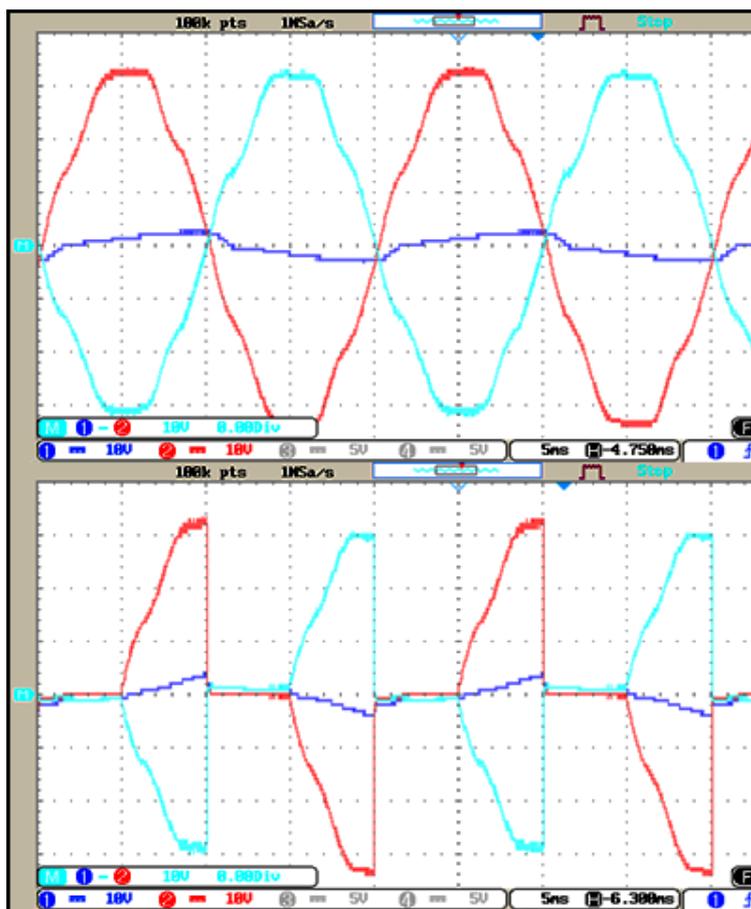


Figura 87 – Tensão nos terminais do potenciômetro (vermelho e azul escuro) e queda de tensão no potenciômetro (azul ciano): resistência de 488 k Ω (limite máximo de resistência), em cima, e resistência de 200 k Ω , em baixo.

Na equação (10) considerou-se que o sinal da queda de tensão tem um valor de pico de cerca de 320 V e que pode ser definido pela função seno.

Tabela 5 - Queda de tensão no potenciômetro para vários valores de resistência e respetiva potência

Resistência no potenciômetro (k Ω)	Vrms (V)	Potência (W)
488	226	0.1
400	223	0.12
300	209	0.15
200	160	0.13
100	106	0.11
50	68	0.26
25	50	0.09
10	18	0.03

Como a tensão máxima obtida aos terminais do potenciômetro é de cerca de 320V e o maior valor de potência é de cerca de 0.26 W, o componente terá de suportar tensões de pelo menos 320 V e valores de potência acima de 0.26 W. O componente que foi utilizado para substituir o potenciômetro foi um LDR (*Light Dependent Resistor*), com referência NSL 4960, de 0.5 W que pode operar com tensões até 320 V e que apresenta uma resistência de 1 M Ω no escuro.

O controle do valor de resistência do LDR foi feito através do controle do brilho de um LED ligado ao microcontrolador. O LED e o LDR foram introduzidos dentro de um encapsulamento para que a luz exterior não interferisse no controle. Deste modo, o controle da potência na carga é definido pelo controle do brilho do LED em vez do controle da posição do potenciômetro.

5.2.1 Esquema de Ligações para Controle da Potência na Carga

No controle da potência na carga, através do controle do brilho do LED, foi usado o mesmo sensor de efeito Hall do controle do acelerador, para determinação da velocidade de rotação do motor. Além disso, foi adicionado um potenciômetro deslizante, um interruptor e um LED.

O esquema de ligações para o controle do brilho do LED e, conseqüentemente para o controle da potência na carga, é apresentado na Figura 88.

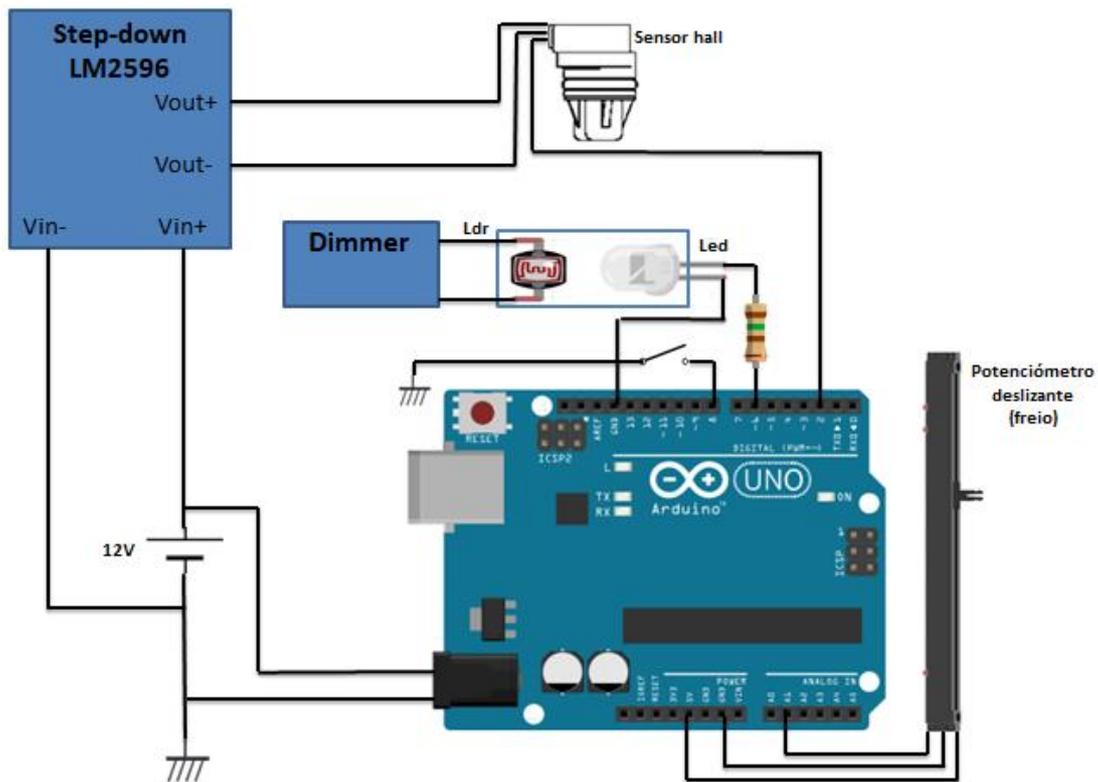


Figura 88 - Esquema de ligações para controlo do brilho do LED

5.2.2 Implementação

De modo a escolher entre os modos “manual” e “automático” foi usado um interruptor com as mesmas configurações adotadas para a seleção dos modos no controlo do acelerador.

No modo “manual” começou-se pela ligação da saída do potenciômetro deslizando à entrada analógica A1. Os valores lidos variam entre 0 e 1023 e são posteriormente convertidos em valores para escrita no pino digital que se encontra ligado ao LED. No pino digital, usado como saída PWM para ligação ao LED, podem ser definidos valores entre 0 (sempre desligado) e 255 (sempre ligado) correspondendo, respetivamente, a valores de tensão média de saída entre 0 e 5 V, ou seja, valores de *duty cycle* entre 0 e 100 %. Para 0 V o LED encontra-se apagado e para 5 V o LED apresenta brilho máximo. O ânodo do LED foi então ligado ao pino digital 5, e o cátodo foi ligado através de uma resistência (150 Ω), limitadora de corrente, ao GND do microcontrolador.

No modo “automático” foi usado o valor da velocidade do motor, que já é obtido no controlo do acelerador, e um controlo PI para controlar o brilho do LED de forma a que a potência na carga ligada ao gerador seja tal que o binário de frenagem aplicado ao eixo do motor faça com que o motor mantenha a rotação pretendida. O ajuste de ganhos, tal como no controlo do acelerador, foi feito por

tentativa e erro de forma a que a resposta do sistema tendesse para a resposta desejada e que o sistema se mantivesse estável na rotação pretendida. Sendo assim, o objetivo foi obter um comportamento de controlo da rotação do sistema aceitável e não um comportamento específico. O valor do erro foi dividido por 10 de modo a operar com valores de erro mais pequenos e, consequentemente, ganhos maiores. O comportamento referido para o sistema foi obtido com um ganho proporcional de 0,2 e com um ganho integral de 0,1.

6. INTERFERÊNCIAS ELETROMAGNÉTICAS (EMI)

A interferência eletromagnética é um campo ou onda elétrica ou magnética que pode ou não alterar o funcionamento ou danificar um equipamento ou um dispositivo. A propagação da interferência eletromagnética pode-se dar por radiação, condução e/ou acoplamentos capacitivos ou indutivos.

Em automóveis com motores de combustão interna por exemplo, existem várias fontes de interferências eletromagnéticas tais como o sistema de ignição, que utiliza uma alta tensão e produz pequenos impulsos que geram um vasto espectro de frequências, os motores elétricos usados nas bombas de combustível e nos motores de arranque, os injetores, entre outros. As cablagens em automóveis transportam uma grande variedade de sinais desde alimentações de motores elétricos a transporte de dados dos sistemas. Dado que estes condutores se encontram agrupados ocorre o aumento dos níveis de ruído, picos de tensões e correntes indesejadas, perda de sincronismo em sistemas digitais, entre outros [27].

Os problemas relacionados com as interferências eletromagnéticas também são muito comuns em indústrias e fábricas devido ao uso de máquinas e motores em áreas próximas a redes de computadores por exemplo. Sendo assim, estas interferências podem causar diversos problemas tais como falhas na comunicação entre dispositivos de uma rede de equipamentos e/ou computadores, queima de componentes e circuitos eletrônicos, ruídos na alimentação, atuação de relés sem que haja comando de atuação, geração de alarmes sem motivo, leitura errada de sensores, entre outros [27].

A eletricidade estática, resultante da acumulação de cargas elétricas pelo corpo humano por exemplo, é outra possível fonte de interferências. As descargas eletrostáticas devido ao contacto com dispositivos eletrônicos podem degradar ou destruir as características elétricas desses dispositivos.

6.1 Técnicas de Supressão de Interferências Eletromagnéticas

Os métodos utilizados para suprimir as interferências eletromagnéticas são baseados em três pontos de atuação:

1. Na fonte de ruído - suprimir a emissão de interferências na origem;
2. No meio de acoplamento - obstruir o caminho de acoplamento entre a fonte e a vítima da interferência;
3. No circuito vítima - tornar o recetor menos suscetível à interferência.

Alguns métodos para supressão são [27]:

- Uso de cabo de par trançado que consiste no enrolamento de um par de fios em espiral e pode ser utilizado para reduzir o ruído devido ao efeito do cancelamento;
- Utilizar malha no cabo, que deve ser ligada ao potencial de referência numa das extremidades;
- Separar cabos de dados de cabos de energia;
- Evitar o uso de emendas nos cabos;
- Utilizar filtros de linha, ferrites para cabo, supressores de transientes e isoladores óticos quando possível;
- Colocar blindagem (chapas metálicas ou plásticos condutivos, por exemplo) na fonte de ruído, diminuindo a intensidade dos campos no exterior da blindagem, e/ou no circuito vítima, diminuindo a intensidade dos campos no interior da blindagem;
- Manter a área de qualquer instalação elétrica o mais pequena possível.

Nos automóveis com motores de combustão interna podem ainda ser usadas velas de ignição com resistência incorporada que permitem reduzir as interferências geradas quando ocorre a faísca [28].

É difícil definir métodos de reduzir as interferências eletromagnéticas para todos os componentes de um motor por exemplo, pois as interferências dependem da sua localização, geometria, tamanho, forma e a sua composição. Para encontrar a melhor solução para o problema são necessárias várias tentativas e técnicas para redução das interferências.

6.2 Técnicas Utilizadas neste Projeto

Cada projeto deve ser implementado tendo em vista a redução das interferências eletromagnéticas. Os cabos de um sistema podem permitir várias formas de acoplamento de perturbações eletromagnéticas e, como tal, dada a existência de cabos que transportam sinais sensíveis e outros que transportam sinais que podem criar muita interferência torna-se imprescindível um maior cuidado na instalação destes cabos. A blindagem pode ser usada tanto para conter uma fonte de perturbação eletromagnética, evitando a poluição do ambiente, como também no sentido de proteger um circuito contra campos eletromagnéticos exteriores. A necessidade de utilização de blindagens numa instalação prende-se com o facto de existirem campos eletromagnéticos que podem perturbar o desempenho do sistema em questão e/ou o desempenho de sistemas vizinhos. Mesmo sem problemas de interferência

devem ser usadas blindagens, tendo em vista a instalação de sistemas futuros como, por exemplo, sistemas de aquisição de dados que podem apresentar alguma suscetibilidade às interferências causadas por este sistema.

Neste projeto foram então utilizados cabos com malha em todos os sensores e atuadores, como se pode ver pelo exemplo da Figura 89 (indicado pelas setas a amarelo), para a bobina de ignição e para o sensor da cambota. As malhas de todos os cabos foram aterradas no mesmo ponto do bloco do motor, onde foi ligado o negativo da bateria.

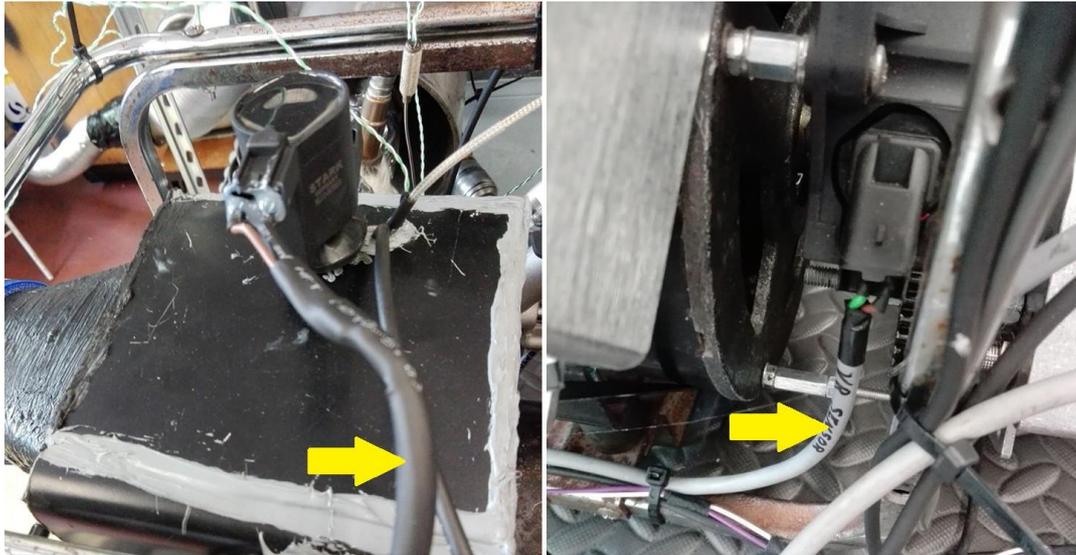


Figura 89 - Uso de cabo com malha na bobina (esquerda) e no sensor da cambota (direita)

Para além disso, foi usada uma vela de ignição com resistência incorporada, mostrada na Figura 90, de forma a minimizar as interferências geradas no momento da faísca.



Figura 90 - Vela de ignição RJ19LM

Na implementação do controlo do acelerador foram utilizados cabos com malha para ligação ao servo e ao sensor de efeito Hall e no controlo do brilho do LED foi também utilizado cabo com malha para ligação do LED ao arduino. As malhas dos cabos foram ligadas ao negativo da bateria que foi utilizada para alimentação dos circuitos destes controlos. De forma a proteger o arduino, que foi usado tanto

para o controlo do acelerador como para o controlo da potência na carga, de campos eletromagnéticos exteriores, foi usada uma caixa metálica, dentro da qual se realizaram as ligações necessárias. A caixa metálica, com os interruptores e potenciômetros para controlo do acelerador e da potência na carga, é mostrada na Figura 91.



Figura 91 – Tampa da caixa metálica usada para alojamento do arduino e instalação de interruptores e potenciômetros

7. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

7.1 Medição Ângulos Reais da Ocorrência de Injeção e de Ignição

Para que fosse possível determinar o ângulo de rotação da cambota, tendo como base uma referência, foi usado um *encoder* rotativo incremental ligado ao eixo da cambota.

O *encoder* tem a referência E6B2-CWZ3E e apresenta uma resolução de 3600 impulsos/rotação. O *encoder* possui 5 fios: o castanho é destinado à alimentação (Vcc), o preto é a saída da fase A, o branco é a saída da fase B, o laranja é a saída da fase Z e o azul é destinado à ligação aos 0 V (comum). Como o *encoder* utilizado tem uma resolução de 3600 impulsos por rotação, na fase A e na fase B vão ser gerados 3600 impulsos, apresentando defasamento entre as fases. Na fase Z vai ser gerado apenas um impulso por cada rotação.

Para a leitura dos sinais do *encoder* foi usada uma placa de aquisição de dados que atua como uma interface entre o computador e os sinais recebidos do *encoder*. No computador o *software* utilizado foi o LabView.

Como os valores definidos no *software* da EMU, para o mapa dos avanços de ignição e para o mapa de início ou fim da injeção, são baseados no PMS, foi necessário determinar a posição em que o pistão atinge o PMS para se determinar os reais ângulos de ocorrência de ignição e de injeção. Para isso foi usado o impulso da fase Z como referência da posição do pistão no PMS. O impulso da fase Z ocorre apenas uma vez em cada volta (tal como o pistão atinge o PMS apenas uma vez por volta) e é sempre detetável pela leitura do sinal de saída da fase Z. Para determinar o PMS do pistão foi usado um sensor de efeito Hall linear, com a referência SS495A. Como a tensão de saída deste sensor varia proporcionalmente à força do campo magnético. A fonte de campo magnético utilizada foi um íman. A montagem usada, com o íman colado no pistão e o sensor fixo ao bloco do motor, é mostrada na Figura 92.

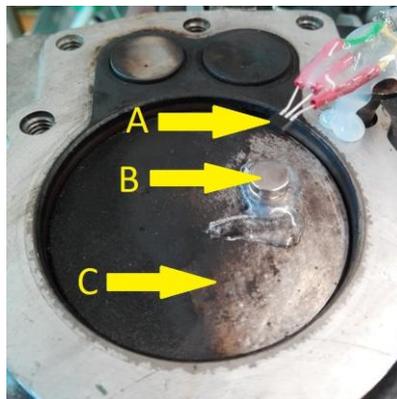


Figura 92 - Posição relativa entre sensor de efeito Hall e íman: A- Sensor de efeito Hall; B- Íman; C- Pistão.

À medida que o pistão vai subindo e o íman vai-se aproximando do sensor de efeito Hall, a tensão de saída deste vai aumentando, consequência da crescente força do campo magnético a que fica sujeito. A aquisição dos dados começou com o pistão um pouco antes do PMS e com a posição da cambota um pouco antes da ocorrência do impulso em Z. De seguida, rodou-se a cambota até o pistão ultrapassar um pouco o PMS e terminou-se a aquisição dos dados. Após a aquisição dos dados necessários e para permitir o posterior funcionamento do motor, foi removida a montagem da Figura 92. Na Figura 93 são mostrados os gráficos obtidos para o sinal da fase Z e para a tensão de saída do sensor de efeito Hall em função do ângulo de rotação da cambota medido a partir da posição em que a cambota se encontrava no início da aquisição dos dados. A determinação do ângulo de rotação foi possível devido à análise do sinal de saída da fase A do *encoder*, sendo que, entre dois impulsos consecutivos, a rotação é de 0,1 graus (360 graus/ 3600 impulsos).

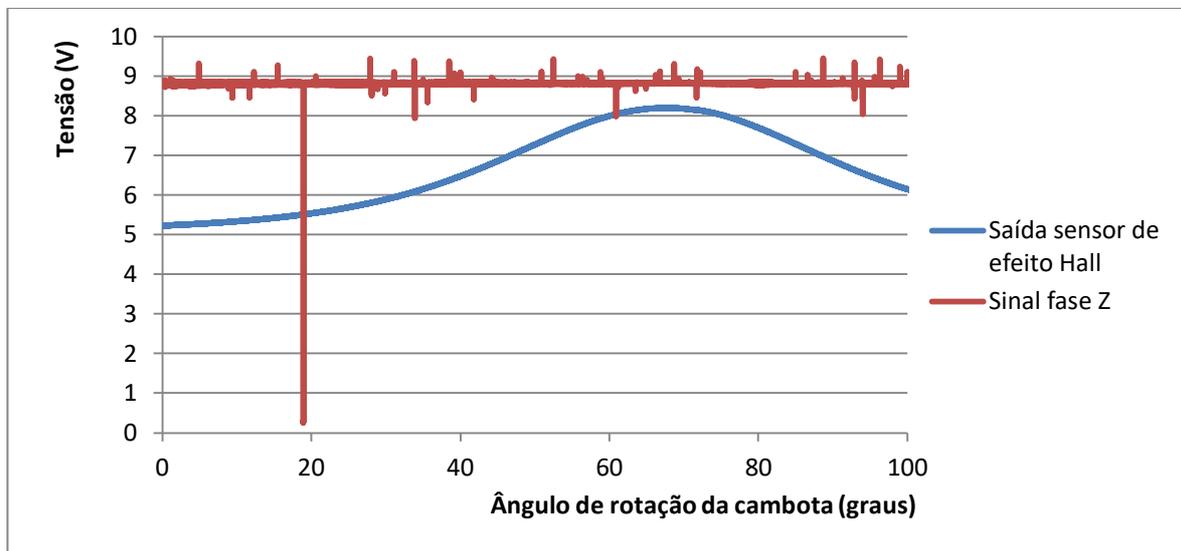


Figura 93- Sinal da fase Z e sinal de saída do sensor de efeito Hall em função do ângulo de rotação da cambota

O impulso do sinal da fase Z, que está invertido, ocorre aos 18,9° como mostra a Figura 94.

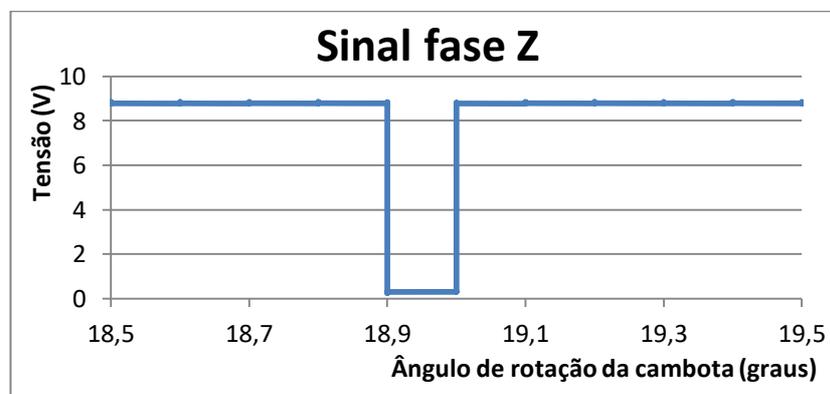


Figura 94 - Sinal da fase Z em função do ângulo de rotação da cambota

Na Figura 95 é mostrada a ampliação do sinal da tensão de saída do sensor de efeito Hall em torno do máximo. Para se determinar o ângulo de rotação para o máximo da tensão de saída no sensor de efeito Hall recorreu-se à função polinomial da linha de tendência, tendo-se obtido 68° , para o valor de tensão máximo 8,19 V.

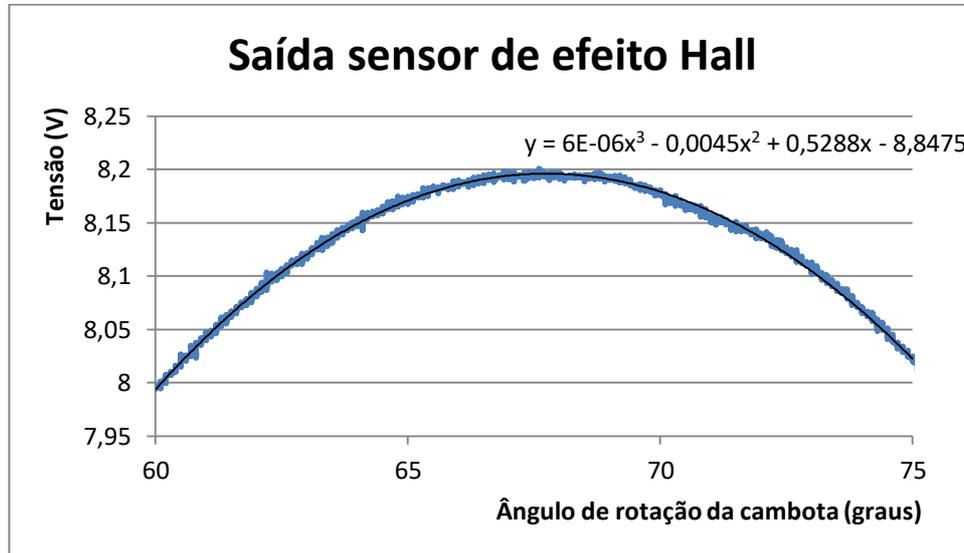


Figura 95 - Tensão de saída do sensor de efeito Hall em função do ângulo de rotação da cambota

A partir deste ponto, a aquisição de dados relativos à ocorrência de injeção e ignição podem ser baseados no impulso em Z, tendo em conta que este é adiantado $49,1^\circ$ ($68^\circ - 18,9^\circ$) do PMS.

Para se obter o real avanço de ignição em relação ao impulso de Z foi feita a aquisição da queda de tensão na resistência ($0,1 \Omega$) em série com o primário da bobina de ignição, que foi usada para analisar a corrente no primário da bobina de ignição. A aquisição de dados iniciou-se quando foi detetado o impulso em Z. O gráfico obtido foi o da Figura 96.



Figura 96 - Queda de tensão na resistência (em série com primário da bobina de ignição) em função do ângulo de rotação da cambota para um avanço de ignição de 15°

A faísca na vela de ignição ocorre quando é induzida a alta tensão no secundário da bobina de ignição, ou seja, quando é interrompida a corrente no primário. Depois de analisar o gráfico obteve-se que o instante da interrupção da corrente no primário ocorre aos 38,9° de rotação da cambota, sendo nesse instante que ocorre a ignição. Como o impulso em Z ocorre 49,1° adiantado do PMS, a ignição encontra-se adiantada 10,2° (49,1°-38,9°) em vez dos 15° definidos no mapa de ignição.

De forma a aproximar os valores reais aos valores teóricos foi ajustado o "Trigger angle" que tinha sido definido como 80° quando se configurou o "Primary trigger". Depois de alguns ajustes, o "Trigger angle" foi definido como 70° e obteve-se, para as mesmas condições, o gráfico da Figura 97.

Desta vez, a ignição ocorre aos 15,7° (49,1°-33,4°), sendo bem mais aceitável do que os 10,2° obtidos para o "Trigger angle" a 80°.

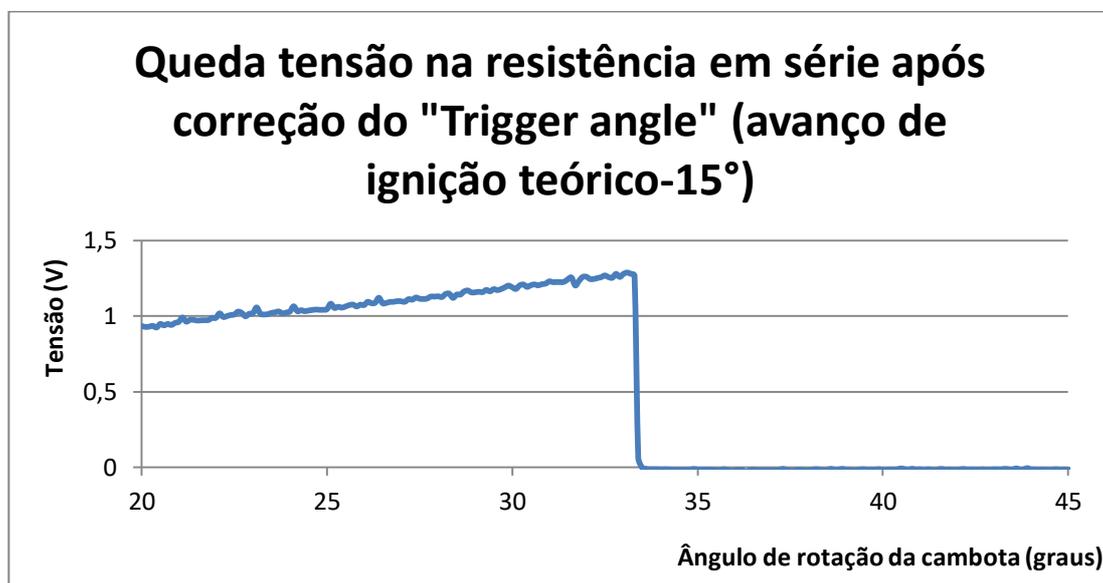


Figura 97 - Queda de tensão na resistência (em série com primário da bobina de ignição) em função do ângulo de rotação da cambota para um avanço de ignição de 15° após correção do "Trigger angle"

De seguida, para o mesmo valor de "Trigger angle" (70°), foi obtido o instante real de início da injeção. Foi também usada uma resistência em série com o injetor de gasolina, de forma a analisar a corrente no injetor. A abertura do injetor de gasolina foi associada ao 1° evento de ignição. O início de injeção foi definido na tabela de ângulo de injeção como 20° antes do PMS da fase de compressão.

Pela aquisição de dados obteve-se o gráfico da Figura 98. Depois de analisar o gráfico é possível concluir que o início de injeção acontece ao 29,6°, visto que é nesse momento que começa a existir queda de tensão na resistência, ou seja, que o injetor é alimentado eletricamente. Como a aquisição se inicia com o impulso de Z e como o PMS ocorre passados 49,1°, o início de injeção ocorre aos 19,5° (49,1°-29,6°).

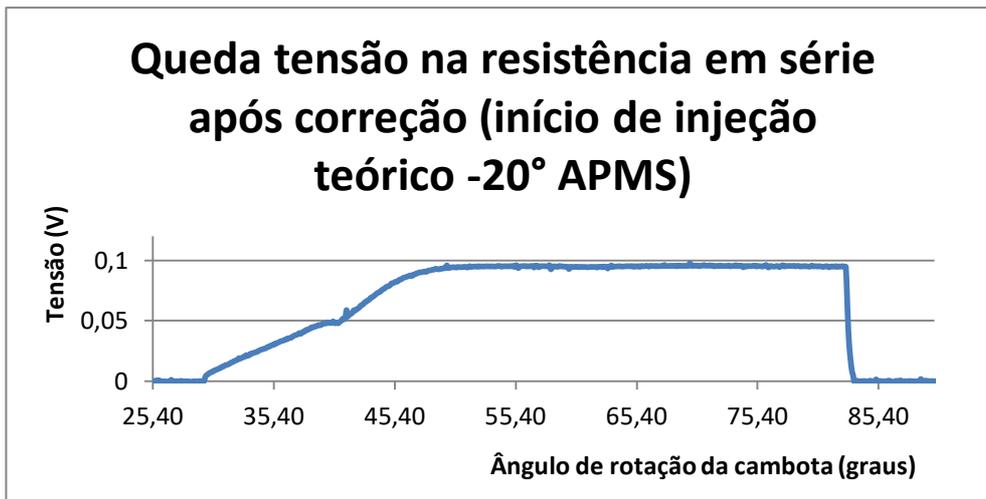


Figura 98 - Queda de tensão na resistência (em série com o injetor de gasolina) em função do ângulo de rotação da cambota para um início de injeção de 20° antes do PMS (20° APMS) após correção do "Trigger angle"

Como foram definidos dois cilindros para o motor, existem dois eventos de ignição.

De seguida associou-se a abertura do injetor de gasolina ao 2º evento de ignição e definiu-se 360° na tabela do ângulo de injeção, ou seja, o início da injeção deve coincidir com o PMS, dado que, neste caso, o 2º evento de ignição ocorre 360° depois do 1º evento de ignição e na tabela foi definido o início da injeção aos 360°, antes do PMS (neste caso, 360° antes do PMS associado ao 2º evento de ignição). O gráfico obtido foi o da Figura 99. Após analisar o gráfico concluiu-se que o início da injeção ocorre aos 48,7°, ou seja, apresenta uma diferença de apenas 0,4° (49,1°-48,7°) do PMS.

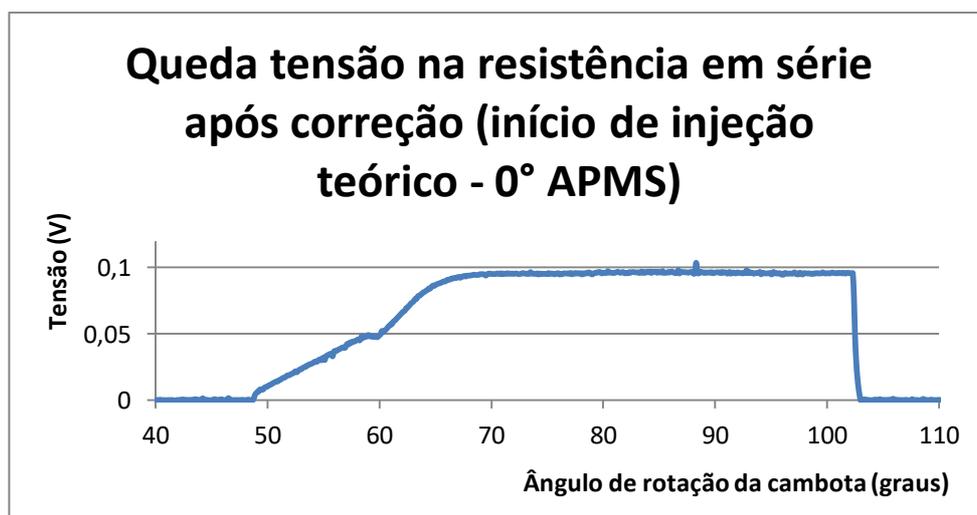


Figura 99 - Queda de tensão na resistência (em série com o injetor de gasolina) em função do ângulo de rotação da cambota para um início de injeção de 0° antes do PMS (2º evento de ignição- 360°APMS) após correção do "Trigger angle"

7.2 Potência na Carga Ligada ao Gerador em Função da Posição do Acelerador

Para a análise da potência na carga ligada ao gerador para várias posições de acelerador foi usada uma carga resistiva (aquecedor) de 2000 W. A potência na carga foi controlada, através do controle do *duty cycle* da saída do Arduino que se encontra ligada ao LED, de forma a manter a rotação do motor às 3000 RPM. Os testes foram realizados até uma potência de aproximadamente 2000 W (potência nominal do gerador). Os valores obtidos são os que constam na Tabela 6.

Tabela 6 - Potência na carga para várias posições de acelerador, às 3000 RPM e com avanço de ignição de 15°

V_{RMS} (V)	I_{RMS} (A)	Potência na carga (W)	Duty cycle (%)	Posição do acelerador (%)	Tempo de abertura do injetor (ms)
0	0	0	0	1	5,11
80	3,2	256	2,8	5	5,55
129	5,1	658	3,5	10	6,23
155	6,1	946	3,9	18	7,45
180	7,1	1280	5,1	26	8,68
183	7,2	1320	5,9	27	8,83
193	7,6	1470	7,8	30	9,29
200	7,8	1560	9,8	34	9,91
210	8,2	1720	11,8	38	10,5
218	8,4	1830	27,5	42	11,1
228	8,9	2030	100	50	12,1

Na Figura 100 é possível visualizar o gráfico da potência na carga em função do valor de *duty cycle* definido para a saída que se encontra ligada ao LED.

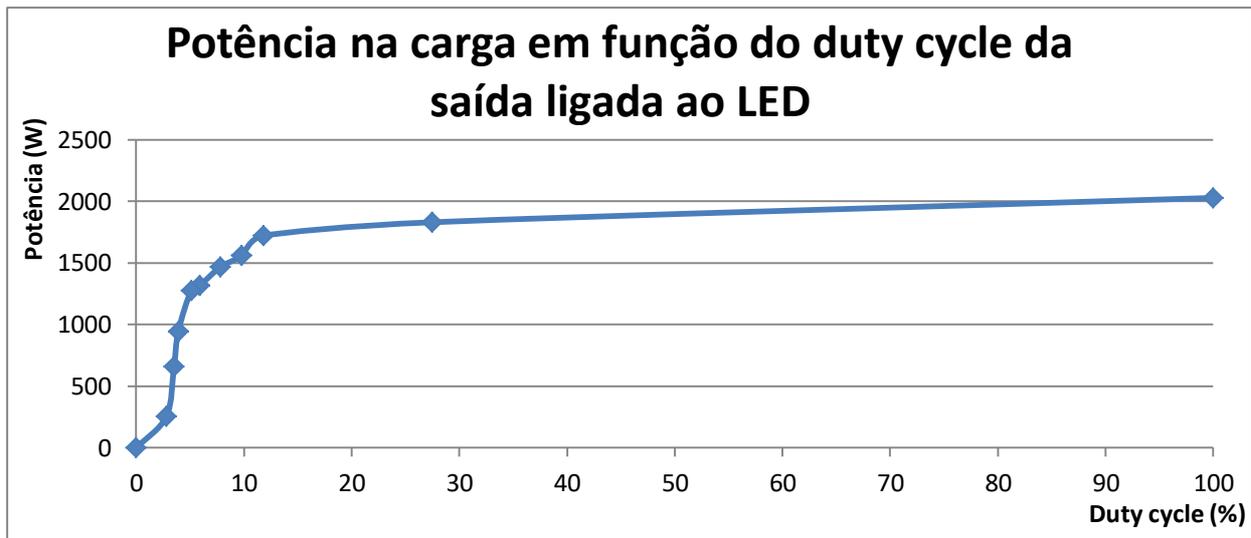


Figura 100 - Potência na carga em função do duty cycle da saída ligada ao LED

Os valores de potência na carga ligada ao gerador em função da posição de acelerador são apresentados na Figura 101, onde se pode concluir que a gama de posições de acelerador, para a realização de testes às 3000 RPM, se encontra entre 1 e 50 % (em % da abertura total da borboleta de aceleração).

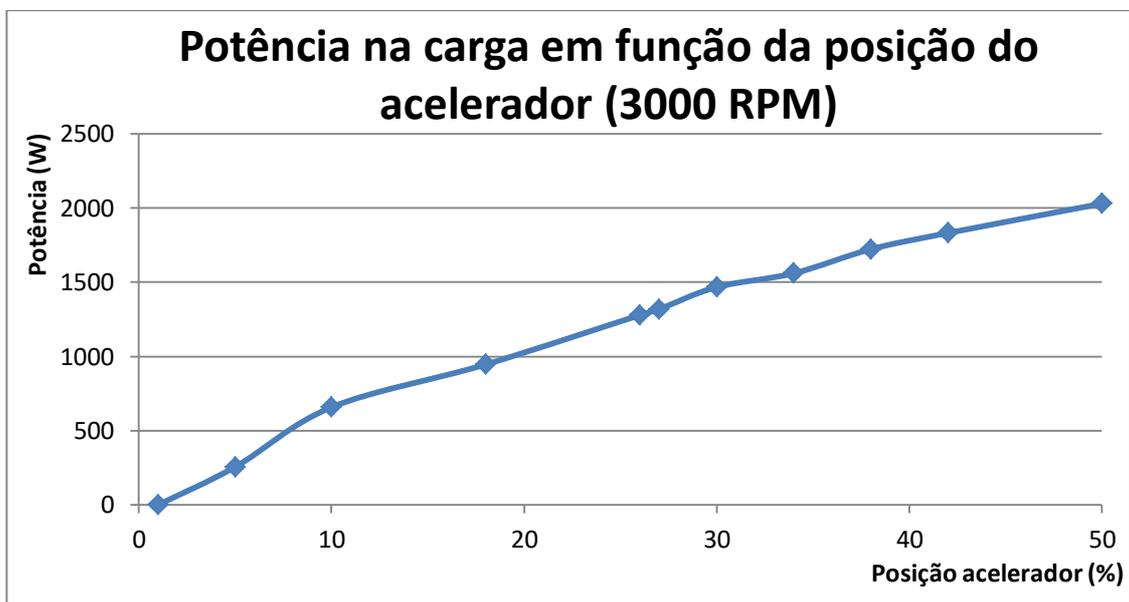


Figura 101 - Potência na carga em função da posição do acelerador (3000 RPM)

8. CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

8.1 Conclusões

Com o presente trabalho levou-se a cabo a adaptação de um pequeno motor de combustão interna para equipá-lo com um sistema eletrónico de injeção e ignição completamente controlável, incluindo um sistema de injeção direta de água. Também se implementou um sistema de controlo da carga do motor adaptando o gerador síncrono que estava originalmente acoplado ao motor. O objetivo global deste projeto é o desenvolvimento de um gerador doméstico muito eficiente.

A gestão eletrónica do motor foi implementada com sucesso, permitindo o controlo da injeção de combustível assim como o ajuste do avanço de ignição. A instalação do sensor lambda permite que o mapa de eficiência volumétrica seja configurado, durante a realização de testes, com base no *feedback* acerca da riqueza da mistura.

O sistema de gestão da injeção de água foi também implementado com sucesso, permitindo definir o início da injeção de água assim como o ajuste do tempo de injeção de água em função do tempo de injeção de combustível. Para os diferentes modos do controlador do injetor de água não se obtiveram diferenças de tensão ou corrente no injetor pelo que se escolheu o modo recomendado pelo fabricante.

O controlo da rotação do motor, que foi definido para as 3000 RPM, pode ser feito de duas formas durante a realização de testes. Uma das opções é selecionar o modo “automático” de controlo do acelerador. Nesta opção o controlo da potência na carga é feito manualmente através do potenciómetro correspondente. A outra opção é escolher o modo “automático” de controlo da potência na carga. Para esta opção a posição do acelerador é definida manualmente através do potenciómetro correspondente ao modo “manual” de controlo do acelerador.

8.2 Trabalhos Futuros

Embora o sistema se encontre funcional existem algumas melhorias que podem ser implementadas no futuro, entre as quais:

- O uso de uma bobina de ignição da qual se possua o *datasheet* de modo a configurar a tabela de *dwell* da bobina de acordo com o indicado pelo fabricante;

- O uso de um injetor de gasolina do qual se possua o *datasheet* de modo a configurar a tabela de calibração do injetor. Isto irá permitir que o tempo morto do injetor, para determinada tensão de bateria, seja diretamente somado ao tempo de injeção do injetor. Desta forma, o tempo de injeção é ajustado através do mapa de eficiência volumétrica e mantém-se para diferentes tensões de bateria visto que, no tempo de energização do injetor teremos o tempo de injeção sempre somado com o tempo morto do injetor da tabela de calibração. Este problema pode também ser resolvido através da substituição da bateria por uma fonte de tensão constante, de forma a evitar a variação da tensão de alimentação.
- Obtenção de características do controlador para os diferentes modos de forma a justificar e perceber melhor a escolha do modo indicado pelo fabricante;
- Para a realização de testes, de sistemas que sejam implementados futuramente, numa maior gama de rotações, pode ser estudado outro tipo de freio que seja capaz de frear o motor numa maior gama de rotações, e numa maior gama de posições de acelerador. Além disso, o freio pode ser suspenso de forma a ser instalada uma célula de carga para medição de binário permitindo que seja traçada a curva de binário do motor, através da qual é possível obter a curva de potência do motor.

O sistema de gestão da injeção de água permite gerir o início e a duração da injeção de água contudo, para que, futuramente, seja possível realizar testes ao motor com injeção de água será necessário usar um sistema de alimentação de água em alta pressão para o injetor e a fixação do injetor na culassa na posição pretendida de modo a ocorrer a injeção direta de água na câmara de combustão.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] C. A. C. Tillman, “Motores de Combustão Interna e seus Sistemas,” Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Sul rio-grandense, Campus Pelotas - Visconde da Graça, 2013.
- [2] D. Sperandio, G. D. Zuccon, L. H. B. Ogi, and T. Alvisi, “Projeto De Dinamômetro Para Ensaio De Mci De Pequeno Porte,” Universidade São Francisco, Itatiba, 2014.
- [3] C. E. Milhor, “Sistema De Desenvolvimento Para Controle Eletrônico Dos Motores De Combustão Interna Ciclo Otto,” Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002.
- [4] J. Martins, “Motores de Combustão Interna,” 2ª Edição, Publindústria, Porto, 2006.
- [5] R. G. Lima, “Evolução dos motores a combustão interna ciclo Otto no Brasil,” Faculdade de Tecnologia Fatec Santo André, Santo André - São Paulo, 2017.
- [6] A. J. C. Alves, “Gestão de Motores de Combustão Interna,” Universidade do Minho, 2013.
- [7] E. J. J. Souza, “Concepção e desenvolvimento de correlações experimentais para a simulação, controle e otimização de sprays gerados em atomizadores mecânicos-centrífugos,” Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2009.
- [8] D. K. Hurtado and A. de A. Souza, “A Evolução Do Sistema De Injeção De Combustível Em Motores Ciclo Otto: Uma Análise Crítica Desde Suas Implicações No Meio Ambiente À Regulamentação Legal No Sistema Normativo Pátrio,” *Rev. Eletrônica do Curso Direito da UFSM*, p. 14, 2013.
- [9] -, “Informações técnicas sensor de posição da borboleta,” MTE-THOMSON.
- [10] G. G. D. Veiga and S. F. Andrade, “Sensores no automóvel – Injecção Electrónica,” Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto.
- [11] R. Tavares and T. Rocha, “Sistemas de Ignição,” IPP, Porto.
- [12] A. W. M. Bonnick, *Automotive: Computer Controlled Systems Diagnostic Tools and*

- Techniques*, Laser Word. Madras, India, 2006.
- [13] -, “Informações técnicas sensor de rotação,” MTE-THOMSON.
- [14] J. R. Cruz Trigueira, “Otimização da Gestão Eletrônica do Motor,” Universidade do Porto, 2014.
- [15] G. T. Braga, “Uma contribuição ao controle de motores de combustão interna de ignição por centelha na condição de marcha lenta,” Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil, 2007.
- [16] T. Costa, “Study, Implementation and Optimization of Internal Heat regeneration on the LiquidPiston Engine,” Universidade do Minho, 2017.
- [17] T. João, S. Sousa, and A. Costa, “Analysis of internal combustion engines towards the improvement of its efficiency,” Universidade do Minho, 2014.
- [18] T. Costa, “Research Methods Report - Waste Energy Regeneration by Water Injection in Internal Combustion Engines,” Universidade do Minho, 2018.
- [19] R. M. F. Pereira, “Desenvolvimento de um Sistema de Aquisição e Controlo de Binário e Velocidade para um Freio Eletromagnético,” Universidade do Minho, 2011.
- [20] M. T. Públio and R. J. B. Abreu, “Projeto de bancada para ensaios dinamométricos de pequenos motores de combustão interna,” Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2007.
- [21] G. V. Cezar, “Desenvolvimento de uma bancada de testes para motores a combustão interna,” Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.
- [22] J. C. Batista, “Metodologia para Ensaio de Modelo de Sistemas de Proteção de Geradores Síncronos Utilizando Simulador Digital em Tempo Real,” Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte - MG, 2015.
- [23] -, “DT-5 Características e especificações de geradores,” Weg.
- [24] -, “EMU- USER MANUAL,” ECUMASTER.
- [25] -, “Technical Customer Information Driving HDEV 5.2,” BOSCH, 2008.

- [26] -, "GDI Driver," Life Racing - Professional Electronics for Automotive and Motorsport, United Kingdom.
- [27] C. Cassiolato, "EMI – Interferência Eletromagnética," 2013.
- [28] H. E. Taggart, "Methods of Suppressing Automotive Interference," U.S. Department of Commerce, 1981.

	Technical Customer Information Driving HDEV 5.2	0 261 K00 815_12
		Seite/Page 3 von/of 5
		Datum/Date 03/12/2008
		Index 1

Driving of high pressure injector HDEV5.2

It is recommended to use the driving IC CJ841 (output stage) to drive the HDEV5.2.

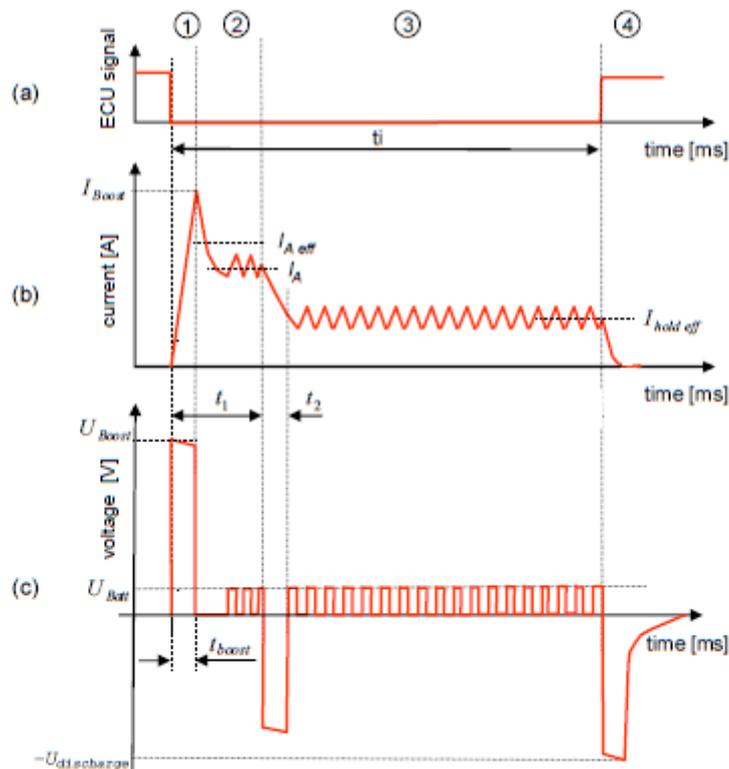
1. Scope

The electrical interface specification is valid for the HDEV5.2 and for a system pressure of 20 MPa. For driving of the HDEV5.2 a 65V-output stage is required. Driving with constant voltage is not allowed.

The maximum allowed coil temperature of the HDEV5.2 is 140°C.

2. Driving phases

The HDEV5.2 driving occurs in 4 phases, as in picture 1 exemplarily shown:



Picture 1 – Driving profile for the HDEV5.2: (a) Driving signal from ECU (b) flowing current through HDEV (c) measured voltage at HDEV5.2-pins (using CJ841)

© Alle Rechte bei Robert Bosch GmbH, auch für den Fall von Schutzrechtsanmeldungen. Jede Verfügungsbefugnis, wie Kopier- und Weitergaberecht, bei uns. © Robert Bosch GmbH reserves all rights even in the event of industrial Property rights. We reserve all rights of disposal such as copying and passing on to third parties.

2.1 Booster phase

In the booster phase ① the opening of the HDEV5.2 is initiated by means of the high booster voltage U_{Boost} , through commutating the booster capacitor on the HDEV5.2. The booster phase is completed by the achievement of booster current I_{Boost} . The maximum booster time $t_{Boost\ max}$ must not be exceeded.

2.2 Pickup phase

In the pickup phase ② the HDEV5.2 is completely opened through current control around the pickup current I_A . The effective pickup current $I_{A\ eff}$ must be provided. The time t_1 comprehends the booster phase and the pickup phase, i.e. from the beginning of the booster phase till the commutating of pickup current unto holding current. At the end of the pickup phase the current is switched over from pickup level unto holding level. The time t_2 must not be exceeded while switching over.

2.3 Holding phase

In the holding phase ③ the already opened HDEV5.2 is held open through current control around the holding current $I_{hold\ eff}$. The low current level yields a fast closing and low heat dissipation at the HDEV5.2 and the output stage.

2.4 Switching-off phase

In the switching-off phase ④ the current is switched off after the end of the injection time t_i . In this phase the voltage $U_{discharge}$ must have at least the level of U_{Boost} .

3. Current profiles for HDEV5.2 driving

A target current profile must be provided for opening and holding the HDEV5.2 open. Depending on the fuel system the system pressure may vary. The current profiles are defined for several system pressures in order to keep the power dissipation low.

3.1 Tolerances

The tolerances for driving parameters are as following:

Id. from pict. 1	Description	Tolerance
t_i	injection time	-
U_{Boost}	booster voltage at the beginning of an injection	$\pm 3V$
$t_{Boost\ max}$	maximal booster time; should not be exceeded even at high temperatures and low booster voltage	-
I_{Boost}	booster current	$\pm 10\%$
t_1	duration of booster phase together with pickup phase	$\pm 2\mu s$
$I_{A\ eff}$	effective pickup current	$-10\%/+20\%$
t_2	transition time between pickup current and holding current	-
$I_{hold\ eff}$	effective holding current	$\pm 10\%$
$I_{hys\ max}$	maximal hysteresis at current control	-
$U_{discharge}$	Voltage needed for discharging holding current to zero	$-2V$



**3.2 Driving Parameters according system pressure and static flow rate for the HDEV5.2
(recommended driving IC: CJ841)**

	Id. from pict. 1	Qstat [cm³/s]		
		13,5	17,5	22,5
	t_i	according to operating point		
for $p_{max}=22$ MPa (e.g. normal operation mode)	U_{Boost}	65V	65V	65V
	$t_{Boost\ max}^*$	410 μ s	430 μ s	430 μ s
	I_{Boost}	10,5 A	11,5 A	11,5 A
	t_f	640 μ s	640 μ s	640 μ s
	$I_{A\ eff}$	5,8 A	6,2 A	6,2 A
	t_2	< 50 μ s	< 50 μ s	< 50 μ s
	$I_{hold\ off}$	2,8 A	2,8 A	3,1 A
	$I_{hys\ max}$	1,2 A	1,2 A	1,2 A
	$U_{discharge}$	U_{Boost}	U_{Boost}	U_{Boost}
for $p_{max}=27.0$ MPa (e.g. at opening pressure of pressure relieve valve)	U_{Boost}	65 V	65 V	65 V
	$t_{Boost\ max}^*$	430 μ s	430 μ s	440 μ s
	I_{Boost}	11,5 A	11,5 A	12 A
	t_f	704 μ s	704 μ s	704 μ s
	$I_{A\ eff}$	6,1 A	6,1 A	6,8 A
	t_2	< 50 μ s	< 50 μ s	< 50 μ s
	$I_{hold\ off}$	3,1 A	3,1 A	3,1 A
	$I_{hys\ max}$	1,2 A	1,2 A	1,2 A
	$U_{discharge}$	U_{Boost}	U_{Boost}	U_{Boost}
for $p_{max}=29.5$ MPa (e.g. at limp home mode full delivery)	U_{Boost}	65 V	65 V	65 V
	$t_{Boost\ max}^*$	430 μ s	440 μ s	460 μ s
	I_{Boost}	11,5 A	12 A	13 A
	t_f	704 μ s	704 μ s	704 μ s
	$I_{A\ eff}$	6,6 A	6,8 A	7,1 A
	t_2	< 50 μ s	< 50 μ s	< 50 μ s
	$I_{hold\ off}$	3,1 A	3,1 A	3,4 A
	$I_{hys\ max}$	1,2 A	1,2 A	1,2 A
	$U_{discharge}$	U_{Boost}	U_{Boost}	U_{Boost}

* $t_{Boost\ max}$: should not be exceeded even at high temperatures and low boost voltage (for typical injector and I_{Boost} given above)

4. General injector data

4.1 Ohmic resistance of HDEV5.2 at 23°C: 1.5 $\Omega \pm 5\%$.

4.2 Inductance: L=2.1 mH (typical value, not specified with tolerances) at 1 KHz measurement frequency.



Professional Electronics for Automotive and Motorsport
 6 Repton Close | Basildon | Essex | SS13 1LE | United Kingdom
 +44 (0) 1268 274421 | info@liferacing.com

GDI Driver

The **GDI Driver** is a compact unit capable of driving four fuel injectors at a high voltage, thus catering for the requirements of high-pressure solenoid injectors. Coupled with a host ECU this unit is able to generate the complex waveforms required to activate the injectors. This unit is available to drive most **GD** injectors including parts from **Ford**, **GM** and **Bosch** (including **Bosch Motorsport** types). Each module has 4 injector outputs with adjustable drive power.



Applications	Driving gasoline direct injectors from a host ECU
Outputs	4 direct injector drivers
Inputs	4 injection pulses
Power Supply	6V to 32V input voltage range with reverse polarity protection High voltage generated internally Adjustable output drive power
Physical	Deutsch Autosport connector CNC machined, 'O' ring sealed, black anodised aluminium case Maximum dimensions including the connectors are 140 x 80 x 37 mm Operating Temperature -25 to +85°C Total mass is ~245 grams

Pinouts **Mating Connector AS6-14-195N**

- A – BATTERY SUPPLY
- B – BATTERY SUPPLY
- C – FUEL INJECTION PULSE #01
- D – FUEL INJECTION PULSE #02
- E – FUEL INJECTION PULSE #03
- F – FUEL INJECTION PULSE #04
- G – CONFIG #01 ⁽²⁾
- H – GDI #01 ⁽¹⁾
- J – GDI #02 ⁽¹⁾
- K – GDI #03 ⁽¹⁾
- L – GDI #04 ⁽¹⁾
- M – GDI #01 + ⁽¹⁾
- N – GDI #02 + ⁽¹⁾
- P – GDI #03 + ⁽¹⁾
- R – GDI #04 + ⁽¹⁾
- S – CONFIG #02 ⁽²⁾
- T – POWER GROUND
- U – POWER GROUND
- V – POWER GROUND

FOOTNOTES:

⁽¹⁾ The GDI output channel must have a twisted pair GDI+ and GDI- leading to each injector
⁽²⁾ Adjustable power output level please contact Life Racing for relevant information



APÊNDICE I – CÓDIGO C DE PROGRAMAÇÃO DO ARDUINO PARA CONTROLO DO ACELERADOR E PARA CONTROLO DA POTÊNCIA NA CARGA

```
#include "Servo.h"

#define PIN_SERVO 5 // saida para servo
#define PIN_LED 6 // saida pwm para led
#define PIN_LED2 3 // saida pwm para led2
#define PIN_POT A0 //pino para leitura do potenciometro acelerador
#define PIN_POT_DIM A1 //pino para leitura do potenciometro dimmer

Servo servo;

String conteudo="";
char caractere;
String result1="";
String result2="";

int value_servo = 0;
int value_pot=0;
int value_pot2=0;
int value_led=0;
int flag=0;
int flag2=0;

int setpoint=3000; //setpoint da rotação do motor em rpm
int erro=0;
float kp=0.1, ki=0.1, kd=0;
float p=0,i=0,d=0,pid=0;
unsigned long tdecorrido=0;

int erro2=0;
float kp2=0.2, ki2=0.1, kd2=0;
```

```

float p2=0,i2=0,d2=0,pid2=0;
unsigned long tdecorrido2=0;

int var=0;
unsigned long tempo=0;
unsigned long tempo_ant=0;
unsigned long tempofinal=0;
unsigned long rotacao;
int conta=0;

void setup()
{
  Serial.begin(9600);
  servo.attach(PIN_SERVO); // associa o pino respetivo ao servo
  pinMode(PIN_LED, OUTPUT); //Define o pino do led como saída
  pinMode(PIN_LED2, OUTPUT); //Define o pino do led2 como saída
  pinMode(7,INPUT_PULLUP); //controlo acelerador manual ou automático
  pinMode(8,INPUT_PULLUP); //controlo dimmer manual ou automático
  attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(2), calculo_rotacao, FALLING);
}

void loop()
{
  ler_serial();
  rotacao=2*(10*60000000)/tempofinal; //rotacao em rpm

  //—————CONTROLO ACELERADOR—————
  //—————MODO AUTOMÁTICO—————
  if(digitalRead(7)==LOW)//modo automático ligado
  {

```

```

calculo_pid();
value_servo=pid+83;

//if(value_servo<65)value_servo=65;
if(value_servo<83)value_servo=83;
if(value_servo>132)value_servo=132;
//if(value_servo>152)value_servo=152;

servo.write(value_servo);
delay(30);
}
//—————MODO MANUAL—————
if(digitalRead(7)==HIGH){
value_pot=analogRead(PIN_POT);
value_servo=map(value_pot,0, 1023, 65, 152);
servo.write(value_servo);

flag=1;
delay(30);
}
//—————

//—————CONTROLO DIMMER—————
//—————MODO AUTOMÁTICO—————
if(digitalRead(8)==LOW)//modo automático ligado
{
calculo_pid_led();
value_led=255-pid2;

if(value_led<0)value_led=0;
if(value_led>255)value_led=255;

```

```

analogWrite(PIN_LED, value_led);
analogWrite(PIN_LED2, value_led);
delay(30);
}
//—————MODO MANUAL—————
if(digitalRead(8)==HIGH){
value_pot2=analogRead(PIN_POT_DIM);
value_led=map(value_pot2,0, 1023, 0, 255);

analogWrite(PIN_LED, value_led);
analogWrite(PIN_LED2, value_led);

flag2=1;
delay(30);
}
//—————

if(conta==10){
Serial.print("kp2=");
Serial.println(kp2);
Serial.print("ki2=");
Serial.println(ki2);
Serial.print("setpoint=");
Serial.println(setpoint);
Serial.print("rotacao=");
Serial.println(rotacao);
Serial.print("value_led=");
Serial.println(value_led);
Serial.println("");
conta=0;

}

```

```

conta++;
}

void ler_serial()
{
while(Serial.available() > 0) {
    caractere = Serial.read();
    if (caractere != '\n'){
        conteudo+=caractere;
    }
    else{
        conteudo+=caractere;
        int i=0;
        while(conteudo[i]!='\n'){
            result1+=conteudo[i];
            i++;
        }
        i++;
        while(conteudo[i]!='\n'){
            result2+=conteudo[i];
            i++;
        }
        i=0;
        conteudo="";

        if (result1 == "kp"){
            kp=result2.toFloat();
        }
        if (result1 == "ki"){
            ki=result2.toFloat();
        }
        if (result1 == "kd"){

```

```

    kd=result2.toFloat();
}
if (result1 == "setpoint"){
    setpoint=result2.toInt();
}

if (result1 == "kp2"){
    kp2=result2.toFloat();
}
if (result1 == "ki2"){
    ki2=result2.toFloat();
}
if (result1 == "kd2"){
    kd2=result2.toFloat();
}

result1="";
result2="";
}
}
}

```

```

void calculo_rotacao()
{

delayMicroseconds(300);
if(digitalRead(2)==LOW)
{

if (var==0) tempo=micros();

```

```

var++;

if(var==10 )
{
tempofinal=micros()-tempo;
var=0;
}
}

}

void calculo_pid() //PID CONTROLO SERVO
{
erro=setpoint-rotacao;
erro=erro/10;
float delta = ((millis() - tdecorrido))/1000.0; //calcula a diferença em segundos entre um loop
tdecorrido = millis(); //conta quanto tempo levou para dar um loop

if(flag==1) // quando esta no modo manual e passa para automatico
{ //delta assume valor elevado e por isso é assumido 0 na primeira vez quando entra em
automático
flag=0;
delta=0;
i=0;
}

p = kp*erro; //controlo proporcional
i += (ki*erro)*delta;//controlo integral
d = erro*kd/delta;//controlo derivativo

```

```

    pid = p+i+d;//PID
}

void calculo_pid_led() //PID CONTROLO BRILHO DO LED
{
    erro2=setpoint-rotacao;
    erro2=erro2/10;
    float delta = ((millis() - tdecorrido2))/1000.0;    //calcula a diferença em segundos entre um loop
    tdecorrido2 = millis();        //conta quanto tempo levou para dar um loop

    if(flag2==1) // quando esta no modo manual e passa para automatico
    { //delta assume valor elevado e por isso é assumido 0 na primeira vez quando entra em automático
        flag2=0;
        delta=0;
        i2=0;
    }

    p2 = kp2*erro2; //controlo proporcional
    i2 += (ki2*erro2)*delta;//controlo integral
    d2 = erro2*kd2/delta;//controlo derivativo

    pid2 = p2+i2+d2;//PID
}

```