



Projeto

Mestrado em Engenharia Automóvel

***Desenvolvimento de uma Unidade de Controlo  
Eletrónico de baixo custo com base num  
microcontrolador de 32 bits***

**Pedro Tiago de Sousa Marinho**

Leiria, Setembro de 2015





Projeto

Mestrado em Engenharia Automóvel

***Desenvolvimento de uma Unidade de Controlo  
Eletrónico de baixo custo com base num  
microcontrolador de 32 bits***

**Pedro Tiago de Sousa Marinho**

Projeto de Mestrado realizado sob a orientação do Doutor Carlos Daniel Henriques Ferreira, Professor da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria.

Leiria, *Setembro* de 2015

*Esta página foi intencionalmente deixada em branco*

# Agradecimentos

---

Ao meu orientador Professor Doutor Carlos Daniel Ferreira Henriques pela permanente disponibilidade, partilha dos conhecimentos científicos e pelas críticas que em muito contribuíram para a execução deste projeto.

Aos meus pais Américo Martins e Emília Marinho pelo incentivo, dedicação e contributo como pais, cujo esforço foi fundamental para o sucesso do meu percurso académico. E à minha irmã Catarina Marinho pelo ânimo e pela paciência pelo que não dei enquanto irmão.

Aos Engenheiro Nuno Pires e Engenheiro Diogo Costa, técnicos do laboratório de Engenharia Automóvel, pela disponibilidade no acesso e utilização de equipamentos laboratoriais.

Ao Engenheiro Marco Santos e à Engenheira Sofia Gualdino, técnicos do centro de eletrónica, pela disponibilidade no fabrico de placas de circuito impresso na fase de testes e pelo atendimento.

Ao Engenheiro Joel Vasco, responsável do laboratório de Prototipagem Rápida e Engenharia Inversa, e ao Engenheiro Carlos Dias, técnico do laboratório de Engenharia Mecânica, pela disponibilidade imediata e apoio na impressão 3D do coletor de admissão.

A todos os colegas e amigos que me acompanharam ao longo de todo o projeto, pelas suas críticas, sugestões e incentivos que me fizeram acreditar na conclusão do mestrado.

À Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria pelos meios laboratoriais que me colocou à disposição e apoio ao projeto.

*Esta página foi intencionalmente deixada em branco*

# Resumo

---

Nos últimos anos o setor automóvel tem assistido a uma constante evolução dos sistemas dos automóveis para fazer face às rigorosas normas que restringem as emissões de poluentes. Também os condutores são cada vez mais exigentes e por isso o consumo de combustível diminuiu e o desempenho dos motores aumentou consideravelmente. Tudo isto foi conseguido com a aplicação e o constante desenvolvimento de sistemas de controlo eletrónico para motores de combustão interna. Contudo, no sentido de manter os preços baixos, a maioria dos equipamentos industriais e agrícolas continuam a utilizar sistemas mecânicos de controlo de ignição e injeção que proporcionam uma eficiência global baixa, elevado consumo de combustível e elevada emissão de poluentes. Os sistemas mecânicos podem ser substituídos por sistemas eletrónicos para otimizar esses motores, mas as unidades de controlo eletrónico (ECU) comerciais, que podem ser configuradas e adaptadas a qualquer motor, são maioritariamente dedicadas ao desporto motorizado e por isso possuem um preço que, na maior parte dos casos, excede o preço do equipamento agrícola ou industrial. Motivado pela ausência de opções comerciais económicas, foi desenvolvida uma ECU de baixo custo, otimizada para motores monocilíndricos.

A ECU permite o controlo eletrónico da ignição e da injeção de combustível, em função da carga e rotação do motor. Os mapas de controlo são programáveis pelo utilizador, permitindo uma adaptação fácil e a otimização de motores com diversas tipologias mecânicas. A ECU possui um sistema inovador de deteção de fase do motor para motores monocilíndricos, sem a necessidade de se utilizar um sensor de fase na árvore de cames. A comunicação série entre um computador e a ECU permite a visualização e otimização dos parâmetros de ignição e injeção em tempo real.

Um protótipo totalmente funcional da ECU proposta foi produzido e aplicado a um motor monocilíndrico. O motor foi previamente convertido para acomodar os sistemas eletromecânicos de controlo de ignição e injeção. Os ensaios laboratoriais permitiram demonstrar o correto funcionamento do *firmware* e do *hardware* desenvolvidos. A ECU de baixo custo é um produto inovador que permitirá a generalização do controlo eletrónico nos equipamentos com motores monocilíndricos.

Palavras-chave: unidade de controlo eletrónico, injeção/ignição eletrónica

*Esta página foi intencionalmente deixada em branco*



# Abstract

---

In the last years, the automotive industry has been through a constant evolution, new electronic control systems have been developed for the vehicle meet the European emissions norms. Also, consumers demand a lower fuel consumption and more engine performance. Such goals, were achieved with the application, and constant development, of electronic control systems in internal combustion engines. However, to keep low prices, the majority of the industrial and agricultural equipment have mechanical ignition and injection systems, which have low efficiency, high fuel consumption and high emission levels. The mechanical systems could be replaced by electronic ones in order to optimize the engine performance, but the programmable electronic control units are, mostly, dedicated to motorsports and have a very high cost, which, most of the times, exceeds the industrial or agricultural equipment price. Therefore, motivated by the lack of economical solutions in this field, the aim of the present work is to develop a low cost ECU, optimized for single cylinder engines.

This developed low cost ECU controls the engine ignition and injection as function of engine load and speed. Three dimensional control maps are available to the user, thus the ECU can be easily adapted and optimized to the control of different engine mechanical topologies. Moreover, the proposed ECU has a distinctive and innovative function to detect the engine phase in single cylinder engines and, therefore, eliminates the use of a sensor in the camshaft. A serial communication between the ECU and a computer allows real time programming and visualization of the ignition and injection variables and maps.

A prototype of the proposed ECU was built and applied to a single cylinder engine, with the necessary adaptations to have electromechanical ignition and injection control systems. Laboratorial tests were done to demonstrate the developed firmware and hardware proper functioning. The proposed low cost ECU is an innovative product that will enable the massification of electronic control systems in equipment with single cylinder engines.

Keyw ords: Electronic Control Unit, Electronic Injection/Ignition

*Esta página foi intencionalmente deixada em branco*

# Lista de figuras

---

Figura 1.1 – Controlo sem sensor de fase - ignição por faísca perdida: sinal de ignição (Canal A) e sinal do sensor da cambota ( Canal B).....	3
Figura 2.1 – Fases de funcionamento de um motor a quatro tempos: (a) admissão, (b) compressão, (c) combustão, (d) escape [5].....	7
Figura 2.2 – Fases de funcionamento de um motor a dois tempos: (a) criação de vácuo no cárter, (b) admissão da mistura para o cárter, (c) compressão da mistura no cárter, (d) admissão da mistura na câmara de combustão, (e) compressão da mistura na camara de combustão, (f) ignição, (g) movimento descendente do pistão (trabalho) e (h) escape dos gases e admissão de mistura fresca [6].....	8
Figura 2.3 – Diagrama de blocos típico de uma ECU [9]. .....	9
Figura 2.4 – Controlo do momento de ignição e do tempo de <i>dwell</i> [10]. .....	14
Figura 2.5 – Curva característica de um sensor de temperatura do tipo NTC [15]. .	16
Figura 2.6 – (a) Diafragma e elemento de medição do sensor de pressão piezo-resistivo, (b) Circuito de medição em Ponte de Wheatstone [10]. .....	17
Figura 2.7 – Sinal em tensão do sensor de pressão absoluta no coletor [15].....	18
Figura 2.8 – Sinal em tensão do sensor de posição da borboleta [15].....	19
Figura 2.9 – Sinal em tensão do sensor indutivo: posição da cambota [15]. .....	20
Figura 2.10 – Sinal em tensão do sensor de Hall: posição da cambota [15].....	21
Figura 2.11 – Curvas características do injetor: tensão (Canal A) e corrente (Canal B) [15].....	23
Figura 2.12 – Curvas características da bobine de ignição: tensão no primário (Canal A), tensão no secundário (Canal B) e corrente no primário (Canal C) [15]. .....	24
Figura 2.13 – Diagrama de blocos de sensores, atuadores e ECU de um sistema de controlo eletrónico de motores [10].....	25
Figura 2.14 – Mapa cartográfico: sistema de controlo de injeção de combustível eletrónico [9]. .....	26
Figura 2.15 – Fluxograma de um sistema de controlo eletrónico de injeção [11]. ...	28
Figura 2.16 – Mapa cartográfico: sistema de controlo de ignição eletrónica [9]. .....	29
Figura 2.17 – Fluxograma de controlo eletrónico de ignição em malha fechada [11]. .....	31
Figura 3.1 - Diagrama de blocos da ECU desenvolvida. ....	36
Figura 3.2 – Exemplo do circuito de acondicionamento das entradas analógicas (tensão da bateria).....	38

Figura 3.3 – Exemplo do circuito de acondicionamento das entradas digitais (sinal do sensor da cambota e entrada auxiliar). .....	39
Figura 3.4 – (a) Interrupção <i>Main</i> “ <i>background program</i> ”; (b) Interrupção de sincronismo. ....	42
Figura 3.5 – Interrupção gerada pelo sensor de rotação/posição da cambota. ....	43
Figura 3.6 – Interrupção de controlo da ignição - temporizador $t_{ig}$ . ....	44
Figura 3.7 – Interrupção de controlo da injeção - temporizador $t_{inj}$ . ....	44
Figura 3.8 – Representação gráfica do método de cálculo do <i>Tooth Ratio</i> [21]. ....	45
Figura 3.9 – Exemplo de um mapa cartográfico elaborado através na tabela <i>Injection Main Table</i> . ....	49
Figura 3.10 – Exemplo de análise da velocidade de rotação da cambota para deteção da fase do motor. ....	57
Figura 3.11 – Representação gráfica do método de controlo do sinal para a bobine de ignição. ....	59
Figura 3.12 – Representação gráfica do método de controlo do sinal para o injetor. ....	59
Figura 4.1 – (a) Conector 3-1437290-7, (b) Conector 9-6437287-8, (c) pinos 3-1447221-4 da TE Connectivity®. ....	65
Figura 4.2 – Visualização 3D do protótipo em <i>software</i> Altium Design. ....	66
Figura 4.3 – PCB protótipo produzida: (a) face superior; (b) face inferior. ....	68
Figura 4.4 – Engitec - protótipo para aplicação prática: (a) face superior; (b) face inferior. ....	68
Figura 5.1 – (a) Motor Honda GC160 utilizado nos testes práticos, (b) curvas de performance (potência e binário). ....	72
Figura 5.2 – (a) Corpo de admissão: coletor, injetor, TPS; (b) roda dentada e sensor de posição/rotação cambota. ....	73
Figura 5.3 – Motor GC160 adaptado com sensores, bobine de ignição, injetor e coletor de admissão para realização de testes práticos. ....	73
Figura 6.1 – Sinal do sensor da borboleta à saída do sensor (Canal A) e após acondicionamento de sinal (Canal B). ....	82
Figura 6.2 – Sinal do sensor de temperatura do motor à saída do sensor (Canal A) e após acondicionamento de sinal (Canal B). ....	83
Figura 6.3 – Sinal do sensor da cambota à saída do sensor (Canal A) e após acondicionamento de sinal (Canal B). ....	84
Figura 6.4 – Sinal de controlo do injetor à saída do microcontrolador (Canal A) e após circuito de potência (Canal B). ....	85

Figura 6.5 – Teste do controlo do injetor: tensão aos terminais do injetor (Canal A) e corrente no injetor (Canal B). .....	86
Figura 6.6 – Sinal de controlo da bobine à saída do microcontrolador (Canal A) e após circuito de potência (Canal B). .....	87
Figura 6.7 – Teste do controlo da bobine: tensão no secundário (Canal A) e corrente no primário (Canal B). .....	88
Figura 6.8 – Captura dos dentes da roda dentada: (a) sinal do sensor da cambota, (b) sinal do microcontrolador. ....	90
Figura 6.9 – Detecção da falha da roda dentada: (a) sinal do sensor da cambota, (b) sinal do microcontrolador. ....	91
Figura 6.10 – Teste de detecção da fase do motor: controlo do motor <i>Four Stroke</i> . ..	92
Figura 6.11 – Teste do cálculo do <i>dwell</i> : tensão da bateria (Canal A) e sinal de ignição (Canal B). .....	94
Figura 6.12 – Teste ao controlo do avanço de ignição base: sinal do sensor da cambota (Canal A) e sinal da tensão no secundário da bobine (Canal B). ....	95
Figura 6.13 – Teste ao controlo da ignição com o início do sinal do <i>dwell</i> após a detecção da falha. ....	96
Figura 6.14 – Teste ao controlo da ignição com o início do sinal do <i>dwell</i> durante a detecção da falha. ....	97
Figura 6.15 – Teste ao controlo da ignição com o início do sinal do <i>dwell</i> antes a detecção da falha. ....	98
Figura 6.16 – Teste ao controlo da largura de pulso de injeção base. ....	99
Figura 6.17 – Teste ao controlo da injeção com o início do pulso após a detecção da falha. ....	101
Figura 6.18 – Teste ao controlo da injeção com o início do pulso durante a detecção da falha. ....	102
Figura 6.19 – Teste ao controlo da injeção com o início do pulso antes da detecção da falha. ....	102
Figura 6.20 – Teste de termografia: vista da face superior da ECU. ....	104
Figura 6.21 – Teste de termografia: vista da face inferior da ECU. ....	105

*Esta página foi intencionalmente deixada em branco*

# Lista de Tabelas

---

Tabela 3.1 – Exemplo da tabela <i>Ignition Main Table</i> com avanços de ignição definidos de 0 a 16000 RPM. ....	47
Tabela 3.2 – Exemplo da tabela <i>Ignition Dwell Time</i> . ....	48
Tabela 3.3 – Exemplo da tabela <i>Fuel Dead Time Compensation</i> . ....	50
Tabela 3.4 – Exemplo da tabela <i>Injection Timing</i> . ....	51
Tabela 3.5 – Exemplo da tabela de configuração dum sensor de temperatura do tipo NTC. ....	52
Tabela 3.6 – Exemplo da tabela de compensação <i>Ignition - Air Temp Comp</i> . ....	53
Tabela 3.7 – Exemplo da tabela de compensação <i>Fuel – MAP Comp</i> . ....	53
Tabela 5.1 – Características do osciloscópio utilizado na medição de sinais. ....	79

*Esta página foi intencionalmente deixada em branco*



# Lista de siglas

---

ECU	Unidade de controlo eletrónico (do inglês <i>Electronic Control Unit</i> )
EEPROM	<i>Electrically-Erasable Programmable Read-Only Memory</i>
IGBT	Transístor bipolar de porta isolada (do inglês <i>Insulated Gate Bipolar Transistor</i> )
MAP	Sensor de pressão absoluta no coletor (do inglês <i>Manifold Absolut Pressure</i> )
MOSFET	Transístor de Efeito de Campo Metal-Oxido Semicondutor (do inglês <i>Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor</i> )
NTC	Coeficiente de temperatura negativo (do inglês <i>Negative Temperature Coefficient</i> )
PBT	Polibutileno Tereftalato (do inglês <i>Polybutylene Terephthalate</i> )
PCB	Placa de circuito impresso (do inglês <i>Printed Circuit Board</i> )
PMI	Ponto Morto Inferior
PMS	Ponto Morto Superior
PTC	Coeficiente de temperatura positivo (do inglês <i>Positive Temperature Coefficient</i> )
PWM	Modulação por largura de pulso (do inglês <i>Pulse-Width Modulation</i> )
RPM	Rotações por minuto
SMD	Componente de montagem em superfície (do inglês <i>Surface Mount Device</i> )
SPI	Periférico de interface série (do inglês <i>Serial Peripheral Interface</i> )
SRAM	Memória estática de acesso aleatório (do inglês <i>Static Randon Access Memory</i> )
TPS	Sensor de posição da borboleta (do inglês <i>Throttle Position Sensor</i> )
UART	Periférico de transmissão/receção assíncrono universal (do inglês <i>Universal Asynchronous Receiver/Transmitter</i> )
USB	Porta de comunicação série universal
WOT	Designa a carga máxima do motor - borboleta totalmente aberta (do inglês <i>Wide Open Throttle</i> )

*Esta página foi intencionalmente deixada em branco*

# Índice

---

<b>AGRADECIMENTOS</b>	<b>III</b>
<b>RESUMO</b>	<b>V</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>VII</b>
<b>LISTA DE FIGURAS</b>	<b>IX</b>
<b>LISTA DE TABELAS</b>	<b>XIII</b>
<b>LISTA DE SIGLAS</b>	<b>XV</b>
<b>ÍNDICE</b>	<b>XVII</b>
<b>1. INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
1.1. Contexto e motivação	2
1.2. Objetivos	3
1.3. Organização	3
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>5</b>
2.1. Motores Otto	5
2.1.1. Ciclo de trabalho	6
2.2. Unidades de controlo eletrónico	9
2.2.1. <i>Hardware</i>	10
2.2.2. <i>Software</i>	11
2.3. Sensores	15
2.3.1. Sensores de temperatura	15
2.3.2. Sensores de pressão absoluta no coletor	16
2.3.3. Sensores de posição da borboleta	18
2.3.4. Sensores de rotação do motor	19
2.3.5. Sensores de sincronismo	21
2.4. Atuadores	22
2.4.1. Injetores	22
2.4.2. Bobines de ignição	23
2.5. Controlo eletrónico de motores	25
2.5.1. Sistemas de injeção eletrónica	25
2.5.2. Sistemas de ignição eletrónica	29
2.6. Unidades de controlo programáveis	32
<b>3. DESENVOLVIMENTO E PROJETO</b>	<b>35</b>
3.1. <i>Arquitetura do hardware</i>	35
3.1.1. Microcontrolador	36
3.1.2. Memória EEPROM	37

3.1.3.	UART interface USB	37
3.1.4.	Alimentação	37
3.1.5.	Entradas analógicas	38
3.1.6.	Entradas digitais	39
3.1.7.	Saídas de potência	39
<b>3.2.</b>	<b>Firmware – algoritmo de controlo</b>	<b>40</b>
3.2.1.	Parâmetros de funcionamento	44
3.2.2.	Inicialização	54
3.2.3.	Deteção do Ponto Morto Superior	54
3.2.4.	Fase de arranque	55
3.2.5.	Deteção da fase do motor	56
3.2.6.	Cálculo do avanço de ignição	58
3.2.7.	Cálculo do tempo de abertura do injetor	58
3.2.8.	Controlo da bobine	58
3.2.9.	Controlo do injetor	59
3.2.10.	Corte de ignição e injeção	60
3.2.11.	Protocolo de comunicação	60
<b>4.</b>	<b>PROTÓTIPO</b>	<b>63</b>
<b>4.1.</b>	<b>Introdução</b>	<b>63</b>
<b>4.2.</b>	<b>O software Altium Designer®</b>	<b>64</b>
<b>4.3.</b>	<b>Escolha dos componentes</b>	<b>64</b>
<b>4.4.</b>	<b>Projeto da PCB</b>	<b>65</b>
<b>4.5.</b>	<b>Fabrico da PCB</b>	<b>67</b>
<b>4.6.</b>	<b>Custo estimado do protótipo</b>	<b>69</b>
<b>5.</b>	<b>MONTAGEM E PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS</b>	<b>71</b>
<b>5.1.</b>	<b>Montagem experimental</b>	<b>71</b>
5.1.1.	Motor de testes	71
5.1.2.	Adaptação mecânica do motor	72
5.1.3.	Adaptação da Engitec	74
5.1.4.	Identificação do Ponto Morto Superior	74
<b>5.2.</b>	<b>Procedimentos experimentais</b>	<b>74</b>
5.2.1.	Equipamento de teste	78
<b>5.3.</b>	<b>Configuração inicial</b>	<b>79</b>
<b>6.</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>	<b>81</b>
<b>6.1.</b>	<b>Hardware</b>	<b>81</b>
6.1.1.	Testes e verificações gerais	81
6.1.2.	Teste do acondicionamento do sinal do sensor da posição da borboleta	82
6.1.3.	Teste do acondicionamento do sinal dos sensores de temperatura	83

6.1.4.	Teste do acondicionamento do sinal do sensor da cambota	84
6.1.5.	Teste do circuito de controlo do injetor	85
6.1.6.	Teste do injetor	86
6.1.7.	Teste do circuito de controlo da bobine	87
6.1.8.	Teste da bobine	88
6.1.9.	Resumo	88
<b>6.2.</b>	<b>Algoritmo de controlo</b>	<b>89</b>
6.2.1.	Protocolo de comunicação e gravação de dados em memória EEPROM	89
6.2.2.	Captura dos dentes da roda dentada	90
6.2.3.	Deteção da falha da roda dentada	91
6.2.4.	Deteção da fase do motor	92
6.2.5.	Cálculo dos parâmetros de entrada	93
6.2.6.	Controlo do <i>dwell</i>	93
6.2.7.	Controlo do avanço de ignição base	94
6.2.8.	Controlo do avanço de ignição final	95
6.2.9.	Controlo do pulso de injeção base	98
6.2.10.	Controlo do pulso de injeção final	100
6.2.11.	Resumo	103
<b>6.3.</b>	<b>Teste termográfico à PCB</b>	<b>103</b>
<b>7.</b>	<b>CONCLUSÃO</b>	<b>107</b>
<b>7.1.</b>	<b>Trabalho futuro</b>	<b>108</b>
	<b>BIBLIOGRAFIA</b>	<b>111</b>



*Esta página foi intencionalmente deixada em branco*





# 1. Introdução

---

O desempenho e a fiabilidade dos automóveis têm apresentado uma notável evolução nas últimas décadas. Na verdade, nos últimos 30 anos a potência dos motores de combustão interna duplicou, enquanto o consumo de combustível foi reduzido para metade e as emissões de poluentes reduziram num fator de cem.

Tudo isto foi conseguido pela otimização dos motores de combustão e pela introdução de sistemas de controlo eletrónico. Ao longo do tempo, os sistemas de ignição e injeção mecânicos têm sido substituídos por sensores, atuadores eletromecânicos e Unidades de Controlo Eletrónico (ECU, do inglês *Electronic Control Unit*). Os sensores são usados pela unidade de controlo para determinar com precisão as condições de funcionamento do motor, permitindo que a injeção seja efetuada na altura certa e na quantidade exata para maximizar a eficiência do motor. O mesmo acontece com o avanço de ignição, que é determinado para maximizar o desempenho do motor. Os atuadores eletromecânicos para a injeção e ignição, respetivamente denominados por injetor e bobine, assumem um papel fundamental no controlo eletrónico dos motores de combustão interna.

Como estratégia de controlo, tipicamente são usados mapas cartográficos (três dimensões) programados na unidade de controlo. Estes mapas são obtidos em laboratório, num conjunto de testes ao motor em banco de potência, com equipamentos que parametrizam a potência, o consumo de combustível, emissões de poluentes, temperaturas, entre outros parâmetros de projeto. De um modo geral, os mapas cartográficos resumem o sinal de saída para os atuadores, em função das condições de carga e velocidade do motor. Os mapas cartográficos definem o ponto de partida, ponto este que depois é ajustado através do controlo em malha fechada da ignição e injeção. O controlo em malha fechada garante um funcionamento mais preciso e independente de fatores tais como condição mecânica do motor (desgaste), estado de componentes (exemplo: filtros, reguladores de pressão) e tipo/qualidade de consumíveis utilizados (combustível, óleos, etc.). No entanto, é necessário adicionar sensores que permitam determinar a relação ar/combustível e as condições de detonação (combustão descontrolada), respetivamente sensor lambda e sensor de detonação.

## 1.1. Contexto e motivação

---

Os motores monocilíndricos de ciclo Otto (motor a gasolina), devido à sua simplicidade mecânica, são bastante utilizados em equipamentos industriais, agrícolas e em pequenos veículos desportivos (por exemplo: karts). Na sua maioria, devido ao baixo custo do equipamento, estes motores não apresentam qualquer controlo eletrónico dos sistemas de ignição e injeção e, por este motivo, não acompanharam a evolução tecnológica dos automóveis. A utilização de sistemas totalmente mecânicos não permite o ajuste da quantidade de combustível e do avanço de ignição para as condições de carga e velocidade, resultando num motor com um baixo rendimento global, elevado consumo de combustível e emissões de poluentes.

A adaptação dum sistema eletrónico de controlo de ignição e injeção otimiza o desempenho do motor. No entanto, a implementação dum unidade de controlo requer algumas adaptações de componentes, tais como: sensores, bobine eletrónica, injetor, coletor de admissão, corpo de borboleta, bateria e sistema de carregamento de bateria, e isto faz com que o custo final do motor aumente consideravelmente.

Para manter os custos baixos, normalmente os controlos eletrónicos implementados trabalham com base num controlo de malha aberta, ou seja, sem sensor lambda ou sensores de detonação. Além disso, a maioria das unidades de controlo não deteta a fase do motor sem recurso ao sensor de sincronismo e, portanto, não identificam quando o pistão do motor está na fase de compressão ou escape. Assim, a injeção de combustível não é sincronizada com a abertura da válvula de admissão e a faísca ocorre duas vezes num ciclo completo do motor (uma quando o motor está em curso de compressão e a outra, que é completamente desnecessária, quando o pistão está em curso de escape), conforme exemplo representado na Figura 1.1. Nesta figura é representado o sinal da cambota (Canal B) e o sinal de ignição (Canal A). Como se pode observar existe uma ignição por cada volta de cambota (um falha por volta), quando na realidade, sendo um motor de quatro tempos, apenas ocorre uma combustão por cada duas voltas.

Este modo de controlo de injeção dessincronizada e ignição duplicada tem em conta o baixo custo, apesar de resultar numa combustão menos eficiente e num sistema de ignição que tem de ser sobredimensionado e com um consumo de energia desnecessário.

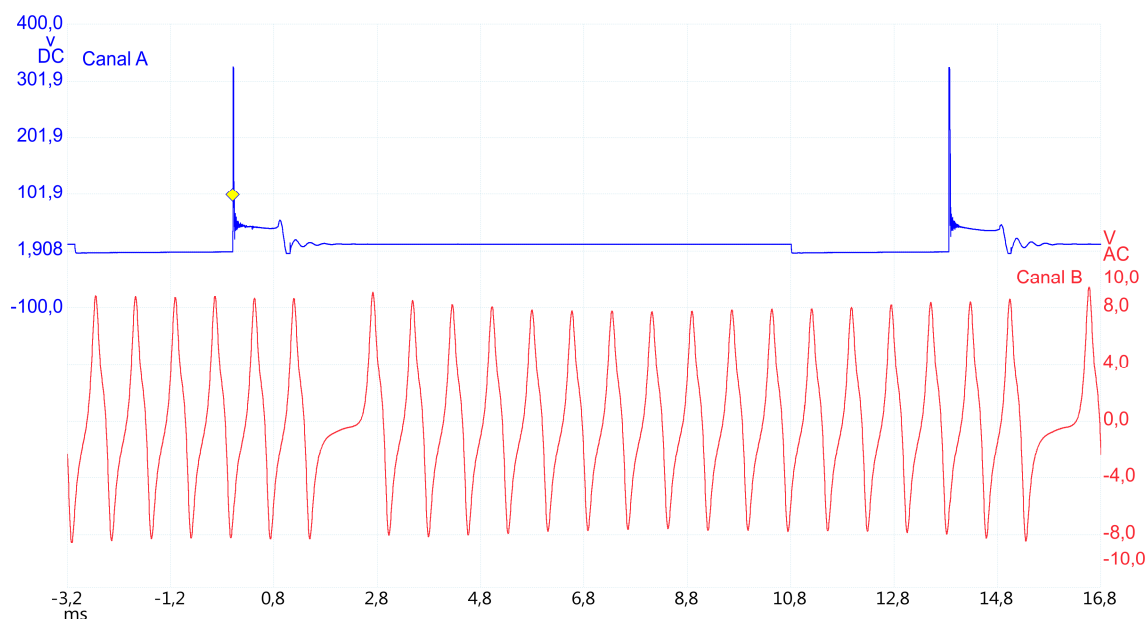


Figura 1.1 – Controlo sem sensor de fase - ignição por fásca perdida: sinal de ignição (Canal A) e sinal do sensor da cambota (Canal B).

## 1.2. Objetivos

---

De acordo com o apresentado, o objetivo deste trabalho consiste no desenvolvimento de uma unidade de controlo eletrónico de baixo custo com base num microcontrolador de 32 bits para aplicação em motores de combustão, de ciclo Otto, monocilíndricos. Em termos funcionais, a unidade de controlo deve de ser capaz de controlar eletronicamente a ignição e a injeção de combustível, em motores monocilíndricos de dois e quatro tempos, em função dos sinais dos sensores. Além disso, pretende-se uma unidade compacta e possível de ser programável pelo utilizador de modo a adapta-la a qualquer motor monocilíndrico.

## 1.3. Organização

---

No presente capítulo (**Capítulo 1**) foi apresentado o contexto deste trabalho, as motivações que proporcionaram o seu desenvolvimento e os objetivos gerais.

No **Capítulo 2** é apresentada uma revisão bibliográfica sobre os princípios de funcionamento dos motores de ciclo Otto de dois e quatro tempos, unidades de controlo de motor (*hardware* e *software*), sensores e atuadores. Além disso, abordaram-se os sistemas de controlo eletrónico da injeção e da ignição.

O **Capítulo 3** apresenta o desenvolvimento da unidade de controlo proposta (*hardware*), os componentes seleccionados e as suas principais características. Neste capítulo também é explicada a estratégia do algoritmo de controlo, caracterizados os parâmetros de funcionamento da unidade de controlo e explicados os métodos de controlo da ignição e injeção de combustível. Além disso é detalhado o funcionamento do inovador método de deteção de fase do motor.

O **Capítulo 4** apresenta o projeto do protótipo (placa de circuito impresso) desenvolvido no *software* Altium Design® e o processo de fabrico da placa de circuito impresso. Por último, apresenta o protótipo utilizado nos testes experimentais e uma estimativa do seu custo.

No **Capítulo 5** é apresentada a montagem experimental realizada no sentido de testar o protótipo desenvolvido. Além disso, são apresentados todos os procedimentos experimentais levados a cabo para comprovar o algoritmo de controlo e o *hardware* do protótipo.

No **Capítulo 6** são apresentados e analisados os principais resultados obtidos em sequência dos testes experimentais.

No **Capítulo 7** são expostas as principais conclusões deste trabalho e apresentados os trabalhos futuros propostos para a otimização e continuidade do presente projeto.

## 2. Revisão Bibliográfica

---

Neste capítulo é apresentado o trabalho de pesquisa bibliográfica que se focou principalmente em cinco vertentes: motores de combustão de ciclo Otto, unidades de controlo eletrónico, sensores, atuadores e sistemas de controlo eletrónico de motores.

Relativamente aos motores de ciclo Otto, abordam-se particularmente os motores que funcionam no ciclo de dois e quatro tempos. O objetivo é explicar as principais diferenças entre os tipos de ciclos, consideradas para se desenvolver uma unidade de controlo compatível com os dois tipos de motores.

Com a pesquisa acerca de unidades de controlo eletrónico pretende-se conhecer os módulos de *hardware* que tipicamente compõem uma unidade e o modo como o *software* é estruturado para permitir o controlo do motor.

Em relação aos sensores e atuadores, o objetivo consiste em perceber o modo de funcionamento, o tipo de sinal e a curva característica de cada sensor. Por outro lado, pretende-se conhecer de que forma os sensores contribuem para o controlo dos motores de combustão interna.

O estudo do controlo eletrónico de motores permite entender como é o funcionamento base dos sistemas eletrónicos de ignição e injeção, as suas principais vantagens e de que forma as unidades de controlo atuam sobre estes sistemas.

### 2.1. Motores Otto

---

Os motores de combustão interna de ciclo Otto são motores de ignição em que o princípio de funcionamento se baseia no ciclo termodinâmico Otto, idealizado por Beau de Rochas (1815-1893) e implementado com sucesso por Nikolaus Otto (1832-1891) em 1876 [1].

É importante referir que os motores de combustão interna têm sido modificados e melhorados ao longo dos anos, de acordo com as necessidades da indústria automóvel e de acordo com as legislações impostas pelas entidades que administram o setor. As evoluções registadas, com a aplicação de novos materiais, melhorias dos sistemas mecânicos e evolução constante dos sistemas eletrónicos, entre outros fatores, tornaram os motores mais leves, económicos, fiáveis, com melhor desempenho e menos poluentes [2].

## 2.1.1. Ciclo de trabalho

---

Atualmente, a maioria dos motores de combustão interna aplicados nos veículos, em equipamentos industriais, equipamentos agrícolas e em pequenos veículos de desporto motorizado são motores que funcionam no princípio de quatro tempos. Nestes motores, ocorre uma faísca entre os elétrodos de uma vela que está em contacto com a mistura de ar/combustível dentro do cilindro do motor, provocando a combustão da mistura. O aumento da temperatura e da pressão na câmara de combustão, resultantes da combustão, empurra o pistão provocando um movimento alternativo. A admissão da mistura de ar/combustível fresca e o escape dos gases queimados são controlados por válvulas de admissão e escape que abrem e fecham em sincronia as condutas de admissão para o cilindro e do cilindro para o escape, respetivamente. Num motor de quatro tempos, o ciclo de trabalho, representado na Figura 2.1, é composto pelas fases/tempos de admissão, compressão, combustão e escape, como se explica de seguida [3]:

**Admissão (1º tempo):** Refere-se ao movimento do pistão desde o ponto morto superior (PMS) até ao ponto morto inferior (PMI), no momento em que a válvula de admissão se encontra aberta, conforme representado na Figura 2.1 (a). O aumento do volume da câmara de combustão provoca o fenómeno de sucção que permite que a mistura de ar/combustível (injeção indireta) ou apenas o ar fresco (injeção direta) entre no cilindro. Quando o pistão se encontra no PMI o volume da câmara de combustão é máximo.

**Compressão (2º tempo):** Após a fase de admissão, as válvulas de admissão e escape encontram-se fechadas e o pistão inicia o movimento ascendente que comprime a mistura de ar/combustível e reduz o volume da câmara de combustão (Figura 2.1 (b)). No PMS o volume da câmara de combustão é mínimo e a compressão é máxima.

**Combustão (3º tempo):** Antes do pistão atingir o PMS na fase de compressão, a faísca da vela inicia a combustão da mistura de ar/combustível no ponto do avanço de ignição. A combustão provoca um aumento da temperatura e da pressão na câmara de combustão, que, após o PMS, provoca o movimento descendente do pistão (Figura 2.1 (c)). O movimento do pistão é convertido em trabalho que resulta no movimento rotacional da cambota.

**Escape (4º tempo):** Com a queima da mistura de ar/combustível completa, formam-se os gases de escape. No segundo movimento do PMI para o PMS a válvula de

escape abre e os gases de escape são forçados a sair da câmara de combustão pelo movimento ascendente do pistão e pela pressão elevada (Figura 2.1 (d)). Quando o pistão atinge o PMS um novo ciclo é iniciado com o tempo de admissão após duas voltas de cambota [4].

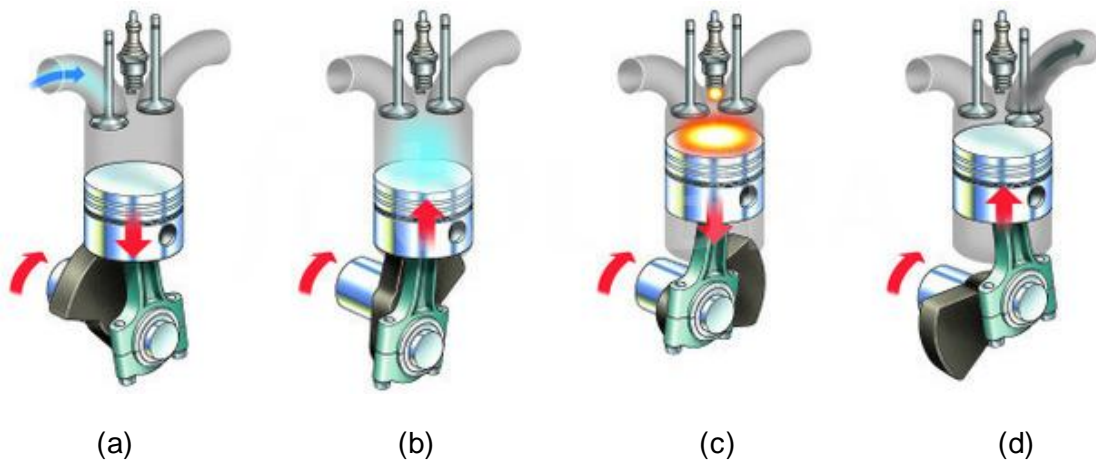


Figura 2.1 – Fases de funcionamento de um motor a quatro tempos: (a) admissão, (b) compressão, (c) combustão, (d) escape [5].

Como se pode resumir, por cada duas voltas da cambota, o pistão atinge o PMS e o PMI duas vezes, mas apenas um dos movimentos descendentes do pistão gera trabalho.

Contudo, alguns equipamentos industriais, agrícolas e alguns veículos de desporto (motos de enduro, motocross, karts, etc) utilizam motores de pequena dimensão que funcionam no ciclo de dois tempos, representado na Figura 2.2. Isto significa que as fases de admissão, compressão, combustão e escape acontecem apenas numa volta de cambota. Ao contrário dos motores de quatro tempos, estes motores não possuem válvulas de admissão ou de escape. Como se pode ver na Figura 2.2, os motores a dois tempos possuem duas aberturas na parede do cilindro, denominadas por porta de admissão e por porta de escape. Estas aberturas permitem a admissão da mistura e o escape dos gases, respetivamente, em função da posição do pistão durante o movimento alternativo deste (ascendente ou descendente). O movimento ascendente do pistão (Figura 2.2 (a)) cria um vácuo no cárter que permite a admissão da mistura composta por ar, combustível e óleo para o cárter do motor através da porta de admissão (Figura 2.2 (b)). Quando o pistão atinge o PMS, a maior parte do volume do cárter está preenchido com a mistura fresca.

No movimento descendente o pistão fecha a porta de admissão da mistura para o cárter e a mistura é comprimida (Figura 2.2 (c)). Quando o pistão está mais próximo do PMI, a porta de admissão do cárter para o cilindro, denominada porta de transferência, abre e a mistura é transferida a pressão elevada para o volume do cilindro (Figura 2.2 (d)). Esta nova mistura força a saída dos gases de escape e a camara de combustão é renovada pela mistura fresca. Nesta fase, parte da mistura fresca sai junto com os gases de escape, o que resulta num aumento do consumo de combustível.

Quando o pistão começa a mover-se no sentido ascendente, a porta de transferência é fechada e as ondas de pressão geradas na camara de combustão impedem a saída da mistura fresca pelo escape. Nesta fase ocorre simultaneamente a compressão da mistura na camara de combustão e a admissão da nova mistura no cárter do motor (Figura 2.2 (e) para (f)). Na posição superior ocorre a ignição que proporciona o movimento descendente do pistão (Figura 2.2 (g)). No movimento descendente a porta de escape abre e os gases de escape saem do cilindro, forçados pela admissão da mistura fresca (Figura 2.2 (h)). Portanto, nos motores a dois tempos, durante o primeiro tempo ocorre ignição e escape e no segundo tempo ocorre admissão e compressão [6].

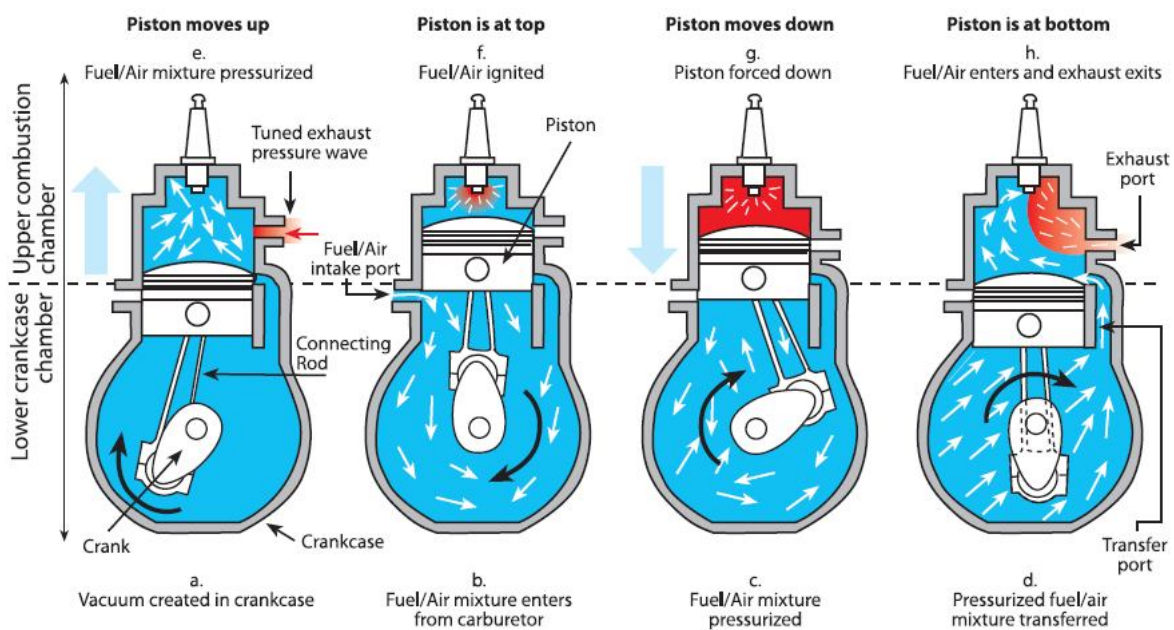


Figura 2.2 – Fases de funcionamento de um motor a dois tempos: (a) criação de vácuo no cárter, (b) admissão da mistura para o cárter, (c) compressão da mistura no cárter, (d) admissão da mistura na câmara de combustão, (e) compressão da mistura na câmara de combustão, (f) ignição, (g) movimento descendente do pistão (trabalho) e (h) escape dos gases e admissão de mistura fresca [6].



## 2.2. Unidades de controlo eletrónico

Com a constante necessidade de otimizar o desempenho dos motores, reduzir o consumo do combustível e reduzir as emissões de poluentes, os fabricantes de automóveis implementaram sistemas eletrónicos de ignição e injeção de combustível, controlados através de unidades de controlo [7].

As ECU são sistemas embebidos que efetuam o controlo do motor através de algoritmos que processam os sinais transmitidos pelos sensores, permitindo gerar os sinais de saída para os atuadores. A Figura 2.3 representa um diagrama de blocos típico de um sistema eletrónico de gestão do motor com ECU, bem como os módulos internos que constituem o seu *hardware*: alimentação, acondicionamento de sinal, processamento, potência e monitorização [8]. Estes módulos serão seguidamente abordados na secção 2.2.1.

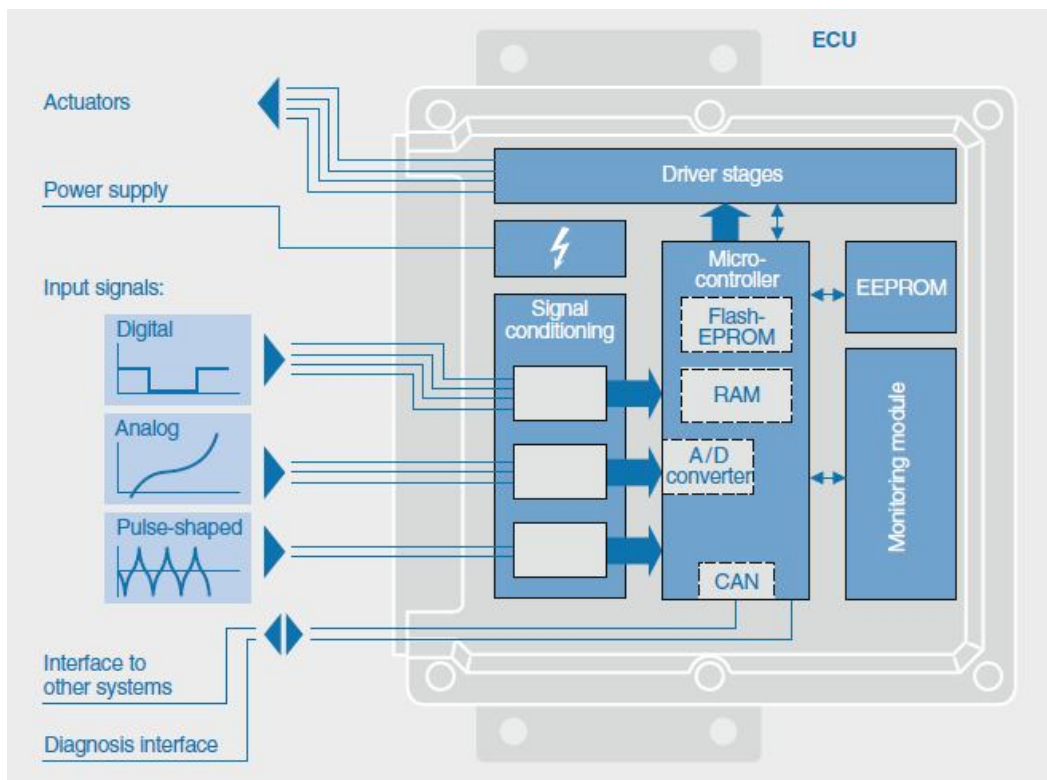


Figura 2.3 – Diagrama de blocos típico de uma ECU [9].

Ao longo dos anos, os sistemas de controlo evoluíram e atualmente a ECU, além do controlo da ignição e da injeção, controla outros componentes de gestão do motor, o tratamento de gases de escape, o sistema de carga, o sistema de arranque, os sistemas

de segurança e conforto, entre outros, tornando-a num elemento indispensável ao funcionamento dos veículos [9].

### **2.2.1. Hardware**

---

As ECU baseiam-se numa placa de circuito impresso com componentes eletrônicos e ligações a todos os sensores e atuadores do sistema a ser controlado (motor de combustão no caso de estudo). Nas ECU modernas, a maioria dos componentes utilizados são do tipo de montagem em superfície (SMD, do inglês *Surface-Mounted Device*) os quais permitem um uso eficiente do espaço e redução do peso da ECU.

As unidades de controlo devem funcionar com a maior fiabilidade possível. Por se encontrarem num automóvel, estão sujeitas a temperaturas extremas (-40 a +130 °C), a vibrações mecânicas contínuas, à humidade, poeiras, entre outras adversidades. Além disso, as ECU devem manter-se em correto funcionamento em situações de bateria fraca, picos de tensão ou durante as flutuações de tensão resultantes do funcionamento do veículo/sistema. Outro requerimento de elevada importância é a compatibilidade eletromagnética (EMC, do inglês *Electromagnetic Compatibility*) que define a capacidade da ECU ser imune a sinais de interferência de alta frequência [10].

A estrutura da unidade de controlo pode, de um modo geral, ser dividida em cinco módulos principais: alimentação, acondicionamento dos sinais de entrada, processamento lógico, módulo de potência para os sinais de saída e o módulo de monitorização.

O módulo de alimentação converte a tensão da bateria para um nível de tensão constante e estável, que permite alimentar os circuitos de instrumentação e processamento da unidade de controlo. Tipicamente, as ECU funcionam a um nível de tensão de 5 V [11].

O módulo de acondicionamento de sinal tem como finalidade adequar os níveis de tensão das entradas dos sensores ao nível de tensão requerida pelo microcontrolador. Este acondicionamento permite ainda remover interferências presentes nos sinais de entrada através de filtros. Quando necessário, os sinais são também amplificados [9].

O módulo de processamento é basicamente composto por um microcontrolador que é o componente central da ECU. É um circuito integrado que contém uma unidade de processamento central, portos de entrada, portos de saída, temporizadores, memória de

programa, memória de dados e interfaces de comunicação em série, entre outros periféricos [10].

O módulo de potência é responsável por adequar os níveis de tensão e corrente do circuito de controlo do microcontrolador às necessidades de funcionamento (tensão e corrente) dos atuadores. Basicamente, através de circuitos integrados de potência, os níveis de tensão de 0 - 5 V e correntes na ordem das dezenas de miliamperes são amplificados para o nível de tensão da bateria e correntes necessárias para o correto funcionamento dos atuadores [10].

O módulo de monitorização permite supervisionar o funcionamento dos restantes módulos e, através de um ciclo de “perguntas e respostas” entre o microcontrolador e o módulo de monitorização, detetar falhas no sistema.

## **2.2.2. Software**

---

Um dos requisitos mais importantes nos sistemas eletrónicos é a sua capacidade de trabalhar em tempo real. Isto significa que os sistemas devem de proceder ao controlo em função dos sinais de entrada o mais rápido possível. No caso dos sistemas do motor, é extremamente importante que a unidade de controlo seja capaz de atuar com precisão os sistemas de ignição e injeção, para respeitar os ângulos da cambota e os tempos de injeção em velocidades de rotação elevadas [9].

A complexidade de um sistema de controlo implica que um *software* rigoroso, eficiente e sem falhas seja desenvolvido. A estrutura base do *software* de uma unidade de controlo é apresentada a seguir.

### **2.2.2.1. Estrutura do software e estratégia de controlo**

---

O microcontrolador executa sequencialmente as instruções guardadas na memória de programa. O tempo decorrido desde o instante de leitura da memória e o momento de execução das instruções depende da frequência do relógio e do microcontrolador usado pela unidade de controlo. Atualmente, os microcontroladores usados nos veículos têm capacidade para executar mais de um milhão de instruções por segundo [10].

Devido à velocidade limitada a que o programa é processado, a estrutura de *software* é organizada em instruções de alta e baixa prioridade. Por exemplo, o sinal dos sensores de rotação da cambota e sincronismo (árvore de cames) têm de ser

processados instantaneamente devido à sua grandeza mudar a uma frequência elevada. Por isso o processamento destes sinais é avaliado como eventos de alta prioridade. Outras funções, como a leitura dos sinais dos sensores de temperatura, pela sua grandeza física alterar a uma frequência mais baixa, são avaliadas como eventos de baixa prioridade [12].

Assim que um evento de alta prioridade ocorre, as instruções de programa que estão a ser executadas têm que ser interrompidas. Isto pode ser feito utilizando as capacidades de gestão de interrupções dos microcontroladores. Após a execução de uma interrupção de alta prioridade, o programa retorna às instruções que foram interrompidas [10].

As interrupções podem ser geradas através de sinais externos (por exemplo, sinal do sensor de rotação/posição) ou internamente através de *software* (por exemplo, interrupções de temporizadores) para controlo dos sinais de saída (sinal de ignição ou injeção). A cada interrupção pode ser associado um nível de prioridade. Deste modo, se duas ou mais interrupções acontecerem simultaneamente, primeiro é executada a interrupção com maior prioridade e assim sucessivamente [3].

Outras funções, que não são executadas em interrupções, são processadas em segundo plano (*background program*). Como a velocidades de rotação elevadas as interrupções do sinal dos dentes (sensor de rotação) são executadas com maior frequência, a carga do microprocessador aumenta. Por este motivo, o tempo necessário para que a execução das instruções de segundo plano fique completa, aumenta com o aumento da velocidade de rotação. Logo, as instruções de segundo plano devem apenas conter funções de pouca importância para o controlo do motor [10].

### **2.2.2.2. Interrupção da rotação da cambota**

---

O sistema de controlo eletrónico de motores necessita de conhecer, a qualquer instante, a posição da cambota. Esta informação é um pré requisito para que a injeção ocorra no cilindro certo, num período de tempo bem definido, assegurando também que a ignição acontece com o avanço de ignição calculado. Para detetar a posição do motor e a velocidade de rotação, a unidade de controlo usa o sinal do sensor de rotação/posição instalado na roda dentada da cambota [3].

Tipicamente, são utilizadas rodas dentadas de 60 dentes com uma falha de 2 dentes. Logo, o sensor deteta 58 pulsos, com um intervalo de 6° de cambota entre si se o algoritmo capturar apenas o sinal num flanco, ou 116 pulsos, com um intervalo de 3° se o

algoritmo capturar o sinal nos flancos ascendente e descendente. A falha, utilizada para definir a posição da cambota em relação ao PMS do cilindro 1, permite ao programa da unidade de controlo sincronizar-se (determinar a posição absoluta da cambota) a cada volta do motor [10].

De modo a determinar a posição da cambota, a unidade de controlo executa uma rotina a cada dente detetado. A rotina deve ser totalmente executada antes da deteção do próximo dente. Isto requer uma rápida resposta ao sinal do sensor de rotação/posição. Por esta razão, o sinal do sensor de rotação/posição é ligado ao microcontrolador como uma interrupção externa de alta prioridade que é executada a cada dente. Após a execução, o programa retorna ao ponto em que se encontrava [10].

Para executar operações como o cálculo da velocidade de rotação, controlo da injeção e ignição, a unidade de controlo precisa de conhecer o tempo entre dentes. Esta função é realizada por um temporizador interno que incrementa o contador em função da frequência de oscilador interno do microprocessador. Sempre que ocorre a captura de um novo dente, o tempo decorrido desde o dente anterior até à captura atual é utilizado para o cálculo da velocidade de rotação. Este tempo é ainda utilizado para detetar a falha da roda dentada. Um outro temporizador tem programado um conjunto de instruções que, em função do tempo entre dentes, executa uma rotina de deteção da falha [9].

Para determinar a fase do motor (se num dado PMS o pistão está a realizar o ciclo de compressão ou escape) a unidade de controlo necessita de receber o sinal do sensor de fase da árvore de cames. O sinal de entrada gera uma interrupção de alta prioridade com uma rotina que permite ao algoritmo sincronizar a posição da cambota com a posição da árvore de cames [9].

### **2.2.2.3. Controlo das interrupções da ignição e injeção**

---

O sinal de atuação da ignição tem de acontecer em determinado momento da rotação da cambota, dependendo dos sinais de entrada dos sensores e dos valores programados nos mapas de ignição. Desde que é calculado o ponto exato da ignição e o tempo de carga da bobine (*dwell*), o sinal de saída da ignição é controlado por uma interrupção.

O programa da unidade de controlo conhece a posição da cambota em intervalos fixos através dos dentes da cambota. Contudo, a precisão dos intervalos não é suficiente para manter uma precisão aceitável no ponto em que ocorre a ignição. Por esta razão, o

sinal de saída para a ignição pode correr numa qualquer posição intermédia entre dois dentes, determinada com a utilização de um temporizador.

Na Figura 2.4 é representado o modo de controlo da ignição por temporizador. Considerando o tempo de carga da bobine, a unidade de controlo calcula o ponto exato do posição do motor em que a bobine de ignição é ativada (início do sinal de ignição para cumprir com máximo rigor o avanço de ignição). Como este ponto, regra geral, não coincide com o momento da interrupção do flanco gerado por um dente, o ângulo restante (desde a deteção do dente ao ponto de início de ignição) é convertido em tempo em função da velocidade de rotação do motor. Assim que a posição do dente é detetada, um temporizador controla esse período (interrupção de alta prioridade) que, quando termina, o microcontrolador ativa o temporizador em que o novo período corresponde ao *dwell*. Quando termina este período, o temporizador é desligado e ocorre a ignição [10].

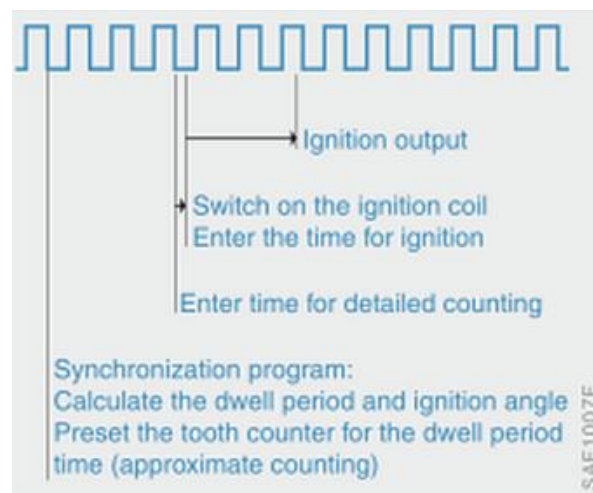


Figura 2.4 – Controlo do momento de ignição e do tempo de *dwell* [10].

O sinal para a injeção de combustível é processado com base no princípio de controlo da ignição. À semelhança do temporizador de ignição, o sinal de injeção também é controlado por interrupções de alta prioridade de um temporizador associado.

## 2.3. Sensores

---

Os sensores são elementos essenciais nos sistemas de controlo eletrónico aplicados aos automóveis e podem ser definidos como dispositivos capazes de converter grandezas não elétricas, tais como velocidade, posições, temperaturas, pressões, num sinal elétrico [13].

De um modo geral, os sensores podem ser distinguidos conforme o tipo de sinal de saída. Os sensores que apresentam uma saída que varia entre dois níveis discretos ao longo do tempo são classificados como sensores digitais, como por exemplo, os sensores de efeito de Hall. Os sensores que apresentam uma saída que, ao longo do tempo, pode tomar qualquer valor de tensão na gama de alimentação são classificados como analógicos. Exemplos de grandezas físicas que são avaliadas como analógicas são a temperatura do motor, temperatura do ar, pressão de admissão, posição da borboleta e tensão da bateria [3].

### 2.3.1. Sensores de temperatura

---

Os sensores de temperatura mais amplamente utilizados na instrumentação de motores de combustão são os termístores que como vantagens apresentam uma elevada sensibilidade e um baixo custo. O princípio de funcionamento baseia-se na alteração do valor de resistência em função da variação da temperatura. Os termístores podem ser do tipo PTC (*Positive Temperature Coefficient*) ou NTC (*Negative Temperature Coefficient*). Os PTC apresentam uma variação de resistência de forma diretamente proporcional à temperatura, onde a resistência elétrica aumenta à medida que a temperatura aumenta e os NTC apresentam uma variação de resistência inversamente proporcional à temperatura, onde a resistência elétrica diminui à medida que a temperatura aumenta [14].

Normalmente, os sensores de temperatura dos automóveis são do tipo NTC, com uma função de transferência como se mostra na Figura 2.5, por apresentarem maior sensibilidade na gama de temperaturas de funcionamento de - 40 a + 130 °C e um custo de fabricação reduzido. Usualmente são alimentados a 5 V por meio de um divisor de tensão e apresentam dois pinos de conexão, sendo um deles a massa de instrumentação (massa “limpa”, utilizada para os sensores). À ECU chega um sinal analógico que é consequentemente convertido para digital. A curva característica do sensor, resistência em função da temperatura, é programada na ECU [10].

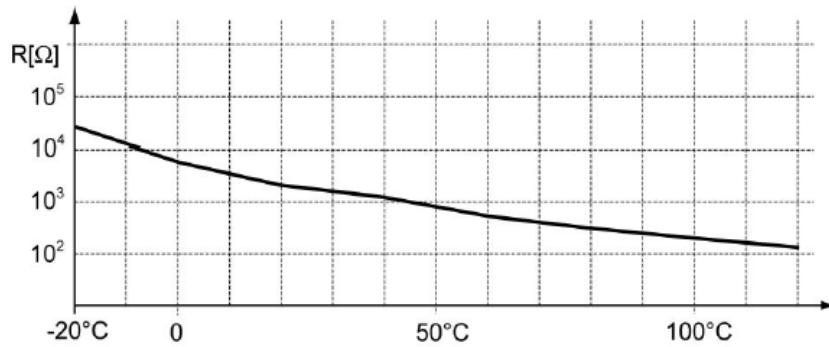


Figura 2.5 – Curva característica de um sensor de temperatura do tipo NTC [15].

### 2.3.1.1. Sensores de temperatura do motor

---

Os sensores de temperatura do motor estão normalmente instalados no circuito de refrigeração. A temperatura do motor é medida através do contacto do líquido de refrigeração com o elemento de medição do sensor. Outros sensores de temperatura podem ser do tipo de contacto direto com o material da cabeça do motor.

O valor da temperatura do motor é usado pela ECU para efetuar correções no avanço de ignição e na quantidade de combustível injetado, permitindo o funcionamento melhorado do motor de combustão na fase de arranque a frio [11].

### 2.3.1.2. Sensores de temperatura do ar de admissão

---

Os sensores de temperatura do ar de admissão são instalados na conduta de admissão. Tipicamente o valor de resistência à temperatura ambiente (20 °C) é de aproximadamente 2.5 kΩ. É comum o sensor de temperatura do ar de admissão estar integrado no corpo do sensor de pressão absoluta, por sua vez instalado no coletor [10].

O valor da temperatura do ar de admissão é usado pela ECU para efetuar correções no avanço de ignição e na quantidade de combustível injetado de modo a obter uma combustão mais eficiente [11].

## 2.3.2. Sensores de pressão absoluta no coletor

---

Os sensores de pressão absoluta no coletor (MAP) são normalmente do tipo piezo-resistivo. Estes sensores, também chamados de micromaquinados, apresentam uma célula de medição que consiste num diafragma (como mostra a Figura 2.6 (a), item 1),



fabricado em silício (2). Neste diafragma são embutidas quatro piezo-resistências (R1, R2, R3 e R4) fabricadas pela dopagem do substrato de silício. Estas resistências são sensíveis à tensão mecânica do diafragma e estão ligadas entre si em Ponte de Wheatstone (Figura 2.5 (b)), para aumentar a sensibilidade do sensor. Em resposta à deformação mecânica do diafragma, o valor das resistências muda (duas aumentam e duas diminuem) e consequentemente a tensão à saída da ponte é máxima. O sensor é constituído por duas câmaras, uma hermeticamente fechada (referência de vácuo) e a outra em contacto com o ar do coletor de admissão [2 e 10].

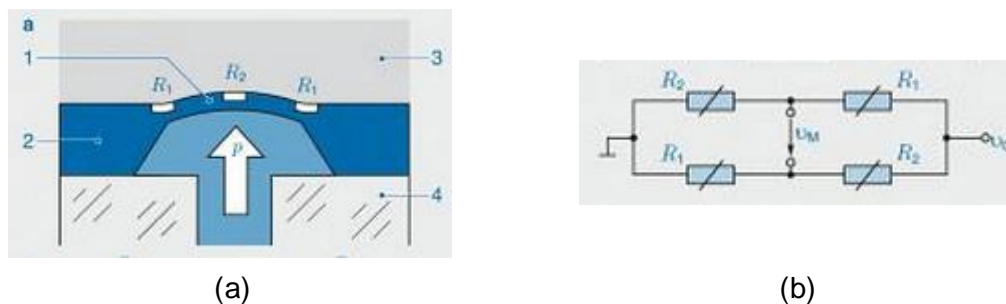


Figura 2.6 – (a) Diafragma e elemento de medição do sensor de pressão piezo-resistivo, (b) Circuito de medição em Ponte de Wheatstone [10].

Os sensores de pressão do coletor são normalmente montados após a borboleta de admissão e alimentados a 5 V. O sinal de saída analógico varia entre 0 - 5 V e a ECU usa este valor de tensão para calcular a pressão de admissão por meio de uma função de transferência normalmente linear. Esta informação, juntamente com o valor de temperatura do ar, permite calcular a massa de ar admitida. Motivo pelo qual é comum os sensores MAP integrar no mesmo corpo um sensor de temperatura do ar [10].

As unidades de controlo podem utilizar o sensor MAP para calcular a carga do motor e deste modo ajustar a quantidade de combustível e o avanço de ignição às condições de funcionamento do motor. Normalmente, as unidades de controlo obtêm o valor de pressão atmosférica no instante em que se liga a ignição (antes da fase de arranque do motor). Com o motor parado, a pressão dentro do coletor de admissão é igual à pressão atmosférica [9].

A Figura 2.7 representa um sinal típico deste tipo de sensores. Com o motor em funcionamento ao *ralenti*, a posição da borboleta de aceleração corresponde à posição ligeiramente aberta, provocando uma depressão no coletor de admissão [15]. Com o veículo em funcionamento sob carga parcial, a borboleta encontra-se aberta, mas não totalmente, e a depressão diminui, diminuindo também a deformação do diafragma. Nesta situação o sinal do MAP para a ECU aumenta [10]. Com a borboleta totalmente

aberta, situação denominada por WOT (do inglês *Wide Open Throttle*), a pressão no coletor aproxima-se da pressão atmosférica, o diafragma sofre uma flexão mínima e a tensão de saída do sensor MAP aproxima-se tipicamente de 4.6 V [15].

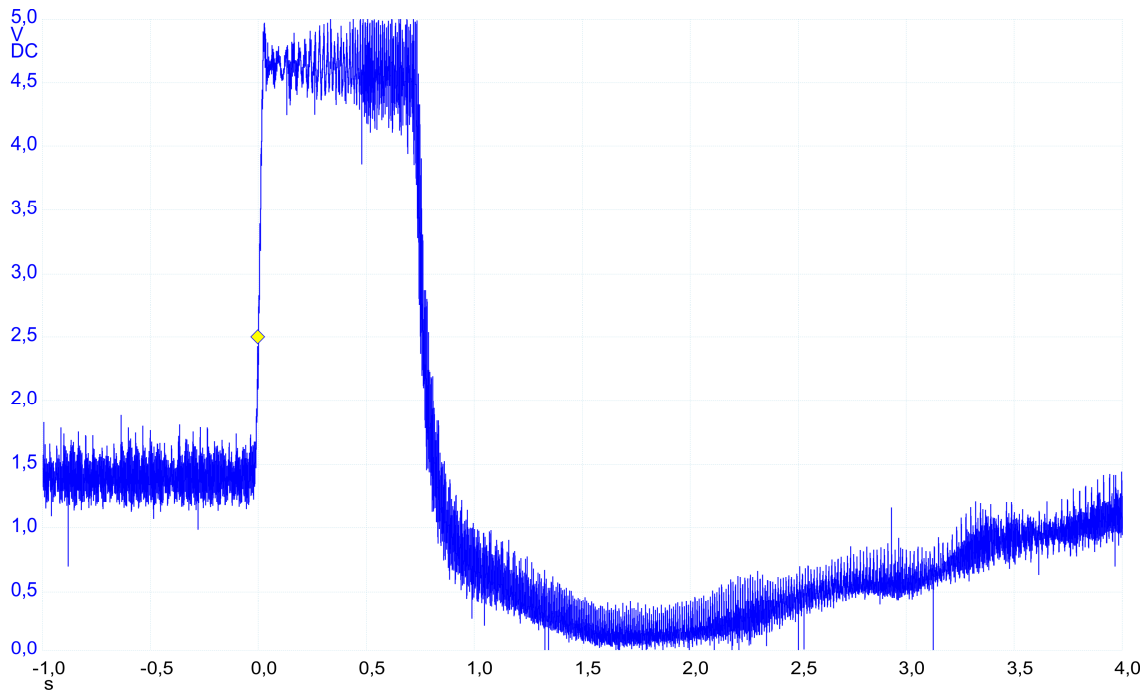


Figura 2.7 – Sinal em tensão do sensor de pressão absoluta no coletor [15].

### 2.3.3. Sensores de posição da borboleta

---

Os sensores de posição da borboleta TPS (do inglês *Throttle Position Sensor*) são sensores resistivos que permitem a medição de posição angular. Estes sensores localizam-se no corpo da borboleta, acoplados ao eixo da borboleta de aceleração, e são normalmente alimentados a 5 V. À medida que a borboleta se movimenta, o sinal analógico do sensor varia de forma linear à rotação da borboleta [14].

A ECU utiliza o sinal do TPS (exemplo representado na Figura 2.8) para definir a carga do motor (também pode ser usado o sensor MAP), permitindo ajustar o avanço de ignição e o tempo de injeção às condições de funcionamento do motor [9].

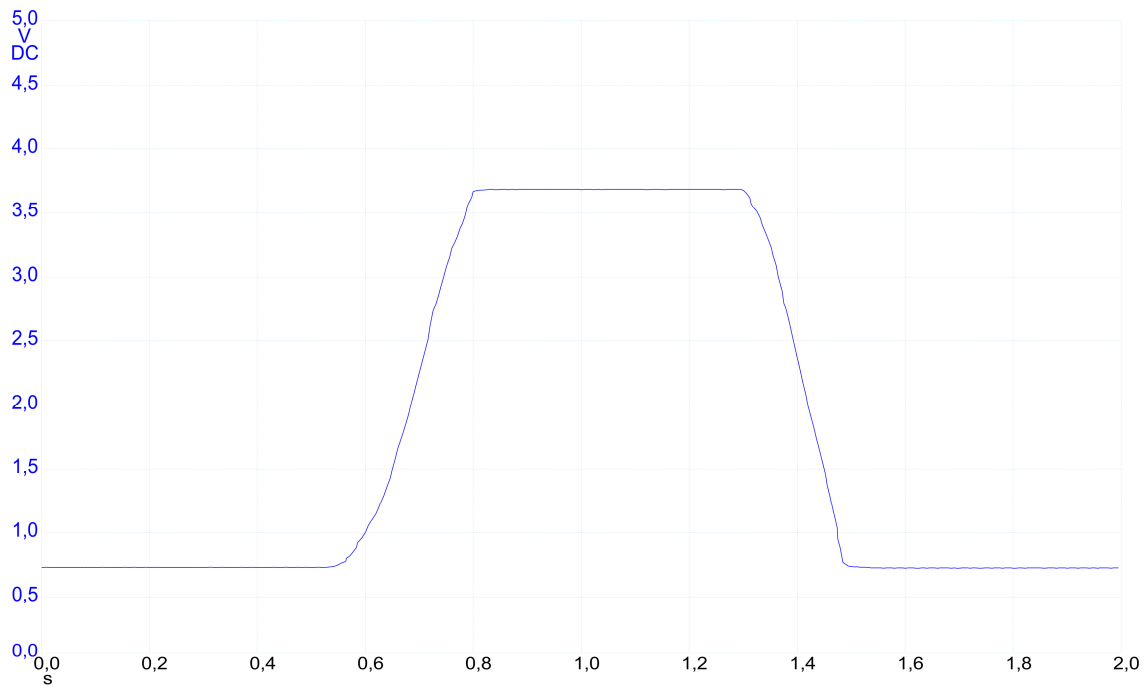


Figura 2.8 – Sinal em tensão do sensor de posição da borboleta [15].

### 2.3.4. Sensores de rotação do motor

---

Os sensores de rotação do motor são utilizados pela ECU para determinar a posição da cambota (absoluta e relativa) e a velocidade de rotação do motor. O controlo da ignição e da injeção de combustível é efetuado com base nesta informação [1]. Os sensores de rotação são tipicamente do tipo indutivo ou de efeito de Hall, sendo o tipo indutivo o mais utilizado. Normalmente estão localizados junto à polia da cambota ou junto ao volante do motor.

Relativamente aos sensores do tipo indutivo, estes são formados basicamente por uma bobina enrolada num ímã permanente. Com a rotação da cambota, os dentes da polia provocam uma alteração no campo magnético que produz uma tensão induzida na bobina. O sinal de saída do sensor, conforme exemplo representado na Figura 2.9, é uma onda sinusoidal em que a tensão e a frequência aumentam com o aumento da rotação do motor [16]. A falha identificada na imagem é devido ao dente (ou dentes) em falta na roda dentada da cambota e é utilizada como referência para a ECU determinar a posição absoluta do motor. Alguns sistemas utilizam dois pontos de referência por revolução [15].

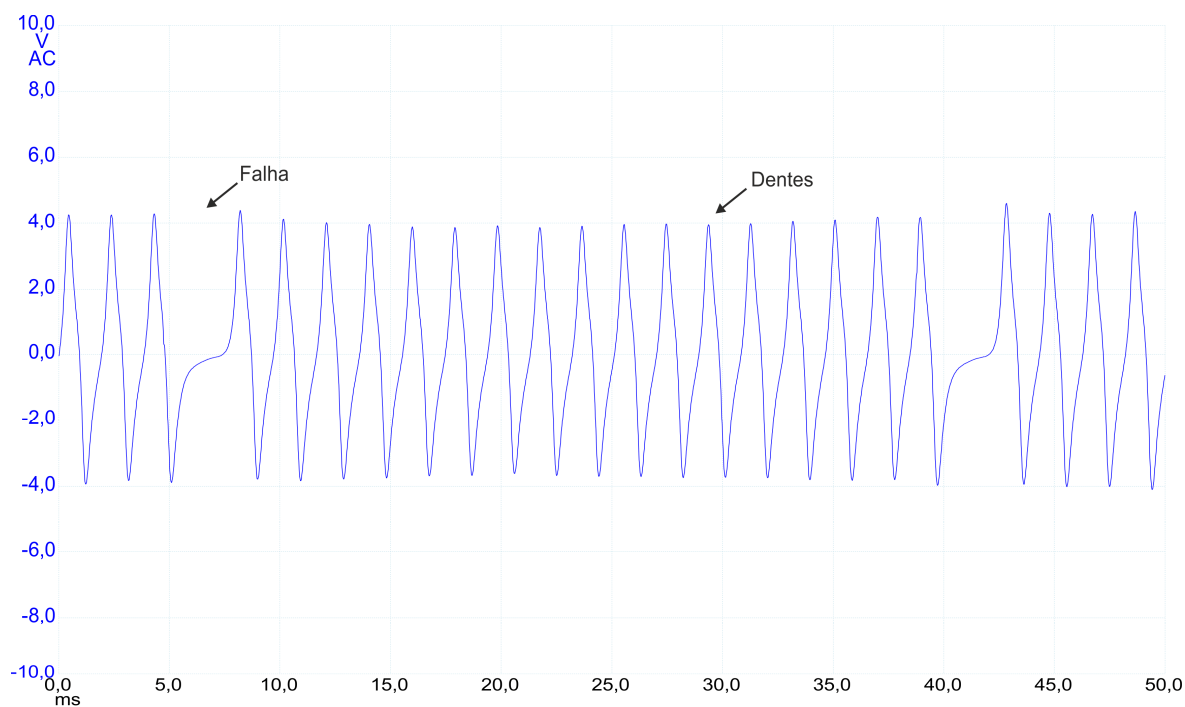


Figura 2.9 – Sinal em tensão do sensor indutivo: posição da cambota [15].

Os sensores de Hall funcionam no princípio de efeito de Hall. O corpo do sensor é composto pelo circuito integrado de Hall e por um ímã permanente que gera um campo magnético perpendicular ao elemento Hall. Os dentes da roda dentada ao passar pelo sensor alteram a direção do campo magnético, e de acordo a exposição do mesmo ao elemento sensor de Hall, o que resulta numa variação do sinal de tensão na saída do sensor. Como vantagens este sensor apresenta uma saída digital, independente da velocidade de rotação da roda dentada (motor). A eletrônica integrada no sensor acondiciona o sinal e a saída é um sinal de onda quadrada, conforme apresentado na Figura 2.10 [10].

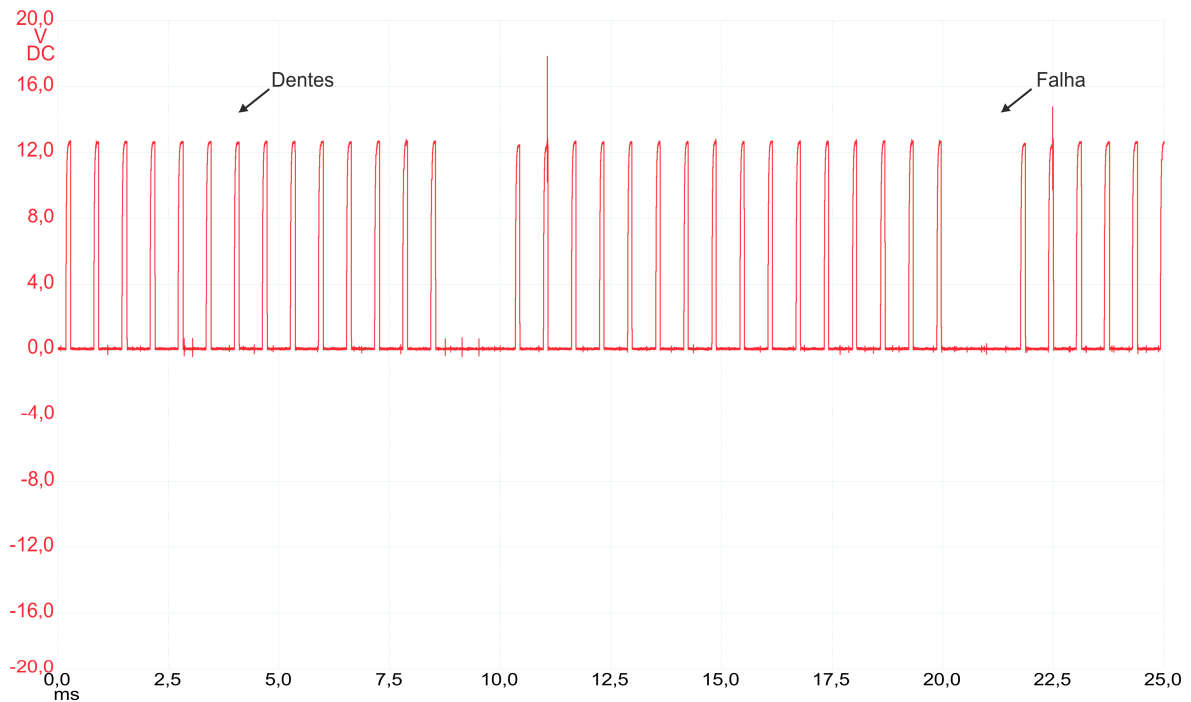


Figura 2.10 – Sinal em tensão do sensor de Hall: posição da cambota [15].

### 2.3.5. Sensores de sincronismo

Os sensores de sincronismo são tipicamente do tipo de efeito de Hall, sendo também comum a utilização de sensores indutivos. São acoplados na cabeça do motor junto à árvore de cames ou à polia da mesma para identificar a fase do ciclo Otto em que o motor se encontra, uma vez que esta perfaz uma única rotação por cada ciclo do motor de combustão.

A árvore de cames do motor roda a metade da velocidade de rotação da cambota e através do sinal do sensor de sincronismo, a ECU identifica o PMS do pistão e se o pistão está na fase de compressão ou escape. Esta informação é necessária, por exemplo, para sistemas de ignição *single-spark* e injeção sequencial [10]. O sistema *single-spark* permite que a ignição ocorra individualmente em cada cilindro, sucessivamente pela ordem de ignição. De igual modo, o sistema de injeção sequencial permite que a injeção de combustível seja também efetuada individualmente para cada cilindro (pela ordem de ignição). A duração da injeção, bem como o momento em relação ao PMS do respetivo cilindro é, normalmente, igual para todos os cilindros. Contudo, alguns sistemas mais recentes já permitem o controlo individual por cilindro para compensar oscilações da rotação, entre outros fatores que afetam o desempenho e as emissões de poluentes [9].

## 2.4. Atuadores

---

Os atuadores são componentes que recebem informações das unidades de controlo e atuam no sistema físico [14]. Considerando os objetivos do projeto apenas foram abordados os atuadores do sistema de ignição e injeção de combustível, nomeadamente as bobines de ignição e injetores.

### 2.4.1. Injetores

---

Os injetores são os componentes que permitem a injeção de combustível para o motor de combustão interna. Pelos objetivos deste projeto, apenas foram estudados os injetores de alta impedância, com autocontrolo da corrente de funcionamento. A injeção de combustível é feita “indiretamente”, ou seja, no coletor de admissão. No entanto, os motores de ciclo Otto atualmente mais desenvolvidos utilizam a tecnologia de injeção de combustível diretamente na câmara de combustão (GDI, do acrónimo inglês *Gasoline Direct Injection*), através de injetores de alta pressão. Os sistemas GDI possuem uma excelente atomização do combustível, permitem a otimização do desempenho dos motores, redução de consumos e de emissões [10].

Ainda assim, o sistema de injeção indireta é o que oferece mais vantagens em termos de aplicações mecânicas em motores que originalmente não têm injeção eletrónica. Por se tratar de um sistema de baixa pressão, torna-se um sistema menos complexo em termos de adaptação e diagnóstico, mais acessível e tolerante a combustíveis de qualidade inferior. Com injeção indireta, a mistura ar/combustível forma-se fora da câmara de combustão e o combustível é injetado à pressão da bomba de combustível primária.

Os injetores de injeção indireta são válvulas eletromagnéticas alimentadas a 12 V. Quando o módulo de potência da ECU ativa o injetor, a corrente da bobine indutora aumenta e a agulha da válvula abre, pulverizando o combustível. A abertura máxima da agulha é obtida após o tempo *pickup time* ( $t_{pk}$ ), como se mostra na Figura 2.11 (Canal B), em que a corrente do injetor sofre uma ligeira descida. O tempo que o injetor permanece aberto é controlado pela ECU e depende da quantidade de combustível pretendida, por sua vez função dos parâmetros de funcionamento do motor (temperatura do motor, pressão absoluta no coletor, velocidade de rotação, posição TPS, entre outros) [14].

A velocidade com que a agulha abre é um fator dependente da tensão da bateria. Quando a válvula (agulha do injetor) está totalmente aberta, a quantidade de combustível

injetado é proporcional ao tempo. No entanto, a não linearidade nos momentos de abertura e fecho pode ser compensada pelo tempo que o injetor está ativado (duração da injeção) [10].

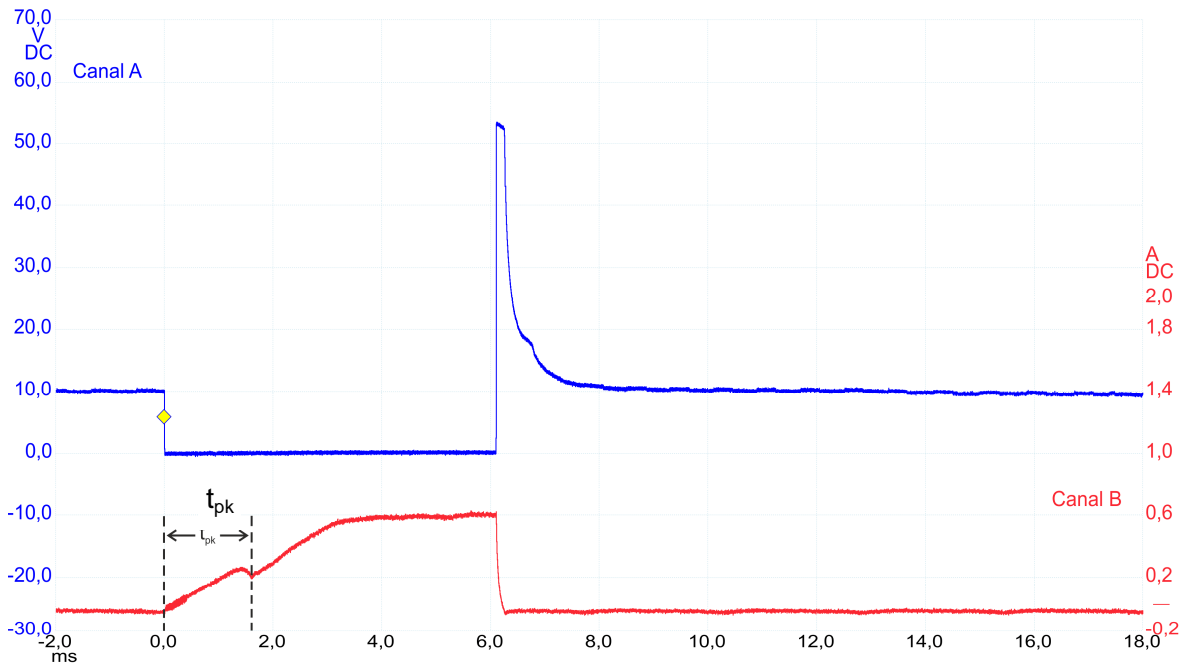


Figura 2.11 – Curvas características do injetor: tensão (Canal A) e corrente (Canal B) [15].

## 2.4.2. Bobines de ignição

A função da bobine de ignição é gerar a alta tensão necessária para provocar a ignição, cujo objetivo é iniciar o processo de combustão da mistura ar/combustível. Apesar de existirem diversas tecnologias de bobines de ignição, apenas se abordaram as bobines que são montadas sob a vela de ignição, denominadas *compact coil*. As *compact coil* eliminam a necessidade de utilização de cabos de velas (aumentam a fiabilidade da instalação e a qualidade da ignição, reduzindo as perdas nos cabos), permitem a redução de espaço e proporcionam uma ignição mais eficiente. Algumas destas bobines integram um *driver* (eletrônica de potência) que permite fechar o circuito do enrolamento primário da bobine. Outras bobines não possuem esta eletrônica interna, e nessas situações é necessário um *driver* de potência, que é integrado na unidade de controlo [17].

O controlo da ignição é realizado pela unidade de controlo. Isto é, em função dos parâmetros de funcionamento do motor e da tensão de carga da bateria, a unidade de controlo define o momento e a duração do sinal enviado para a bobine. A duração do tempo de carga da bobine (*dwell*), aumenta com a diminuição da tensão da bateria.

A Figura 2.12 ilustra as curvas típicas de tensão no primário (Canal A), tensão no secundário (Canal B) e corrente no primário (Canal C), medidas na bobine [11]. Enquanto não há ligação à massa na bobine, a corrente medida é zero. No instante em que é efetuada a ligação à massa, pode-se verificar uma oscilação na tensão do secundário da bobine e a corrente começa a subir. O período em que a tensão é zero (Canal A e Canal B) corresponde ao tempo em que a bobine está ligada (*dwell*), controlado pela ECU. O pico vertical na tensão do primário é denominado de tensão induzida, provocado pela descarga da energia armazenada nos enrolamentos da bobine no momento em que a ligação à massa é removida. Este fenómeno é visuzalido também no secundário da bobine numa escala proporcional. O período decorrido desde este fenómeno até às oscilações finais é denominado de tempo de queima e corresponde à duração da ignição. Após este periodo a tensão no primário (terminal de controlo) estabiliza novamente em valor igual à tensão da bateria.

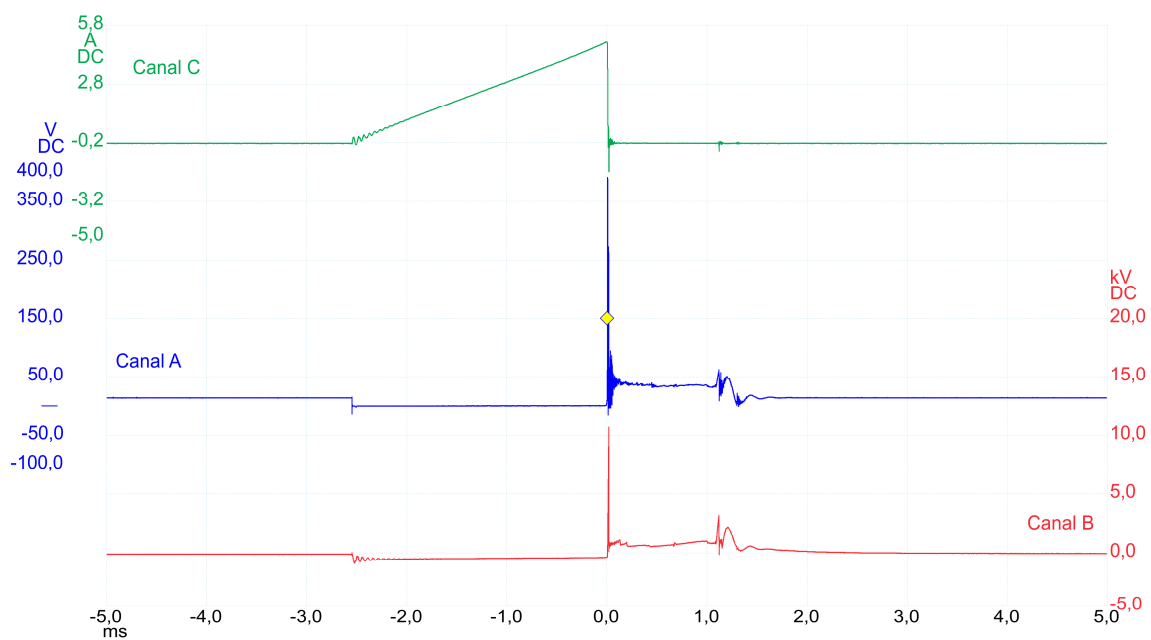


Figura 2.12 – Curvas características da bobine de ignição: tensão no primário (Canal A), tensão no secundário (Canal B) e corrente no primário (Canal C) [15].



## 2.5. Controlo eletrónico de motores

Os sistemas de controlo eletrónico de motores de combustão interna compreendem um conjunto de subsistemas, sendo os principais os de injeção de combustível e ignição.

O diagrama de blocos apresentado na Figura 2.13 pode representar um sistema de controlo eletrónico de motores de ciclo Otto. O conjunto de entradas e saídas é um modo simples de representar um sistema complexo [11]. Para que o sistema controle o funcionamento do motor, a ECU tem de receber os dados dos sensores. Estes sinais são processados para que os atuadores operem de acordo com os mapas de ignição e injeção [3]. Dependendo da complexidade do sistema e controlo, este pode ter mais ou menos sensores. O mesmo se pode dizer em relação aos atuadores.

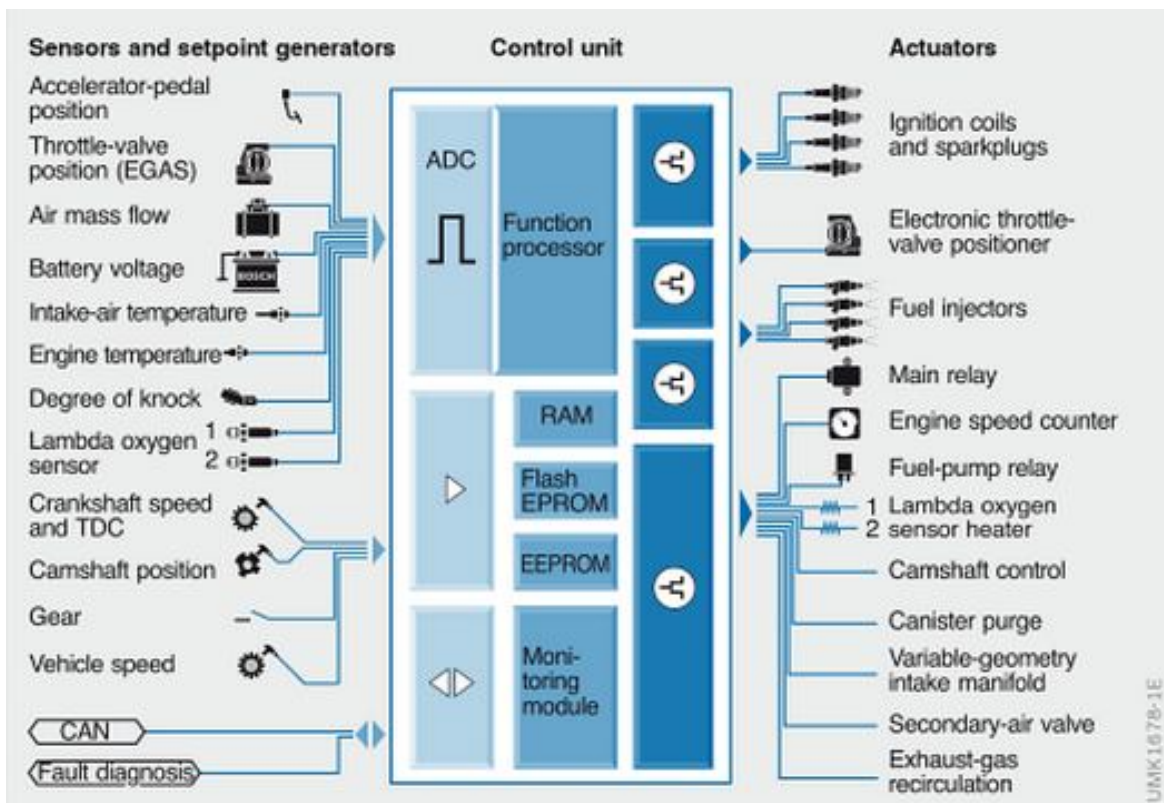


Figura 2.13 – Diagrama de blocos de sensores, atuadores e ECU de um sistema de controlo eletrónico de motores [10].

### 2.5.1. Sistemas de injeção eletrónica

O sistema de injeção de combustível tem como função o débito de combustível para a formação da mistura de ar/combustível. Ao longo dos anos, este sistema sofreu

uma evolução de carburadores para injetores, substituição dos sistemas mecânicos para sistemas controlados eletronicamente [18].

A maior vantagem dos sistemas eletrônicos de injeção é permitir que o débito de combustível seja o mais adequado possível às condições de funcionamento do motor. Estes sistemas definem a quantidade de combustível a injetar maioritariamente com base em mapas cartográficos de rotação e carga do motor (principais parâmetros de entrada), como o do exemplo representado na Figura 2.14. No entanto, os sistemas, conforme o nível de sofisticação, utilizam outras informações do motor que permitem ajustes mais minuciosos, tais como por exemplo:

- Sensor de temperatura do motor: permite ajustar a quantidade de combustível no arranque a frio;
- Sensor de temperatura de ar de admissão: permite compensar a injeção com a densidade do ar de admissão;
- Sensor de posição da borboleta: permite enriquecer a mistura em situações de carga ou fazer corte de injeção em situações de funcionamento sem carga;
- Tensão da bateria: permite compensar o tempo de abertura do injetor para diferentes tensões de bateria;
- Sinal A/C: permite ajustar o tempo de injeção para compensar a velocidade de ralenti na fase de quebra de potência do motor causada pela ativação do compressor do ar condicionado [9].

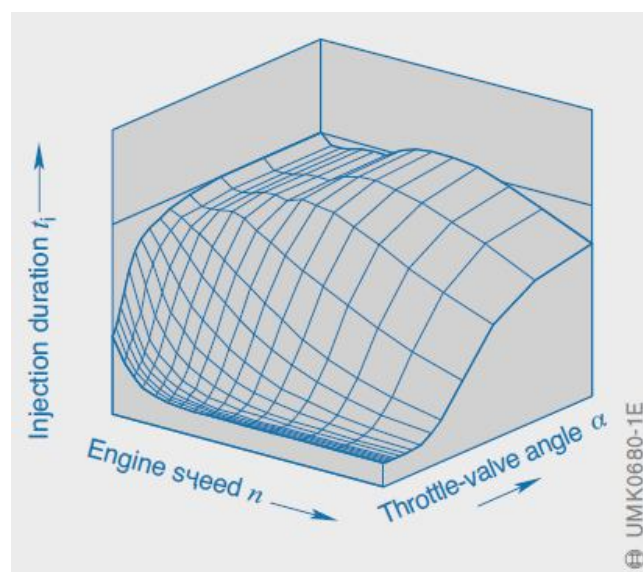


Figura 2.14 – Mapa cartográfico: sistema de controlo de injeção de combustível eletrónico [9].

Os sistemas mais evoluídos funcionam no método de controlo em malha fechada em que a ECU, recorrendo ao sinal do sensor lambda, determina a relação ar/combustível. Esta informação permite ajustar constantemente a injeção de combustível com base na informação da quantidade de oxigénio presente nos gases de escape. As devidas correções são depois aplicadas, num ciclo em malha fechada, à injeção de combustível (tempo de abertura do injetor) para garantir que o motor funciona o mais próximo possível da mistura estequiométrica (relação ideal e mais eficiente para a mistura de ar/combustível) [11].

O fluxograma da Figura 2.15 representa o funcionamento geral de um sistema eletrónico de injeção de combustível. A ECU adquire constantemente os sinais dos sensores do motor e quando o motor inicia o funcionamento (fase de arranque), é aplicado um tempo de injeção base de arranque e uma compensação de temperatura (enriquecimento de combustível na mistura) para suavizar e melhorar o arranque do motor. Após esta fase, a injeção de combustível é efetuada em função dos parâmetros de entrada (sinais dos sensores) e dos valores programados na ECU (mapa cartográfico de injeção, compensações, etc) e, caso exista sensor lambda, em malha fechada.

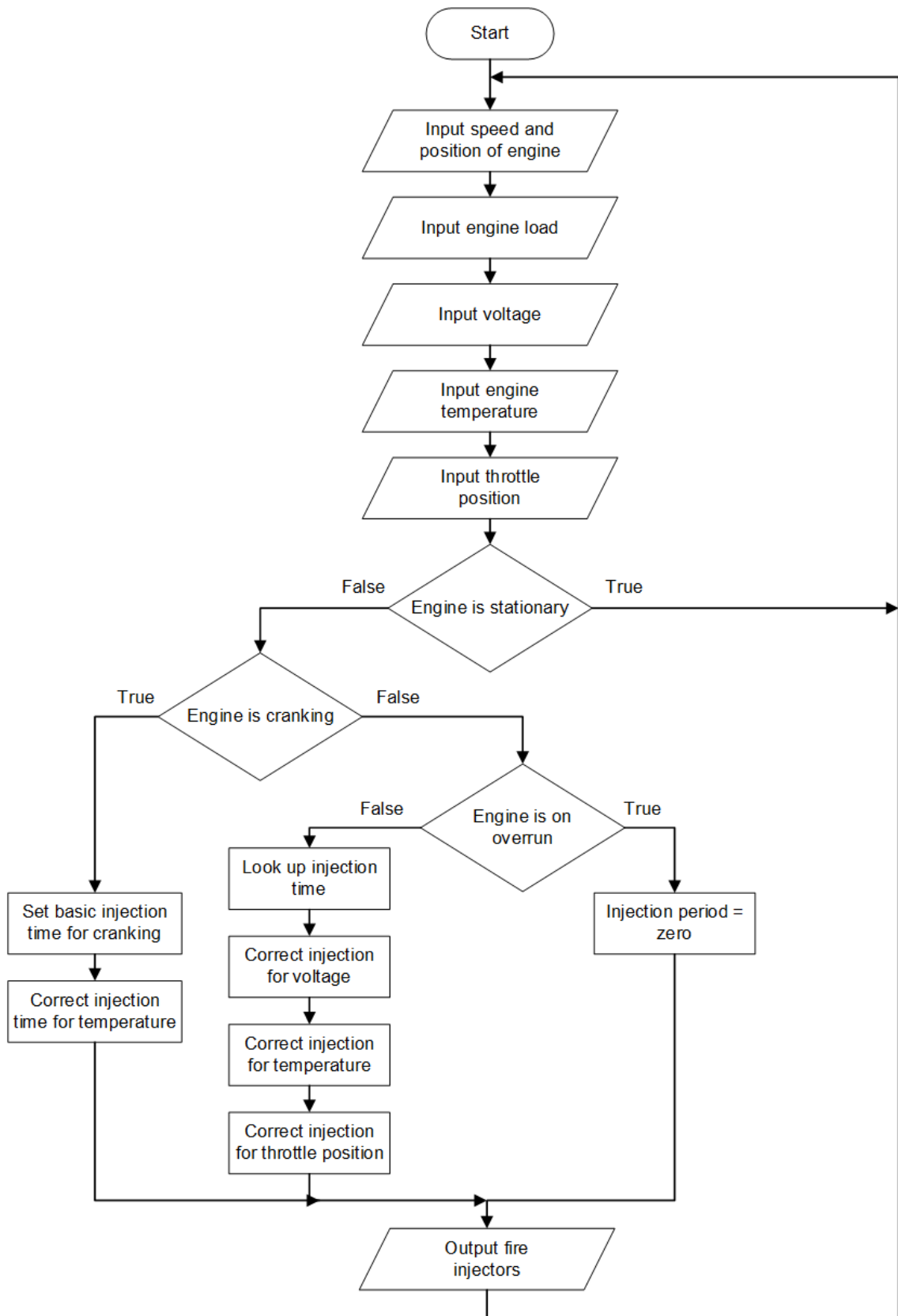


Figura 2.15 – Fluxograma de um sistema de controlo eletrónico de injeção [11].

## 2.5.2. Sistemas de ignição eletrónica

---

A função do sistema de ignição é fornecer energia para iniciar a combustão da mistura de ar/combustível na câmara de combustão. Como os sistemas mecânicos não permitiam o ajuste do avanço de ignição e do tempo de carga da bobine aos parâmetros de funcionamento do motor, foram substituídos por sistemas de controlo eletrónico [11].

Os sistemas de ignição eletrónica permitem que a unidade de controlo use um mapa cartográfico, idêntico ao que se apresenta na Figura 2.16, que caracteriza o avanço de ignição em função da rotação e da carga do motor. O mapa cartográfico é determinado em laboratório em função de parâmetros tais como: potência, binário, consumo de combustível, composição dos gases de escape, margem limite de auto-detonação (*knocking*), entre outros fatores. O controlo do ângulo de ignição é também influenciado por outros sensores e parâmetros de funcionamento do motor, tais como: temperatura do motor, temperatura do ar de entrada e posição do pedal do acelerador, que permitem um melhor arranque, acelerar o aquecimento do motor na fase de arranque a frio, reduzir o consumo de combustível e emissões, entre outros [9] [11]. Nestes casos é aplicada uma correção, dada pela tabela do respetivo sensor, ao valor de base obtido do mapa cartográfico.

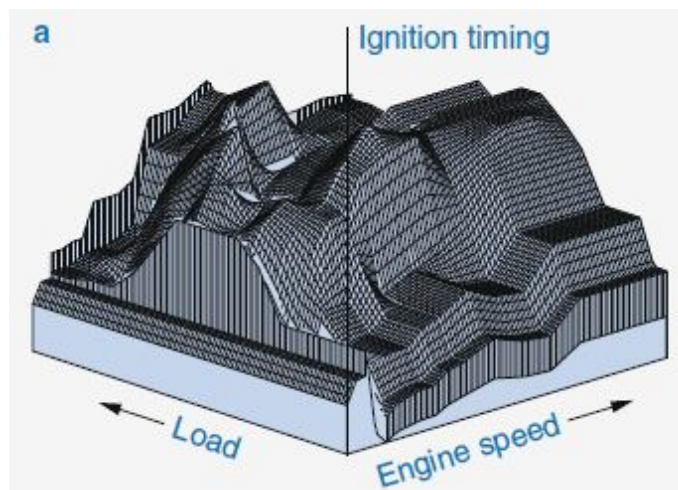


Figura 2.16 – Mapa cartográfico: sistema de controlo de ignição eletrónica [9].

Nos sistemas de ignição eletrónica o tempo de carga da bobine também é ajustado em função da tensão da bateria. Quanto menor a tensão da bateria, maior o tempo de carga da bobine. Este ajuste permite que a bobine carregue o tempo suficiente para

proporcionar a quantidade de energia necessária para gerar uma faísca que resulte numa combustão eficiente em todas as condições de funcionamento do motor.

Os motores Otto que funcionam com um sistema eletrónico de ignição em malha fechada, ou seja, possuem um sensor no bloco do motor que deteta a ocorrência de auto-detonação (combustão não controlada e destrutiva da mistura de ar/combustível), denominado por sensor de *knock*. Se este fenómeno é detetado, o ângulo de ignição é retardado para impedir danos internos no motor. Caso contrário, a unidade de controlo avança o ângulo de ignição para otimizar a combustão.

O fluxograma da Figura 2.17 representa o método de controlo eletrónico da ignição em malha fechada [11]. Na fase inicial, a ECU faz a aquisição dos sinais dos sensores de rotação/posição da cambota, temperatura e sensor de detonação. Também adquire a tensão da bateria para ajustar o *dwell*.

Se o motor se encontrar parado, a ECU mantém-se em modo de espera atualizando o valor dos sensores. No instante em que é detetado o movimento da cambota, a ECU verifica se o motor se encontra em fase de arranque ou em funcionamento normal. Na fase de arranque, a atuação da bobine é efetuada com base no avanço e *dwell* calculados para esta fase (normalmente valores fixos).

Se o funcionamento do motor se encontrar num regime de rotação de marcha lenta ou superior, o controlo da ignição é efetuado com base nos mapas cartográficos e tabelas de correção do avanço de ignição e do *dwell*. Se se verificarem as mesmas condições de carga e rotação, o algoritmo controla o avanço do motor em malha fechada. Isto é, ocorre um aumento do avanço de ignição. Se se detetar o fenómeno de detonação, o avanço é diminuído para evitar danos no motor. Se não se detetar o fenómeno de detonação, a ECU aumenta novamente o avanço de ignição.

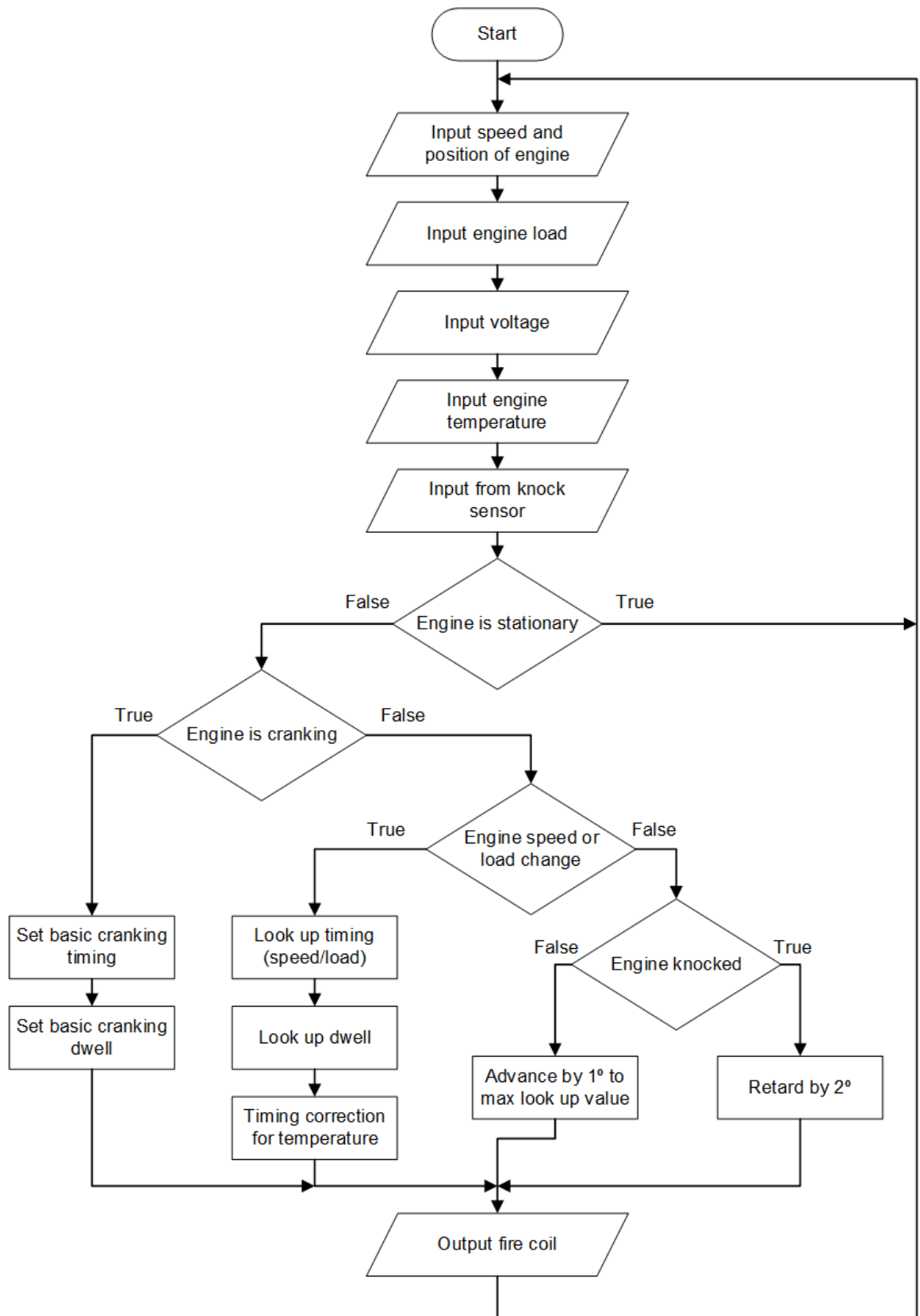


Figura 2.17 – Fluxograma de controlo eletrónico de ignição em malha fechada [11].

## 2.6. Unidades de controlo programáveis

---

Os fabricantes de automóveis, no desenvolvimento de unidades de controlo, efetuam a sua programação de forma que estas se adequem às características pretendidas para um modelo de motor em questão (otimizadas para um compromisso entre consumo e potência). De uma forma geral os fabricantes não permitem alterações nos parâmetros de controlo. Devido a esta limitação, foram desenvolvidas unidades de controlo eletrónico programáveis que permitem efetuar alterações de todas as variáveis de controlo. Estas ECU são também designadas por unidades "abertas" e são tipicamente utilizadas na competição (*motorsport*) [20].

No mercado atual existem unidades programáveis que não controlam apenas os sistemas de ignição e injeção, permitindo também o controlo do ralenti (velocidade mínima do motor de combustão), do sistema de sobrealimentação (pressão do turbo), dos sistemas de tratamento de gases de escape, do sistema tração e estabilidade, controlo de bombas (água e combustível), de ventiladores, servomotores e da caixa de velocidades, entre outros. As recentes evoluções de motores como a variação contínua da árvore de cames, os sistemas *drive-by-wire* do controlo da borboleta, a injeção direta de gasolina, entre outros, criaram a necessidade de otimizar estas unidades de controlo para integrar mais entradas de sensores e saídas auxiliares e uma maior velocidade de processamento [20].

Nas unidades programáveis, o utilizador pode gravar vários mapas de controlo e depois analisar qual lhe permite obter ganhos significativos de performance. Além disso, permite a adição de novos sistemas de controlo no motor e a remoção de limitações (por exemplo: limitador de velocidade ou rotação). Outra mais-valia é também o diagnóstico, também ele mais "aberto", que permite ao utilizador identificar erros ou falhas nos sistemas de controlo do motor. Como contrapartida este género de ECU programável acarreta custos monetários superiores em relação a uma ECU convencional.

No mercado comercial, uma das marcas mais utilizadas é a Motec<sup>®</sup> que equipa motores das mais variadas vertentes da competição com as unidades de controlo dos modelos "*M1 Series*" e "*Hundred Series*" [19]. Além de permitirem o controlo do motor e de outros sistemas, têm a funcionalidade de *data logging* que permite a gravação de dados para posterior análise dos diversos parâmetros do motor. Esta informação detalhada possibilita uma otimização refinada e ganhos significantes no desempenho do controlo. Outras marcas que são também frequentemente escolhidas são as Bosch<sup>®</sup> [20], Magneti Marelli<sup>®</sup> [21] e a Trijekt<sup>®</sup> [22]. Contudo, os valores de aquisição dificilmente se



encontram abaixo dos 2000 € (podendo facilmente ultrapassar os 6000 €) e, em grande parte dos casos, obrigam à aquisição conjunta de sensores compatíveis com as unidades para substituir os originais dos motores (quando existentes).

Existe ainda um exemplo de uma ECU, denominada Mega Squirt<sup>®</sup>, que tem vindo a ser desenvolvida ao longo dos anos por uma comunidade de seguidores, baseando-se assim no conceito *Open-Source* [23]. Esta ECU segue a filosofia de baixo custo e, através das discussões abertas e partilha de conhecimento entre quem a adquire, ocorre uma melhoria contínua das suas funções e do seu *software*. Contudo, tratando-se de um sistema universal e simultaneamente de aprendizagem, em determinadas aplicações acaba por ter de ser alterado em termos de *hardware* e *software*. Outro exemplo semelhante a este tipo de ECU é a VEMS<sup>®</sup> - Versatile Engine Management Systems [21].

Em qualquer dos exemplos, o custo de aquisição excede muitas vezes os sistemas que nos propomos a controlar, inviabilizando a aplicação.

*Esta página foi intencionalmente deixada em branco*

## 3. Desenvolvimento e Projeto

---

Neste capítulo é apresentado o desenvolvimento do *hardware* e do *software* da unidade de controlo eletrónico proposta. Relativamente ao *hardware* são apresentados todos os módulos que permitem a aquisição de dados dos sensores, o circuito de processamento, o controlo dos atuadores, a comunicação e a gravação de dados. Em cada módulo, são expostas as principais características e considerações tidas em conta no dimensionamento dos circuitos. Quanto ao *software*, apresentam-se todos os parâmetros que permitem a afinação do funcionamento da unidade de controlo. Além disso, são descritos os principais módulos de algoritmo desenvolvidos, relativos à deteção do ponto morto superior, controlo da ignição e controlo da injeção.

### 3.1. Arquitetura do hardware

---

O diagrama de blocos apresentado na Figura 3.1 apresenta o sistema eletrónico de controlo desenvolvido neste projeto, para aplicação em motores monocilíndricos. No seu conjunto, o *hardware* desenvolvido permite o funcionamento da unidade de controlo. No entanto, pode-se separar o *hardware* em duas secções principais: instrumentação e potência.

A secção de instrumentação é composta pelo microcontrolador, responsável pelo cálculo, execução de tarefas e processamento de dados, pelo acondicionamento de sinais analógicos e digitais, comunicação série USB, armazenamento de dados e alimentação. Nesta secção os níveis de tensão são de 5 V e 3.3 V, respetivamente para a alimentação dos sensores e para a alimentação do módulo de processamento.

A secção de potência é caracterizada por funcionar ao nível da tensão da bateria e é composta pelo *hardware* que permite a atuação da bobine, injetor e outras saídas de potência auxiliares necessárias para ativação de outros componentes (exemplo: bomba de combustível).

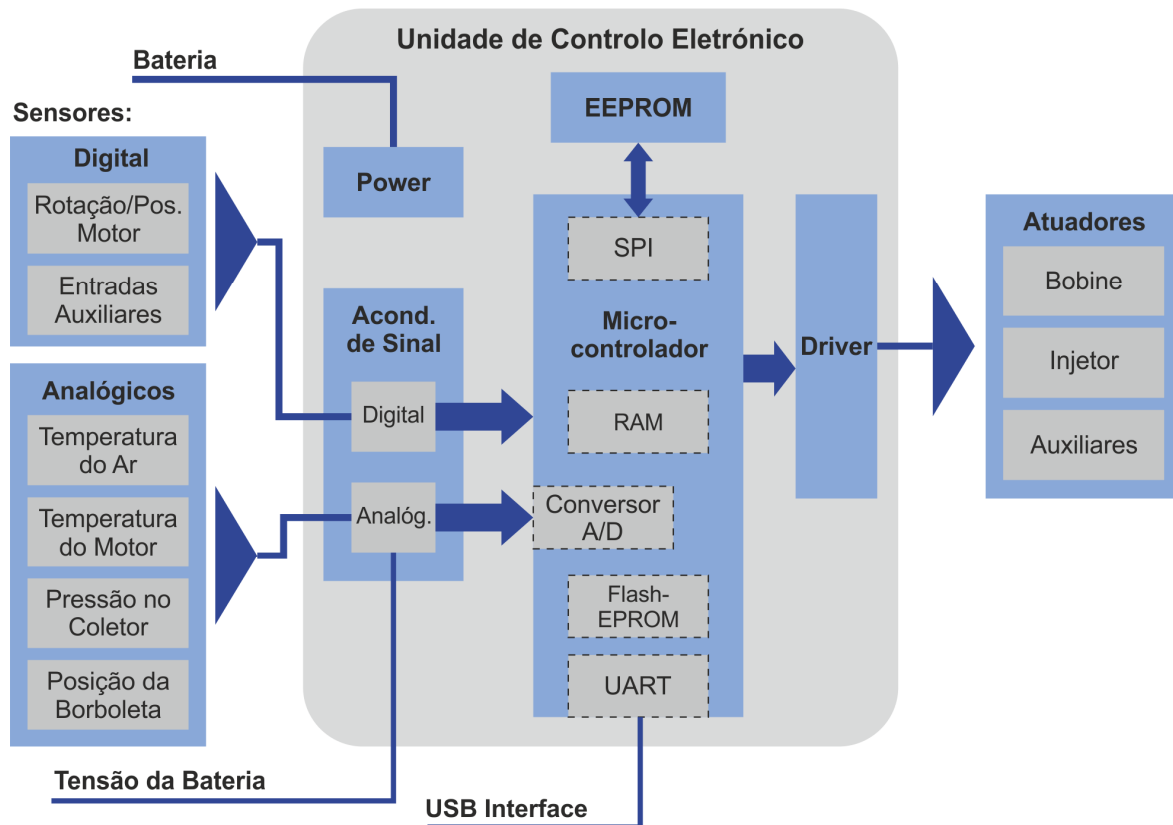


Figura 3.1 - Diagrama de blocos da ECU desenvolvida.

### 3.1.1. Microcontrolador

Na unidade de controlo é utilizado o microcontrolador PIC32MX320F128 de elevado desempenho e desenvolvido pela Microchip Technology Inc.<sup>®</sup>. Este microcontrolador caracteriza-se por um processador de 32 bits com uma frequência máxima de 80 MHz, 128 Kbytes de memória de programa *flash* e 16 Kbytes de memória estática de acesso aleatório SRAM (do inglês *Static Random Access Memory*). O microcontrolador integra um conjunto de módulos, tais como: módulo UART (*Universal Asynchronous Receiver/Transmitter*) com suporte para comunicação série RS-232, comunicação série SPI (*Serial Peripheral Interface*), 5 temporizadores de 16 bits, conversor de sinal analógico-digital de 10 bits com 16 entradas, módulo de captura e interrupções externas, entre outros.

### 3.1.2. Memória EEPROM

---

A memória EEPROM (*Electrically Erasable Programmable Read Only Memory*) utilizada na unidade de controlo é o modelo 25AA512 da Microchip Technology Inc.<sup>®</sup>. Esta memória de 512 Kbits, que comunica por um barramento série, tem capacidade para gravar os parâmetros, tabelas e mapas de ignição e injeção necessários ao funcionamento da unidade de controlo. A memória é acedida através do módulo de interface série SPI incorporado no microcontrolador.

### 3.1.3. UART interface USB

---

A unidade de controlo possui uma interface USB (*Universal Serial Bus*) para configuração e visualização dos parâmetros, tabelas e mapas de ignição e injeção. A porta série é implementada na unidade usando um conversor USB série FTDI<sup>®</sup> FT232RL que converte o sinal UART RS232 do microcontrolador para USB. Antes de realizar a comunicação, os controladores (*drivers do software*) do conversor FTDI devem ser instalados no computador a utilizar. A alimentação deste circuito é proveniente do USB e independente da alimentação da unidade de controlo, pelo que é necessário manter a unidade de controlo alimentada durante a comunicação.

### 3.1.4. Alimentação

---

A unidade de controlo desenvolvida utiliza dois reguladores de tensão lineares de baixas perdas projetados especificamente para aplicações em automóveis. O primeiro regula a tensão proveniente da bateria para 5 V, necessários para alimentar o barramento dos sensores (*VCC5V0*). O segundo regula o barramento *de 5V* para 3.3 V, barramento *VCC3V3*, que alimenta o microcontrolador, memória EEPROM, e os circuitos integrados de acondicionamento de sinal digital e analógico.

O regulador de tensão dos 5 V (*VCC5V0*) é o modelo LM2940 da Texas Instruments<sup>®</sup> com a capacidade para fornecer até 1 A. Este componente foi escolhido por apresentar uma baixa queda de tensão (tipicamente de 0.5 V para uma corrente de 1 A). Adequado para a aplicação, possui proteção contra ligações reversas da tensão de entrada. Durante fases transitórias, tais como momentos em que a tensão de entrada excede a tensão máxima de funcionamento do regulador (tipicamente 30 V), o regulador desliga-se automaticamente para proteger os circuitos internos. O mesmo sucede em

relação às proteções contra curto-circuito, excesso de corrente e sobreaquecimento que também estão integradas no regulador.

O regulador de tensão dos 3.3 V ( $VCC3V3$ ) é o modelo TC1264 da Microchip Technology Inc.<sup>®</sup> e tem capacidade para fornecer até 800 mA. Caracteriza-se pela elevada exatidão na tensão de saída, muito baixo ruído e baixa queda de tensão (tipicamente de 450 mV para uma corrente de 800 mA) que são fatores importantes para a estabilidade no funcionamento do microcontrolador. Este regulador também incorpora proteção para sobreaquecimento e correntes elevadas.

### 3.1.5. Entradas analógicas

Nas entradas analógicas são utilizados amplificadores operacionais de ganho unitário, modelos MCP6241 e MCP6242 da Microchip Technology Inc.<sup>®</sup>. Estes componentes caracterizam-se pelo baixo consumo de corrente (tipicamente 50  $\mu$ A), alimentação DC (de 0 V a uma tensão positiva) e pelas entradas/saídas *Rail-to-Rail*. Os amplificadores com a característica *DC* permitem trabalhar com tensões de alimentação unicamente positivas e a função *Rail-to-Rail* permite utilizar uma gama de tensões mínima e máxima nas suas saídas com valores muito próximo da tensão de alimentação. A aplicação dos amplificadores operacionais permite criar um filtro analógico (passa-baixo) e uma entrada de alta impedância que protege o microcontrolador em situações de curto-circuito e sobretensão nos sensores.

Conforme representado no exemplo da Figura 3.2, nas entradas analógicas o sinal dos sensores é sujeito a um divisor de tensão que permite adaptar a tensão na sua saída da gama 0 - 5 V para a gama de 0 - 3.3 V (gama de entrada do conversor analógico digital do microcontrolador). O sinal passa também por um filtro passa-baixo que elimina as altas frequências, reduzindo assim o ruído existente no sinal. Um díodo de Zener é utilizado para limitar a tensão máxima a 3.3 V, prevenindo danos no amplificador operacional ou no microcontrolador.

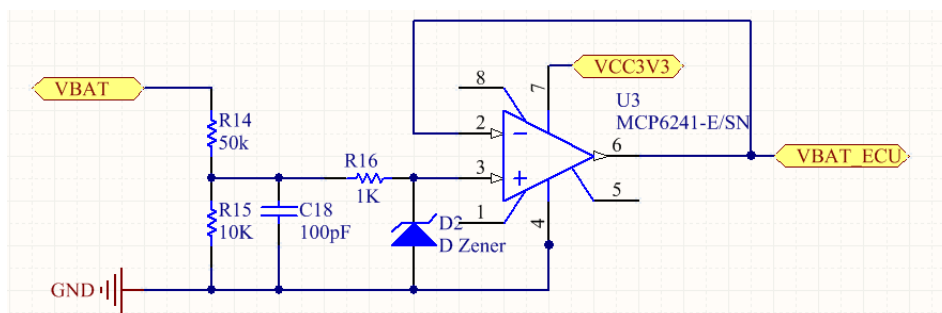


Figura 3.2 – Exemplo do circuito de acondicionamento das entradas analógicas (tensão da bateria).

### 3.1.6. Entradas digitais

Nas entradas digitais são utilizados isoladores óticos, do modelo HCPL0638 da Fairchild Semiconductor®, de portas lógicas com foto-detetores de alta velocidade (10 Mbit/s). Além de proteção ao circuito de instrumentação, o isolador ótico permite fazer a adaptação de níveis digitais, converter o nível de tensão de 0 - 5 V (sinal do sensor) para 0 - 3.3 V (sinal para o microcontrolador)

Como representado na Figura 3.3, além deste acondicionamento de sinal, nas entradas digitais são utilizados filtros passa-baixo que permitem eliminar o ruído do sinal por atenuar a amplitude das altas frequências. No caso do sensor de referência este acondicionamento é importante, pois o ruído provocado, por exemplo, pela descarga da bobine de ignição, pode fazer com que o microcontrolador interprete um novo dente (mudança no estado lógico) quando na verdade tal evento não aconteceu, influenciando o correto controlo da ignição e injeção.

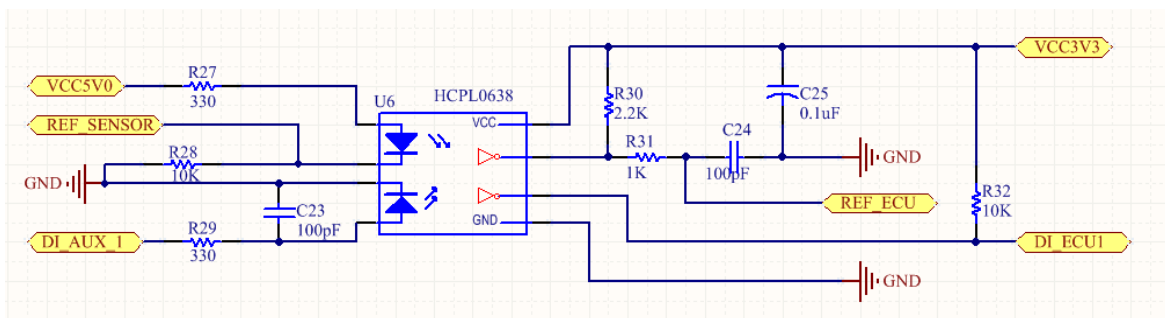


Figura 3.3 – Exemplo do circuito de acondicionamento das entradas digitais (sinal do sensor da cambota e entrada auxiliar).

### 3.1.7. Saídas de potência

As saídas de potências permitem o controlo do injetor, da bobine de ignição e dos acessórios auxiliares ao funcionamento do motor (por exemplo, controlo de relés).

De modo a separar o circuito de instrumentação do circuito de potência, aplicaram-se isoladores óticos do modelo ACPL-227 da Avago Technologies® que, pelo sinal ser transmitido através do diodo emissor de luz e foto-transistor, impedem que o ruído proveniente do módulo de potência influencie os sinais de instrumentação.

Para bobines com eletrónica de potência integrada, o controlo é efetuado através dum circuito com um transistor NPN do modelo MMBT2222L da ON Semiconductor® com o objetivo de adaptação das tensões. No entanto, para as bobines de ignição que não

possuem eletrónica de potência integrada, a unidade de controlo possui um Transístor Bipolar de Porta Isolada (IGBT, do inglês *Insulated-Gate Bipolar Transistor*), do modelo NGD8201AN da ON Semiconductor<sup>®</sup>, desenvolvido especificamente para aplicações em sistemas de ignição de automóveis. Este IGBT possui proteção contra descargas electrostáticas (ESD), sobrecarga e sobreaquecimento.

Relativamente ao controlo da alimentação do injetor (terminal ligado ao positivo da bateria) é utilizado um *Smart High-Side Power Switch* do modelo Infineon<sup>®</sup> BTS462T que integra proteção contra sobreaquecimento, sobrecarga, curto-circuito, descargas electrostáticas, perda de alimentação (*VBAT\_P*) e perda de massa (*GND*). Além disso, inclui limitador de corrente, proteção contra ligação reversa da bateria e sobrealimentação.

O injetor é ainda controlado em “*low side*” por meio de um transístor MOSFET (do inglês *Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor*) de canal N, modelo BUK6213-30C da NXP Semiconductors<sup>®</sup>, que permite uma atuação precisa em relação ao momento e duração da injeção de combustível. Este transístor MOSFET de elevado desempenho, além de rápido, também apresenta uma resistência interna muito reduzida, aumentando assim a eficiência (tensão aplicada) no controlo do injetor.

O mesmo transístor MOSFET é igualmente utilizado nas saídas auxiliares que permitem a atuação de acessórios. Por exemplo, relés para controlo da bomba de combustível, sistema de arrefecimento, alimentação, entre outras funcionalidades.

## 3.2. Firmware – algoritmo de controlo

---

Em eletrónica, o *firmware* ou algoritmo de controlo é o conjunto de instruções programadas diretamente num circuito integrado e armazenadas na sua memória de programa. O algoritmo de controlo foi escrito em linguagem C no programa MPLAB<sup>®</sup> X IDE que permite o desenvolvimento de aplicações para microcontroladores Microchip<sup>®</sup>. Este *software* é denominado de IDE (*Integrated Development Environment*) por disponibilizar um único ambiente de trabalho integrado para desenvolver o código para microcontroladores da família da Microchip<sup>®</sup>.

O algoritmo a seguir apresentado tem como principal funcionalidade reconhecer o funcionamento do motor (rotação e posição) e, em função de um conjunto de parâmetros de entrada, controlar a ignição e a injeção de combustível de um modo ajustado à carga do motor. Este algoritmo está estruturado com base em rotinas de interrupções com



diferentes prioridades, apresentadas nos fluxogramas das Figura 3.4, Figura 3.5, Figura 3.6 e Figura 3.7.

Na Figura 3.4 (a) é apresentado o fluxograma correspondente ao algoritmo de inicialização da ECU e inclui a função *main*. Na *main* são executadas as instruções de leitura dos sensores de temperatura, tensão da bateria e o cálculo da sua contribuição para o controlo em *background*, uma vez que a sua grandeza física varia lentamente. O processamento dos sensores de posição da borboleta e pressão são tratados como eventos de prioridade intermédia.

O fluxograma da Figura 3.4 (b) apresenta a interrupção de sincronismo que permite à ECU sincronizar o controlo do motor a cada volta de cambota, uma vez que acontece no instante em que a falha da roda dentada é detetada. Nesta interrupção, de alta prioridade, é calculada a velocidade de rotação da cambota em função do tempo correspondente a uma volta completa. Com esta informação e com a informação dos sensores auxiliares, a ECU calcula o modo de controlo da ignição (duração do *dwell* e avanço de ignição) e da injeção de combustível (largura de pulso e avanço de injeção) para a volta seguinte do motor.

A Figura 3.5 mostra o fluxograma do algoritmo da interrupção gerada pelo sinal do sensor da cambota. Este sinal, conjunto de pulsos correspondentes aos dentes, é processado como uma interrupção de alta prioridade, utilizando o módulo de captura do microcontrolador. Esta interrupção permite conhecer a posição da cambota em períodos fixos definidos pelos dentes da roda dentada. O controlo da ignição e da injeção, apresentados detalhadamente nas secções 3.2.8 e 3.2.9 dependem desta interrupção. Também a ocorrência da interrupção de sincronização é dependente desta, uma vez que a ECU determina a existência da falha através do tempo entre dentes, conforme explicado na secção 3.2.3.

As rotinas de controlo da ignição e da injeção de combustível, apresentadas respetivamente nas Figura 3.6 e Figura 3.7 e nas secções 3.2.8 e 3.2.9, por dependerem da velocidade de rotação e posição da cambota, são definidas como alta prioridade para manter a precisão de controlo quer no avanço de ignição, quer no tempo de injeção.

No funcionamento da ECU, quando ocorre um evento de alta prioridade, as instruções do algoritmo que estão a ser executadas são interrompidas e são processadas as instruções da interrupção. O programa volta às instruções que foram interrompidas assim que a interrupção de alta prioridade é concluída.

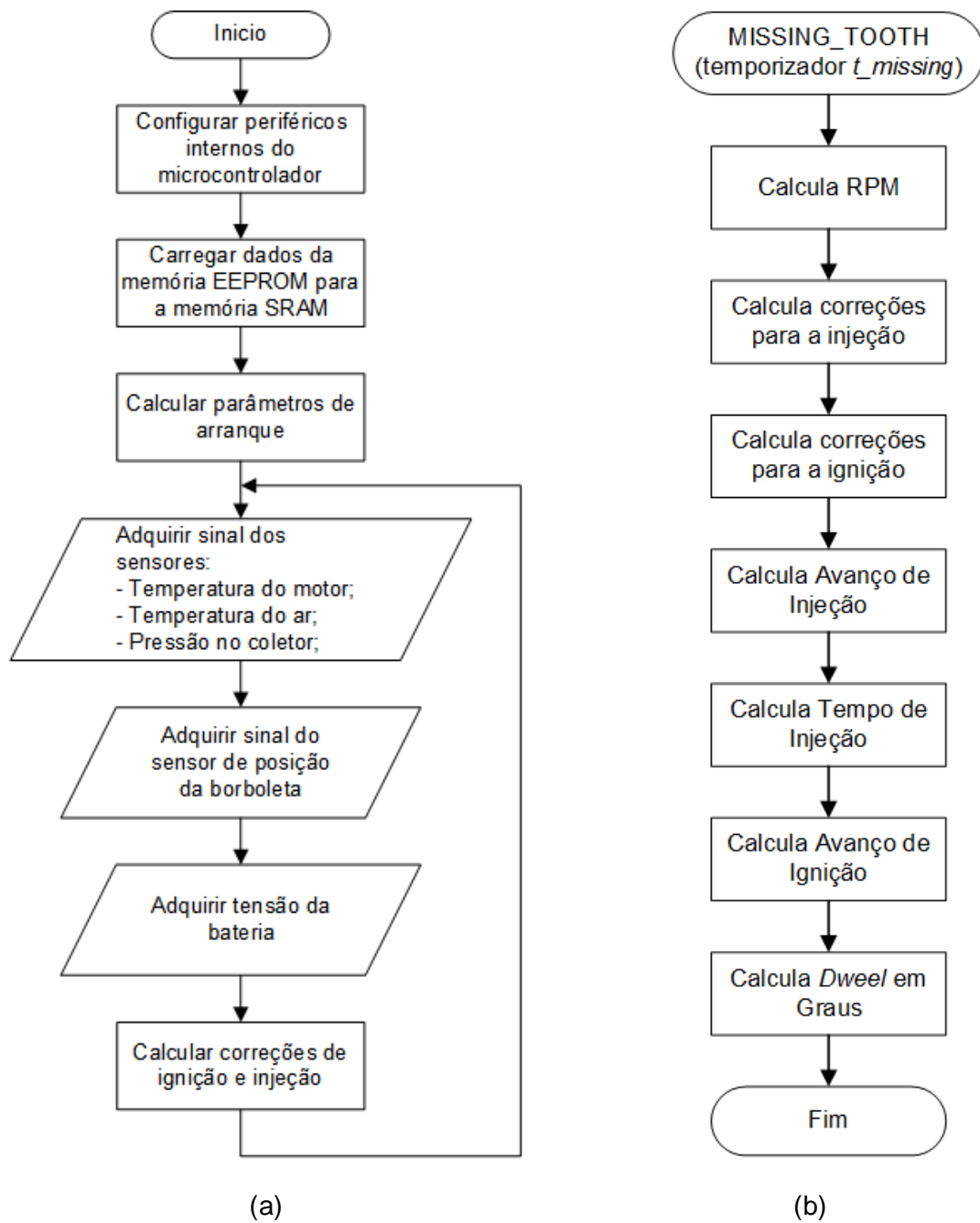


Figura 3.4 – (a) Interrupção Main “background program”; (b) Interrupção de sincronismo.

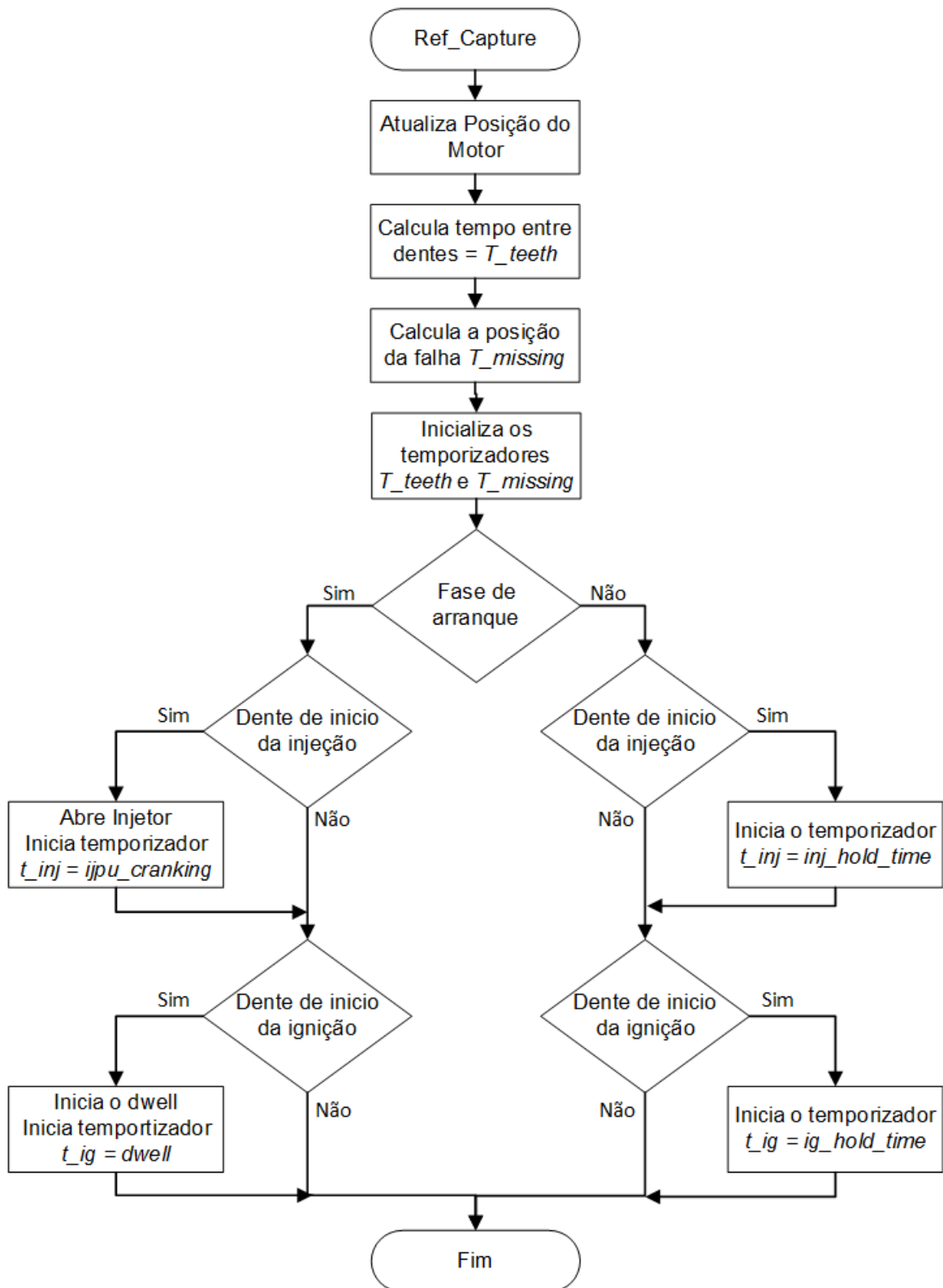


Figura 3.5 – Interrupção gerada pelo sensor de rotação/posição da cambota.

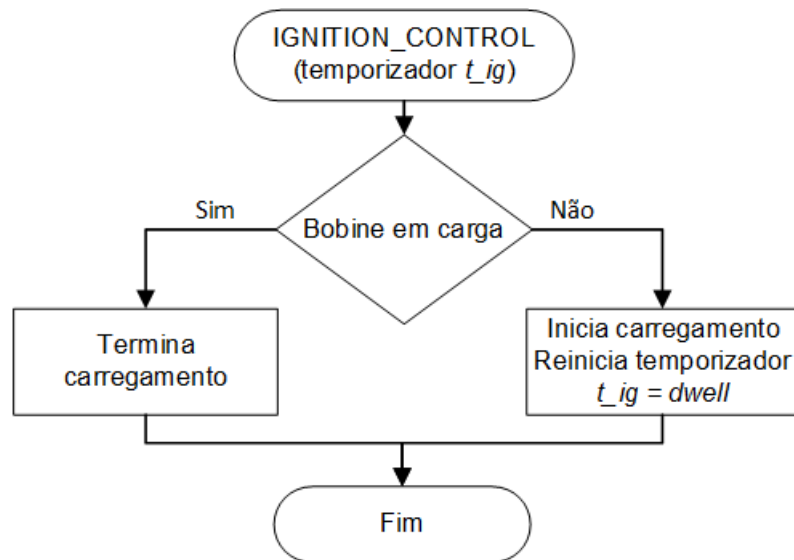


Figura 3.6 – Interrupção de controlo da ignição - temporizador  $t_{ig}$ .

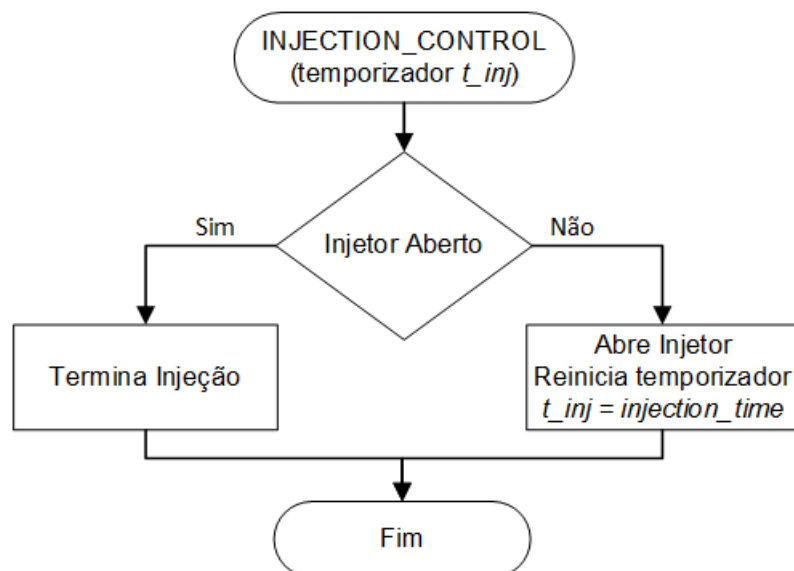


Figura 3.7 – Interrupção de controlo da injeção - temporizador  $t_{inj}$ .

### 3.2.1. Parâmetros de funcionamento

A unidade de controlo possui um conjunto de parâmetros, acessíveis e configuráveis pelo utilizador, que possibilitam uma otimização individual da programação da ECU para cada tipo de motor. Estes parâmetros devem ser configurados e corretamente ajustados aquando da instalação da unidade ao motor. Numa fase de calibração avançada, os parâmetros podem ser alterados (dentro de valores admissíveis) com o motor em funcionamento.

### 3.2.1.1. Parâmetros base

#### **Crank Ref Teeth**

O parâmetro *Crank Ref Teeth* define o número de dentes da roda dentada instalada na cambota e inclui o número de dentes em falha. Devem ser utilizadas rodas dentadas com um número de dentes igual a 36 ou 60, com 2 dentes em falha. Tipicamente são utilizadas rodas dentadas de 60 dentes, que permitem uma resolução de 3° por dente. Uma roda dentada com maior número de dentes possui maior resolução e consequentemente aumenta a precisão do controle.

#### **Tooth Ratio**

O parâmetro *Tooth Ratio* define o intervalo que permite à ECU detetar a falha dos dentes na roda dentada. A falha é detetada se o evento de captura do próximo dente acontecer depois do momento *Tooth Ratio* em que era esperado o dente. A Figura 3.8 apresenta um exemplo de deteção da falha considerando um *Tooth Ratio* de 50%.

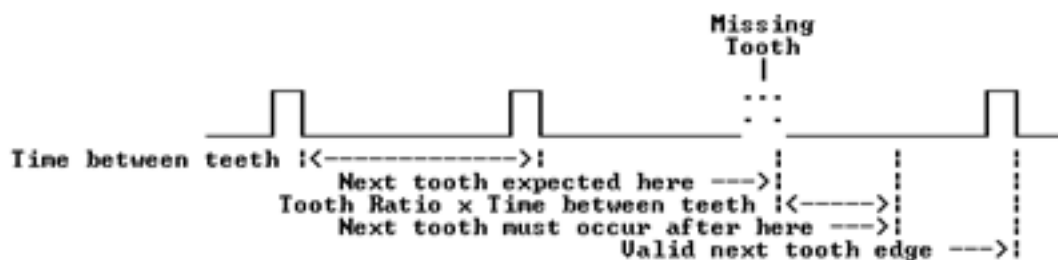


Figura 3.8 – Representação gráfica do método de cálculo do *Tooth Ratio* [21].

Para prevenir que as oscilações da rotação interfiram no evento de deteção da falha, o valor de *Tooth Ratio* deve ser configurado para que, em situação ideal, o evento aconteça depois da falha e antes do próximo dente. Contudo, a utilização de uma roda dentada com uma falha de dois dentes, permite que a falha seja detetada com maior precisão e não seja interpretada como um período normal entre dentes. Este tipo de rodas com duas falhas é mais indicado para motores que atingem velocidades de rotação elevadas.

Relativamente à posição da falha, é importante que não seja colocada próximo do ponto morto superior por ser um momento em que a velocidade de rotação do motor tem maior variação.

### ***RPM Limit***

O parâmetro *RPM Limit* define o valor de rotação a partir do qual a unidade faz corte de ignição e/ou injeção de combustível. Este parâmetro é importante para impedir danos no motor por excesso de rotação.

### ***RPM Limit Type***

O parâmetro *RPM Limit Type* permite definir o tipo de corte efetuado para impedir o aumento de rotação do motor. Podem ser definidos os seguintes cortes: 1 - corte de ignição; 2 - corte de injeção; 3 - corte de ignição e injeção.

### ***Crank Index Position***

O parâmetro *Crank Index Position* define a posição, em graus de cambota, da posição da falha da roda dentada da cambota até ao ponto morto superior. Este parâmetro deve ser o mais preciso possível para garantir um controlo rigoroso dos avanços de ignição e injeção.

### ***Engine Control Mode***

A unidade de controlo possui um algoritmo que permite definir dois modos de controlo do motor através do parâmetro *Engine Control Mode*.

No primeiro modo, denominado *Two Stroke*, ocorre uma ignição e uma injeção a cada volta de cambota. Este modo é indicado para motores que funcionam segundo o ciclo Otto de dois tempos, podendo também ser definido (não recomendado) para motores a quatro tempos. No caso dos motores a quatro tempos, como num ciclo de motor a cambota faz duas voltas, numa volta a ignição ocorre na fase de escape (desperdício de uma faísca) e a injeção ocorre com a válvula de admissão fechada o que provoca um enriquecimento extra da mistura.

No segundo modo, denominado *Four Stroke*, indicado apenas para motores a quatro tempos, ocorre uma ignição e uma injeção por cada duas voltas de cambota (um ciclo Otto em motores a quatro tempos). Este modo está associado a um algoritmo apresentado na secção 3.2.5 que permite a deteção automática da fase do motor sem utilização de um sensor de fase na árvore de cames.

### 3.2.1.2. Parâmetros de ignição

#### **Ignition Main Table**

O parâmetro *Ignition Main Table* é uma tabela, semelhante à representada na Tabela 3.1 que permite definir os valores de avanço da ignição em relação ao PMS, em graus de cambota, num conjunto de pontos, em função da velocidade de rotação e da posição da borboleta (TPS), fatores que definem a carga do motor. Esta tabela de ignição possui 6 pontos de posição de borboleta e 17 pontos de RPM, totalizando 102 pontos de otimização que devem ser ajustados para um correto avanço de ignição.

Tabela 3.1 – Exemplo da tabela *Ignition Main Table* com avanços de ignição definidos de 0 a 16000 RPM.

<b>TPS\RPM</b>	<b>0</b>	<b>1000</b>	<b>2000</b>	<b>3000</b>	<b>4000</b>	<b>5000</b>	<b>6000</b>	<b>(...)</b>	<b>16000</b>
<b>0</b>	10	12	14	16	18	20	22	(...)	30
<b>20</b>	12	14	16	18	20	22	23	(...)	32
<b>40</b>	14	16	18	20	22	23	24	(...)	35
<b>60</b>	16	18	20	22	23	24	25	(...)	38
<b>80</b>	18	20	22	23	24	25	26	(...)	38
<b>100</b>	20	22	23	24	25	26	27	(...)	38

Se os valores de RPM e TPS corresponderem exatamente a um ponto da tabela, o valor desse ponto é o usado para o cálculo do avanço de ignição. Se os valores de RPM e TPS não corresponderem exatamente a um ponto, o valor de avanço de ignição é calculado com base nos quatro pontos mais próximos através de interpolações bilineares.

O valor definido no ponto TPS=0 / RPM=0 é o avanço que a ECU terá em conta na fase de arranque, em que o controlo é efetuado com base na contagem de dentes, conforme será explicado na secção 3.2.4.

Idealmente, o ajuste dos valores da tabela deve ser efetuado com o motor em banco de potência, com indicação da performance instantânea do motor. Especial atenção deve ser tomada para assegurar que não acontece o fenómeno de detonação (*knock*) por excesso de avanço de ignição. Por outro lado, assegurar que os valores não retardam demasiado a ignição, uma vez que uma ignição retardada causa um excessivo

aumento da temperatura nas válvulas de escape. Em qualquer das situações de valores de avanço errados pode causar danos no motor.

### ***Ignition Overall Trim***

O parâmetro *Ignition Overall Trim* permite fazer um ajuste multiplicativo de todos os pontos de avanço de ignição da tabela *Ignition Main Table*. É um valor em percentagem independente da rotação e do TPS. Por exemplo, se o valor de *Ignition Overall Trim* for 10%, significa que na prática o avanço de ignição é 10% maior que o valor definido nos pontos da tabela de ignição.

### ***Ignition Delay Time***

O parâmetro *Ignition Delay Time* caracteriza o tempo decorrido desde que a ECU envia o sinal para ocorrer a ignição até ocorrer ignição na câmara de combustão. É um valor em microssegundos, tipicamente de 50 microssegundos. Em velocidades de rotação de marcha lenta este atraso é pouco significativo.

### ***Ignition Dwell Time***

O parâmetro *Ignition Dwell Time* é uma tabela, conforme representado na Tabela 3.2 que permite caracterizar a bobine de ignição. Isto é, em função da tensão da bateria, definir o tempo de carga da bobine (*dwell*) para maximizar a energia de ignição sem sobreaquecer e danificar a bobine. Quanto menor é a tensão da bateria, maior é o período que a bobine necessita de ser energizada para manter a mesma energia de ignição. A tabela dispõe de 5 pontos de caracterização. Quando a tensão corresponde exatamente a um ponto, o *dwell* é o valor desse ponto. Em situações em que a tensão da bateria esteja entre dois pontos, o *dwell* é calculado através duma interpolação linear entre esses dois pontos.

Tabela 3.2 – Exemplo da tabela *Ignition Dwell Time*.

[V]	8	10	12	14	16
[ms x 10]	44	29	27	17	14



### 3.2.1.3. Parâmetros de injeção

#### ***Injection MainTable***

O parâmetro *Injection Main Table* é uma tabela, semelhante à Tabela 3.1 que permite definir, em porcentagem, a base da largura de pulso aplicada ao injetor (tempo de abertura), em função da velocidade de rotação e da posição da borboleta (TPS). Esta tabela de injeção possui 6 pontos de posição de borboleta e 17 pontos de RPM, totalizando 102 pontos de otimização que devem ser ajustados para uma base da largura de pulso correta. Através da mistura ar/combustível o utilizador pode ajustar a largura de pulso adequando o mapa para consumos, potência, emissões, ou outro.

À semelhança da *Ignition Main Table*, se os valores de RPM e TPS corresponderem exatamente a um ponto da tabela, o valor desse ponto é o usado para o cálculo da base da largura de pulso. Se os valores de RPM e TPS não corresponderem exatamente a um ponto, a base da largura de pulso do injetor é calculada em função dos quatro pontos mais próximos através de interpolações bilineares.

A largura de pulso base (tempo de abertura do injetor) é calculada multiplicando o valor da *Injection Main Table* (em porcentagem) pelo parâmetro *Injector Scaling*. Por exemplo, se o *Injector Scaling* for 20 ms e o valor da *Ignition Main Table* 50 %, significa que o valor base da largura de pulso é 10 ms.

A Figura 3.9 representa um exemplo de um mapa cartográfico reproduzido através dos valores definidos na tabela *Injection Main Table*. Este tipo de gráficos permite uma visualização tridimensional do mapa criado.

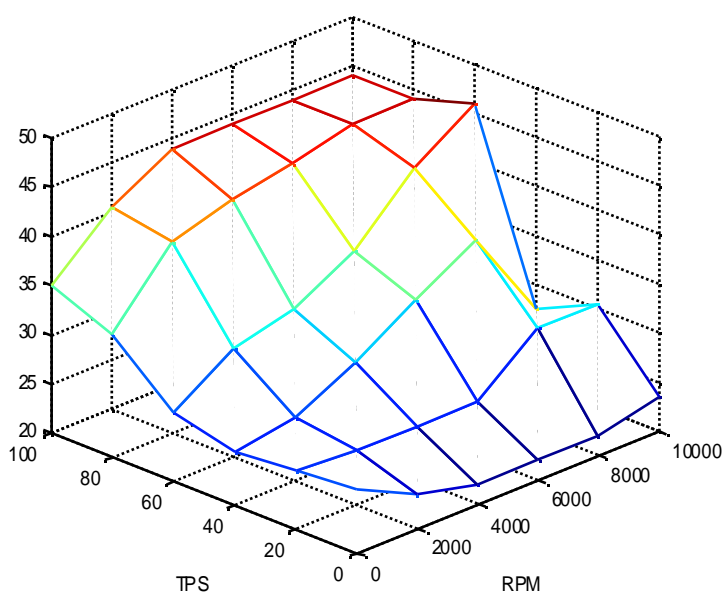


Figura 3.9 – Exemplo de um mapa cartográfico elaborado através na tabela *Injection Main Table*.

### ***Injector Scaling***

O parâmetro *Injector Scaling* define o tempo de referência utilizado para a abertura do injetor, em milissegundos. No entanto, a largura de pulso aplicada ao injetor é ajustada em função de outros parâmetros de funcionamento, conforme será apresentado na seção 3.2.7.

### ***Fuel Overall Trim***

O parâmetro *Fuel Overall Trim*, em porcentagem, permite fazer um ajuste multiplicativo ao valor base da largura de pulso. Por exemplo, considerando *Overall Trim* = 20 % e o valor base da largura de pulso de 10 ms, a largura de pulso aplicada ao injetor é de 12 ms.

### ***First Injection***

O parâmetro *First Injection* define, em porcentagem, a quantidade extra de combustível injetado na primeira injeção na fase de arranque, permitindo assim um enriquecimento que suaviza o arranque do motor.

### ***Fuel Dead Time Compensation***

O parâmetro *Fuel Dead Time Compensation* permite compensar o tempo de abertura do injetor, representado na Figura 2.11, que, em função da tensão da bateria, pode aumentar (tensão da bateria baixa) ou diminuir (tensão da bateria alta). Corresponde ao tempo, em microssegundos, que é adicionado à largura de pulso final. A tabela, conforme exemplo representado na Tabela 3.3, dispõe de 5 pontos de caracterização. Quando a tensão corresponde exatamente a um ponto, a compensação é o valor desse ponto. Em situações em que a tensão da bateria esteja entre dois pontos, a compensação é calculada através duma interpolação linear entre esses dois pontos.

Tabela 3.3 – Exemplo da tabela *Fuel Dead Time Compensation*.

[V]	-8	10	12	14	16
[usec]	1920	1540	1160	780	580

### ***Injection Timing***

O parâmetro *Injection Timing* permite definir o avanço (graus de cambota antes do PMS) a que corresponde o fim do pulso de injeção, em função da velocidade de rotação da cambota. A tabela, conforme representado no exemplo da Tabela 3.4, contém 17 pontos que permite otimizar o momento de injeção de combustível para potência, economia, emissões e estabilidade de funcionamento. Quando a velocidade de rotação corresponde exatamente a um ponto, é considerado esse valor. Caso contrário, o avanço de injeção é calculado através de uma interpolação linear com os dois pontos mais próximos.

O valor definido no ponto RPM=0 é o avanço que a ECU terá em conta na fase de arranque, conforme será explicado na secção 3.2.4.

Tabela 3.4 – Exemplo da tabela *Injection Timing*.

[RPM]	0	1000	2000	3000	4000	5000	(...)	10000
Av. [graus]	40	50	60	70	80	90	(...)	250

### **3.2.1.4. Parâmetros dos sensores**

A unidade de controlo permite que as curvas características dos sensores analógicos, temperatura do ar, temperatura do motor e pressão absoluta do coletor possam ser caracterizadas nos parâmetros a seguir apresentados:

#### ***Air Temperature Sensor Setup, Engine Temperature Sensor Setup***

Os parâmetros *Air Temperature Sensor Setup* e *Engine Temperature Sensor Setup* correspondem a tabelas, semelhantes à apresentada na Tabela 3.5, que permitem ao utilizador introduzir o valor dos níveis digitais (0 a 1023, resultante da conversão do ADC) que correspondem às temperaturas dos pontos indicados na tabela. O algoritmo recorre a estas tabelas para calcular as temperaturas do ar admitido e do motor. Quando a temperatura não corresponde exatamente a um desses pontos, é calculada por uma interpolação linear em função dos dois pontos mais próximos.

O utilizador deve converter o valor de resistência do sensor em Ohms,  $R_S$ , para o nível de ADC correspondente,  $ADC_S$ , através da equação (3.1):

$$ADC_S = \frac{5 \times 1023}{3.3} \times \frac{\frac{1}{R_S + 1000}}{\frac{1}{R_S + 1000} + 500} \quad (3.1)$$

Tabela 3.5 – Exemplo da tabela de configuração dum sensor de temperatura do tipo NTC.

TEMP (°C)	-20	-10	0	10	20	30	(...)	130
ADC	1012	998	978	950	912	865	(...)	15

### **MAP Sensibility Setup**

O parâmetro *MAP Sensibility Setup* corresponde à sensibilidade (dada em mV/kPa) do sensor de pressão absoluta no coletor e permite à ECU, juntamente com o parâmetro *MAP Offset Setup*, calcular a pressão no coletor.

### **MAP Offset Setup**

O parâmetro *MAP Offset Setup* corresponde ao *offset* do sensor de pressão absoluta no coletor (dado em mV).

### **TPS LO, TPS HI**

Os parâmetros *TPS LO* e *TPS HI* permitem configurar na unidade de controlo os valores de TPS na posição de borboleta totalmente fechada e totalmente aberta, respetivamente. A ECU adquire automaticamente o valor do sensor para cada posição, sendo apenas necessário colocar a borboleta na posição a configurar no instante em que se envia a instrução de configuração. Estes valores devem ser repostos sempre que o sensor é removido ou substituído.

## **3.2.1.5. Parâmetros auxiliares de compensação**

---

Os parâmetros auxiliares de compensação permitem otimizar o controlo da ignição e da injeção. A otimização é efetuada em função do valor dos sensores de temperatura do motor, temperatura do ar e pressão absoluta no coletor. As compensações são definidas em tabelas em que cada célula corresponde a uma determinada temperatura ou pressão. Se a temperatura ou pressão corresponder exatamente a um ponto da tabela, é

utilizado o valor de compensação desse ponto. Caso contrário, é calculado a compensação em função dos dois pontos de temperatura/pressão e compensação mais próximos através de interpolação linear.

Em situações em que não se pretenda qualquer contribuição do sensor para o controlo da ignição e/ou da injeção, a tabela correspondente deve ser mantida a zero. O mesmo critério deve ser mantido em situações em que o sensor não está conectado à unidade de controlo.

### ***Ignition – Air Temp Comp***

O parâmetro *Ignition - Air Temp Comp* permite compensar o avanço de ignição em função da temperatura do ar, numa tabela semelhante à Tabela 3.6. A compensação, em graus de cambota, é adicionada ao avanço base da *Ignition Main Table*.

Tabela 3.6 – Exemplo da tabela de compensação *Ignition - Air Temp Comp*.

<b>TEMP (°C)</b>	<b>-20</b>	<b>-10</b>	<b>0</b>	<b>10</b>	<b>20</b>	<b>30</b>	<b>(...)</b>	<b>130</b>
<b>Av. [graus]</b>	-12	-9	-6	-3	0	0	(...)	-15

### ***Fuel – Air Temp Comp, Fuel – Eng Temp Comp, Fuel – MAP Comp***

Os parâmetros *Fuel – Air Temp Comp*, *Fuel – Eng Temp Comp* e *Fuel – MAP Comp* permitem compensar o tempo de injeção. O valor de compensação é introduzido em percentagem e corresponde à percentagem de largura de pulso que é adicionada à largura de pulso base. A Tabela 3.7 apresenta um exemplo da tabela de compensação *Fuel – MAP Comp*, com valores típicos introduzidos.

Tabela 3.7 – Exemplo da tabela de compensação *Fuel – MAP Comp*.

<b>Pressão [kPa]</b>	<b>0</b>	<b>10</b>	<b>20</b>	<b>30</b>	<b>40</b>	<b>50</b>	<b>(...)</b>	<b>100</b>
<b>Comp. [%]</b>	-100	-90	-80	-70	-60	-50	(...)	0

### 3.2.2. Inicialização

---

A fase de inicialização, representada anteriormente no fluxograma da Figura 3.4 (a), é definida como o momento em que o microcontrolador passa do estado desligado (sem alimentação) para o estado de processamento e executa as tarefas de configuração dos periféricos utilizados na unidade de controlo, tais como, temporizadores, conversores analógicos, portos de entrada e saída, módulo UART, módulo SPI, entre outros.

Na fase de inicialização, o microcontrolador comunica com a memória EEPROM e guarda em variáveis da memória SRAM todos os valores existentes na EEPROM, correspondentes a parâmetros de funcionamento do motor, sensores, atuadores, mapas de ignição e injeção.

Nesta fase, é importante garantir que as saídas não ficam ativadas. Por exemplo, se na fase de inicialização as saídas para a bobine e para o injetor forem ativadas sem o respetivo controlo, temporizado, o excesso de tempo de atuação pode provocar danos irreversíveis, por se tratar de componentes sensíveis à duração da atuação.

Além disso, o microcontrolador lê os sinais de todos os sensores e calcula as temperaturas do motor e do ar, bem como a pressão do coletor que corresponde à pressão atmosférica. Em função dos valores dos sensores, o microcontrolador calcula os parâmetros de ignição e injeção para a fase de arranque.

### 3.2.3. Detecção do Ponto Morto Superior

---

A partir do momento em que é detetado o movimento da cambota, o tempo entre dentes é conhecido pela unidade de controlo pela utilização de um temporizador  $T_{teeth}$ . Após cada dente, a unidade de controlo inicializa um temporizador secundário  $T_{missing}$  com um valor que corresponde ao valor de  $T_{teeth}$  com um incremento do valor definido em *Tooth Ratio*, calculado pela equação:

$$T_{missing} = T_{teeth} + (T_{teeth} \times \textit{Tooth Ratio}) \quad (3.2)$$

Se ocorrer o evento de *overflow* do temporizador  $T_{missing}$ , é gerada uma interrupção de alta prioridade que permite à unidade de controlo reconhecer o momento da falha e assim conhecer a posição do motor. Neste instante, a unidade de controlo

sabe que a cambota se encontra a determinado número de graus, definido em *Crank Index Position*, da posição de PMS do pistão.

O termo *overflow* define o momento em que um temporizador passa o seu valor máximo, por sua vez dependente da taxa de incremento bem como do número de *bits* associado ao contador. A zona de funcionamento do motor de combustão onde é detetada a falha, corresponde à menor carga de processamento do microcontrolador, por ser o espaço na cambota em que o tempo entre dentes é maior e por isso não há interrupções geradas pela captura de dentes. Assim, também se inicia o processo de cálculo dos novos valores de controlo da ignição e injeção.

Se for gerada uma nova interrupção pela captura de um dente sem que tenha ocorrido o evento de *overflow* do temporizador *T\_missing*, a unidade de controlo interpreta que naquele intervalo não existia a falha da cambota e a posição da cambota é apenas incrementada um número de graus fixo (que corresponde ao avanço por dente). O temporizador *T\_missing* é reiniciado com um novo valor calculado pela Equação (3.2) em função do tempo entre os dois últimos dentes.

### 3.2.4. Fase de arranque

---

Uma vez que é detetada a rotação da cambota, a unidade de controlo tem dois modos de operação, dependendo da velocidade de rotação medida. Se a velocidade de rotação estiver na gama de arranque, velocidade dada pelo motor elétrico de arranque (250 - 300 RPM), a ECU encontra-se em operação no modo de *cranking*. É uma fase em que a velocidade de rotação do motor se altera rapidamente com acelerações elevadas e, por isso, a posição do motor é conhecida apenas pelo sinal do sensor da cambota. Por exemplo, na mesma volta de cambota (360°) o tempo entre dois dentes pode reduzir-se cerca de cinquenta vezes desde o início ao final da rotação, considerando que o motor atinge a velocidade de 500 rpm ainda nessa revolução. Assim, por não ser possível manter uma precisão na atuação (pela utilização de temporizadores), o controlo da injeção e da ignição funcionam de modo diferente.

O avanço de ignição passa a ser controlado unicamente pela captura dos dentes da cambota, ou seja, o que define o momento da ignição é a deteção de determinado dente, pelo que pode no máximo estar associado um erro de 1.5° de cambota (metade do intervalo de um dente), para uma roda dentada de 60 dentes. O avanço de ignição de arranque é definido na célula TPS=0 / RPM=0 do parâmetro *Ignition Main Table* e os

dentados de início e fim do *dwell* são calculados com base nesse valor, para um erro de avanço mínimo.

Quanto ao controlo da injeção, o tempo da abertura do injetor é definido pelo mapa principal de injeção *Injection Main Table*. No entanto, para melhorar o arranque do motor, o utilizador pode definir uma quantidade extra de combustível para a primeira injeção através do parâmetro *First Injection*. À semelhança da ignição, o avanço de injeção é também controlado pela contagem dos dentes da cambota mas, tratando-se de um sistema de injeção indireta o erro (no máximo 3º em graus de cambota), é sempre arredondado para o valor superior para melhorar a resposta e o arranque do motor (enriquecimento da mistura).

Após a fase de arranque, quando o motor atinge e mantém a velocidade de marcha lenta (velocidade de rotação acima dos 500 rpm), a injeção e ignição são controladas tendo em conta os valores dos sensores e os mapas cartográficos que definem a carga do motor.

### **3.2.5. Deteção da fase do motor**

---

A utilização de uma roda dentada na cambota com um conjunto de dentes e uma falha (dois dentes retirados) proporciona à unidade de controlo uma referência do PMS do pistão. No entanto, como explicado na secção 2.1, num motor que funcione num ciclo Otto de quatro tempos, um ciclo de motor (duas voltas de cambota) implica que a posição da falha da cambota seja repetida duas vezes. Apenas com a utilização de um sensor adicional colocado na árvore de cames (que roda a metade da velocidade da cambota), que só concretiza uma rotação por ciclo do motor, é que é possível às unidades de controlo detetar a fase do motor (posição absoluta do motor em relação ao ciclo Otto).

Na tentativa de eliminar a necessidade de aplicação de um sensor na árvore de cames dos motores monocilíndricos, foi desenvolvido um algoritmo que determina a fase do motor pela análise das oscilações da velocidade de rotação da cambota. A Figura 3.10 mostra a velocidade da cambota ao longo do tempo de um motor monocilíndrico a quatro tempos. Pela sua análise, pode ser visto que tipicamente a velocidade do motor oscila entre dois valores. Este padrão está diretamente relacionado com o ciclo Otto de motores de combustão interna, em que, para completar um ciclo, a cambota tem de efetuar duas voltas. Numa das voltas o pistão move-se para cima para comprimir a mistura de ar/combustível e, apesar das perdas mecânicas, a ignição acelera a cambota. Na volta seguinte, o pistão move-se para cima para expelir os gases resultantes da combustão e,



como não há ignição, perde velocidade. Esta oscilação na velocidade de rotação é mais perceptível em baixas velocidades (ralenti).

Para detetar a fase do motor, o algoritmo desenvolvido analisa uma consistência de pontos em que a velocidade da cambota oscila entre um valor inferior (Figura 3.10, ponto a)) e um valor superior (Figura 3.10, ponto b)), admitindo assim, que situações anómalas (Figura 3.10 (c)) sejam desprezadas para não causar falhas. As situações anómalas podem ser causadas, por exemplo, pela aceleração/desaceleração do motor ou por uma falha na ignição.

Quando o motor inicia o seu funcionamento a partir do estado de parado, a unidade de controlo não conhece a fase do motor e gera uma ignição e uma injeção por cada volta de cambota. Assim, uma injeção não é efetuada com a abertura da válvula de admissão e uma ignição é desperdiçada por ocorrer no curso de escape. Por se tratar de uma fase transitória que dura um período de tempo muito curto, esta situação pode ser aceitável pois o enriquecimento de combustível é necessário para o arranque do motor. Uma vez que na fase de arranque a variação da oscilação pode ser bastante irregular, o algoritmo de deteção de fase do motor é executado apenas quando o motor atinge a velocidade estável (ralenti). Quando é detetada a fase do motor, o método de controlo muda para uma única ignição e uma única injeção por cada ciclo do motor.

O algoritmo de deteção da fase do motor elimina o custo de adicionar um sensor da árvore de cames, os custos de instalação e a sua adaptação mecânica na árvore de cames, o que na maioria dos motores monocilíndricos pode ser complicado devido à falta de espaço disponível. Além disso, elimina uma faísca e uma injeção por cada ciclo do motor, permitindo o funcionamento em modo “sequencial”, resultando num sistema com maior eficiência.

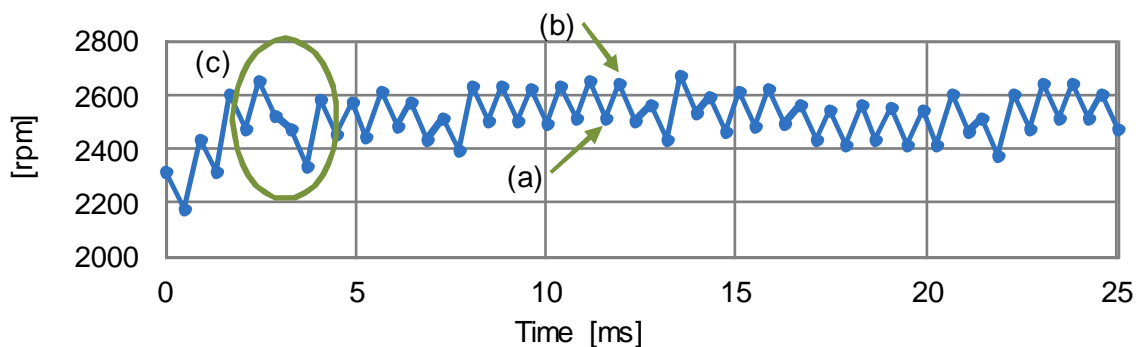


Figura 3.10 – Exemplo de análise da velocidade de rotação da cambota para deteção da fase do motor.

### 3.2.6. Cálculo do avanço de ignição

---

O avanço de ignição final é calculado em função dos parâmetros *Ignition Main Table*, *Ignition Overall Trim* e *Ignition – Air Temp Comp*, de acordo com a equação:

$$ignition\_timing = mt\_ign + (mt\_ign \times ovrl\_ign) + at\_ign \quad (3.3)$$

onde *ignition\_timing* é o avanço de ignição final em graus de cambota, *mt\_ign* o valor interpolado na tabela *Ignition Main Table*, *ovrl\_ign* o valor definido em *Ignition Overall Trim* e *at\_ign* o valor interpolado na tabela *Ignition – Air Temp Comp*.

### 3.2.7. Cálculo do tempo de abertura do injetor

---

O tempo de abertura final do injetor é calculado em função dos parâmetros *Fuel Main Table*, *Fuel Overall Trim*, *Fuel – Air Temp Comp*, *Fuel – Eng Temp Comp*, *Fuel – MAP Comp*, de acordo com a equação:

$$\begin{aligned} inj\_aux &= (IJP U \times mt\_inj) + (IJP U \times mt\_inj \times ovrl\_inj) \\ injection\_time &= inj\_aux \times (1 + at\_inj + et\_inj + map\_inj) \end{aligned} \quad (3.4)$$

onde *injection\_time* é o tempo final da largura do pulso de injeção em milissegundos, *IJP U* o tempo definido no parâmetro *Injector Scaling*, *mt\_inj* o valor interpolado na tabela *Fuel Main Table*, *ovrl\_inj* o valor definido em *Injection Overall Trim* e *at\_inj*, *et\_inj* e *map\_inj* os valores interpolados nas tabelas de compensação de injeção dos sensores de temperatura do ar, temperatura do motor e pressão absoluta no coletor, respectivamente.

### 3.2.8. Controle da bobine

---

Depois de efetuar o cálculo do avanço de ignição e do tempo de *dwell* (tempo de carga da bobine), o algoritmo desenvolvido realiza o controle da bobine de ignição através da monitorização da posição da cambota e de um temporizador *t\_ig*. Em função da velocidade de rotação do motor, a ECU calcula o tempo de *dwell* em graus, o que

permite conhecer o dente de início da carga da bobine. Contudo, o início da carga da bobine (c) dificilmente coincide com o início do dente (a), que gera o evento de captura. Então, em função da velocidade de rotação, é calculado o tempo *ig\_hold\_time* (b) decorrido desde o evento de detecção do dente até ao instante em que se inicia o carregamento da bobine. Ao fim desse período, a bobine é carregada durante o tempo calculado (d), conforme representado na Figura 3.11.

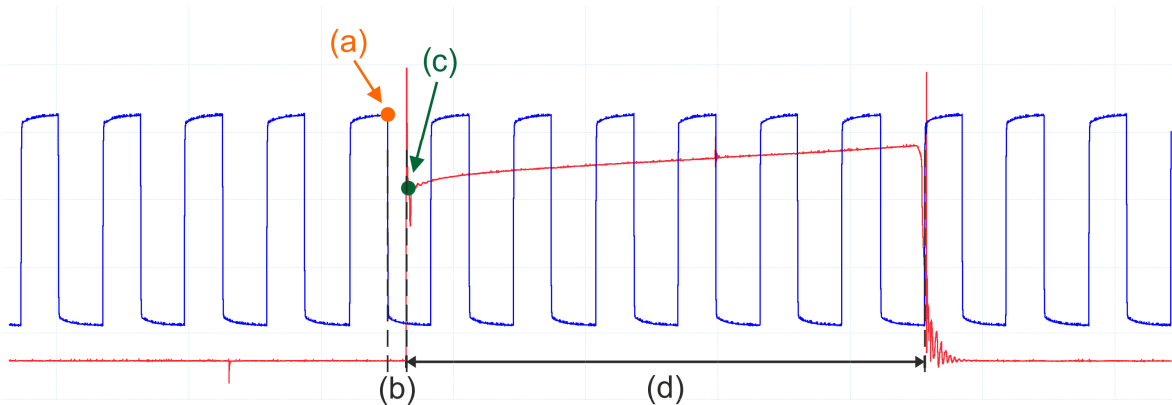


Figura 3.11 – Representação gráfica do método de controlo do sinal para a bobine de ignição.

### 3.2.9. Controlo do injetor

De modo similar ao controlo da bobine, a atuação do injetor também é controlada pela posição da cambota e por um temporizador *t\_inj*. Em função da velocidade de rotação do motor, a ECU calcula o tempo de injeção em graus, o que permite conhecer o dente de início do pulso de injeção. Contudo, o início do pulso (c) dificilmente coincide com o início do dente (a), que gera o evento de captura. Então, em função da velocidade de rotação, é calculado o tempo *inj\_hold\_time* (b) decorrido desde o evento de detecção do dente até ao instante em que se inicia o pulso de injeção. Ao fim desse período, o injetor é atuado durante o tempo calculado para a largura de pulso (d), conforme representado na Figura 3.12.

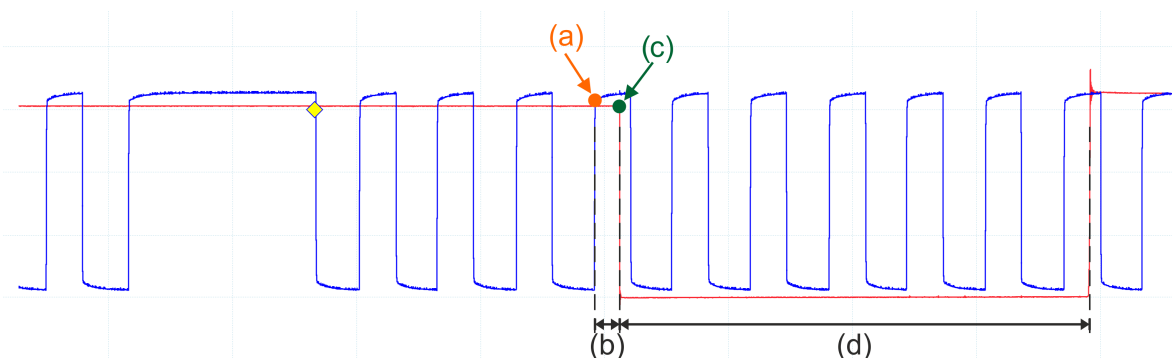


Figura 3.12 – Representação gráfica do método de controlo do sinal para o injetor.

### 3.2.10. Corte de ignição e injeção

---

Quando a velocidade de rotação do motor é superior à velocidade máxima definida no parâmetro *RPM Limit*, a unidade de controlo corta a ignição e/ou a injeção do combustível, em função do que for definido no parâmetro *RPM Limit Type*. Como não ocorre combustão, as perdas mecânicas do motor fazem com que a velocidade de rotação diminua. A partir do momento que a rotação do motor é inferior ao limite, a ignição e a injeção retomam ao funcionamento normal.

### 3.2.11. Protocolo de comunicação

---

O protocolo de comunicação estabelecido permite a comunicação entre o computador e a unidade de controlo, possibilitando a introdução e visualização de todos os parâmetros apresentados na secção 3.2.1. Além disso, através do protocolo de comunicação, é ainda possível visualizar as condições atuais de funcionamento e controlo, tais como: temperatura do motor, temperatura do ar, pressão no coletor, posição da borboleta, velocidade de rotação, tensão da bateria, tempo de injeção, avanço de injeção, tempo de *dwell*, avanço de ignição, compensações atuais, entre outros dados.

Os parâmetros de funcionamento podem ser alterados com o motor parado e com o motor em funcionamento. No entanto, nas situações de comunicação com o motor em funcionamento, as alterações devem ser efetuadas com valores moderados que não coloquem em causa o bom estado do motor.

No protocolo de comunicação foi adotada uma estrutura que permite a escrita e leitura de parâmetros unitários, vetores e matrizes, de acordo com a seguinte convenção:

#### Parâmetros unitários:

- Instrução de leitura: rkXX\n (exemplo: rk02\n);
- Instrução de escrita: w kXX=A\n (exemplo: w k02=15\n);
- Resposta à instrução de leitura: rkXX=A\n (exemplo: rk02=15\n),

em que XX corresponde ao código do parâmetro a ler/escrever que é sempre composto por dois dígitos, A corresponde ao valor a escrever/guardado e “\n” corresponde à instrução “enter”, representando o fim da *string* enviada.

### **Parâmetros vetores:**

- Instrução de leitura: rvXXZZ\n (exemplo: rv1205\n);
- Instrução de escrita: wvXXZZ=A\n (exemplo: w k1205=20\n);
- Resposta à instrução de leitura: rvXXZZ=A\n (exemplo: rv1205=20\n),

em que XX corresponde ao código do parâmetro a ler/escrever que é sempre composto por dois dígitos, ZZ corresponde à posição do vetor (sempre dois dígitos), A corresponde ao valor a escrever/guardado e “\n” corresponde à instrução “enter”, representando assim o fim da *string* enviada.

### **Parâmetros matrizes:**

- Instrução de leitura: rmXXZZYY\n (exemplo: rm010201\n);
- Instrução de escrita: wmXXZZYY=A\n (exemplo: w m010201=20\n);
- Resposta à instrução de leitura: rmXXZZYY=A\n (exemplo: rm010201=20\n),

em que XX corresponde ao código do parâmetro a ler/escrever que é sempre composto por dois dígitos, ZZ corresponde à linha da matriz (sempre dois dígitos), YY corresponde à coluna da matriz (sempre dois dígitos), A corresponde ao valor a escrever/guardado e “\n” corresponde à instrução “enter”, representando assim o fim da *string* enviada.

No Anexo C é apresentada uma tabela com a identificação dos códigos de todos os parâmetros que podem ser escritos e/ou lidos através do protocolo anteriormente apresentado.

*Esta página foi intencionalmente deixada em branco*

## 4. Protótipo

---

Neste capítulo é apresentado o projeto da Placa de Circuito Impresso (PCB, do inglês *Printed Circuit Board*) desenvolvida no *software* Altium Designer® para a unidade de controlo de baixo custo que permite o controlo dos sistemas de ignição e injeção. A PCB permitiu a realização de ensaios experimentais ao funcionamento do *hardware* e *software* desenvolvidos. No final do capítulo é apresentada a PCB e uma estimativa do custo do fabrico para o protótipo desenvolvido.

### 4.1. Introdução

---

Antes do projeto da PCB efetuaram-se várias montagens experimentais dos circuitos elétricos a implementar em placa de montagem (*breadboard*). Numa primeira fase, testaram-se os circuitos de forma independente: circuito de acondicionamento de sinal digital, sinal analógico, controlo da bobine, controlo do injetor, saídas auxiliares, comunicação SPI e comunicação série USB. Numa segunda fase efetuaram-se testes com todos os circuitos interligados e em funcionamento simultâneo. Deste modo foi possível comprovar a compatibilidade eletromagnética dos componentes e o bom funcionamento geral do circuito.

No caso das entradas analógicas e digitais optou-se por testar os circuitos a receber sinais diretamente de sensores instalados num motor em funcionamento. Principalmente para o circuito do sinal do sensor de referência, do tipo de efeito de Hall, o teste em condições de trabalho reais permitiu avaliar o comportamento do circuito de acondicionamento do sinal quando sujeito a oscilações de rotação e ruído elétrico proveniente do sistema de ignição.

Relativamente às saídas de potência, simulou-se um sinal PWM (do inglês *Pulse-Width Modulation*) com o microcontrolador instalado em *kit* de desenvolvimento, ChipKit™ da Digilent, e verificou-se o correto funcionamento do injetor e da bobine durante um longo período de tempo.

Os testes práticos permitiram efetuar melhorias no circuito elétrico para aumentar a estabilidade do sistema, principalmente ajustes no valor das resistências e condensadores dos filtros passa-baixo.

## 4.2. O software Altium Designer®

---

O Altium Designer® é um *software* profissional de desenvolvimento de PCB. É um *software* com um ambiente de trabalho simples e intuitivo que permite o projeto de PCB de precisão e de elevada complexidade. O *software* contém um conjunto de funções unificadas e de interface comum que permitem reduzir o tempo de projeto e a possibilidade de ocorrência de erros [22].

A Altium®, empresa que comercializa o *software*, permite a sua utilização através da subscrição da versão de avaliação Altium Designer® 15.1, durante o período de trinta dias. Além disso, a subscrição inclui o acesso à plataforma da Altium® que disponibiliza um conjunto de bibliotecas de componentes para utilização no *software*. O projeto de PCB apresentado foi desenvolvido utilizando a versão de avaliação gratuita.

## 4.3. Escolha dos componentes

---

No projeto do protótipo da unidade de comando de baixo custo pretendia-se uma PCB de reduzidas dimensões, para reduzir o espaço necessário na sua aplicação nos motores monocilíndricos, que tipicamente, também são de dimensões reduzidas. Por outro lado, o custo de fabrico aumenta em função da área da PCB e, por isso, quanto menor a PCB, menor o seu custo. Por estes motivos, optou-se pela utilização maioritária de componentes de superfície, conhecidos por SMD (do inglês *Surface Mount Device*). A utilização de componentes SMD, contrariamente aos componentes que requerem a furação da placa (*through-hole*), também permite o aproveitamento das duas faces da PCB. Por outro lado, estes componentes possuem um encapsulamento mais compacto quando comparado com o seu equivalente no formato *through-hole* que envolve o uso de pinos dos componentes que são inseridos em furos abertos na PCB e soldados à superfície no lado oposto.

Relativamente ao conector para a PCB, selecionaram-se o modelo Amp Seal 9-6437287-8 da TE Connectivity® de 26 pinos e encapsulamento *through-hole* e o modelo TE Connectivity® 3-1437290-7, conforme representado na Figura 4.1. Das características destes conectores destacam-se a carcaça de construção em material Polibutileno Tereftalato (PBT) com classificação UL 94V-0, o isolamento dos pinos, a gama de temperaturas de funcionamento e as dimensões reduzidas. Por estas características, os conectores são adequados para a utilização em ambiente automóvel. Estes conectores



utilizam pinos do modelo TE Connectivity® 3-1447221-4 com capacidade para uma corrente até 6 amperes e são indicados para fios com uma seção de 0.5 mm<sup>2</sup>.

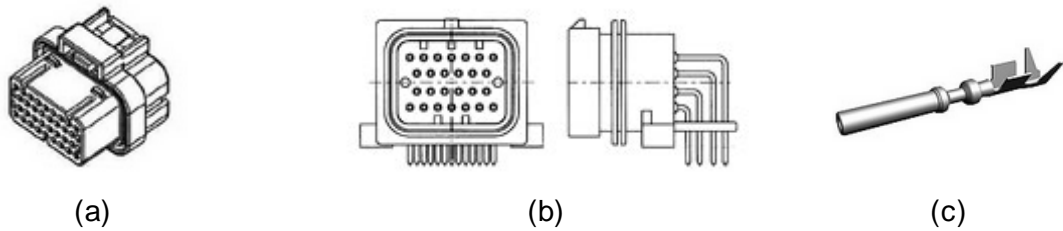


Figura 4.1 – (a) Conector 3-1437290-7, (b) Conector 9-6437287-8, (c) pinos 3-1447221-4 da TE Connectivity®.

## 4.4. Projeto da PCB

---

A fase de projeto da PCB pode ser subdividida em duas fases distintas. A primeira fase corresponde ao desenho do esquemático elétrico no *software* e a segunda fase ao desenho da PCB.

Na primeira fase, desenhou-se o circuito elétrico (apresentado no Anexo A) de acordo com o dimensionado e descrito na seção 3.1, recorrendo às bibliotecas de componentes disponibilizadas pela Altium® que, além do desenho do componente, inclui as suas propriedades de encapsulamento (*footprint*, dimensões e desenho 3D). O termo inglês *footprint* define a área de cobre disponível para soldadura do componente na PCB. Ainda nesta fase, caracterizaram-se os componentes através da seleção de uma *footprint* mais adequada para a soldadura a estanho manual.

Na segunda etapa, definiram-se as dimensões pretendidas para a PCB e separaram-se os componentes em categorias de acordo com a sua funcionalidade. De um modo geral, podem-se classificar duas categorias quanto à tipologia do circuito. A primeira contém os componentes que pertencem ao circuito de instrumentação, processamento, comunicação e acondicionamento dos sinais dos sensores. A segunda contém os componentes do circuito de potência (MOSFETS, transístor, IGBT) que são suscetíveis de causar maior interferências elétricas e eletromagnéticas. Além disso, como as altas frequências (ruído) produzidas no circuito de potência (proveniente dos atuadores) podem interferir no circuito de instrumentação (que funciona a um nível de tensão inferior e precisa de estabilidade nos sinais), estes circuitos foram separados eletricamente por isoladores óticos.

Na PCB os componentes de cada categoria foram posicionados nas duas faces de acordo com a sua funcionalidade: analógicos, digitais, processamento, alimentação,

comunicação, potência. Os condensadores foram posicionados perto dos respectivos circuitos integrados para eliminar ruído de alta frequência que pode causar erros de funcionamento. Também o cristal manteve-se perto do microcontrolador por ser um elemento que precisa de estabilidade.

Optou-se também pela utilização de planos de massa. Os planos de massa permitem obter um circuito elétrico com melhor condutividade elétrica à massa e maior simplicidade de ligações à massa. Os planos de massa têm ainda a vantagem de diminuir as interferências eletromagnéticas e diminuir a resistência nas ligações de massa. Para garantir o isolamento de circuitos, os planos de massa dos circuitos de potência e instrumentação foram mantidos separados. A Figura 4.2 apresenta o protótipo projetado no *software* Altium e permite facilmente visualizar a separação entre os planos de massa das zonas de instrumentação (área maior) e potência (área menor).

Todos os componentes da PCB estão identificados e numerados para permitir a fácil identificação do componente de acordo com esquemático elétrico apresentado no Anexo A. A nomenclatura utilizada permite classificar os componentes por categoria: Jx – conetores, Ry – resistência, Cx – condensador, Dx – diodo, LDx – diodo emissor de luz (LED), VRx – regulador de tensão, M1 – memória, Ux – circuitos integrados (microprocessador, amplificadores operacionais, isoladores óticos e FTDI), X1 – cristal, onde x corresponde à numeração do componente.

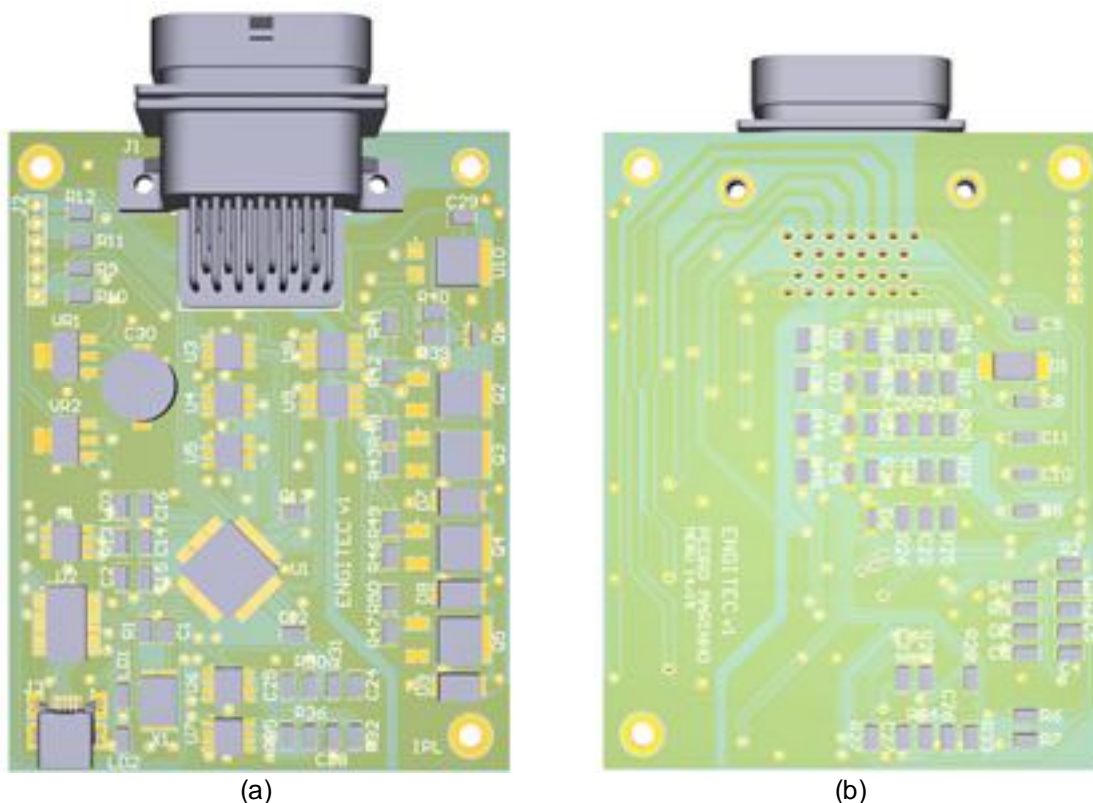


Figura 4.2 – Visualização 3D do protótipo em *software* Altium Design.

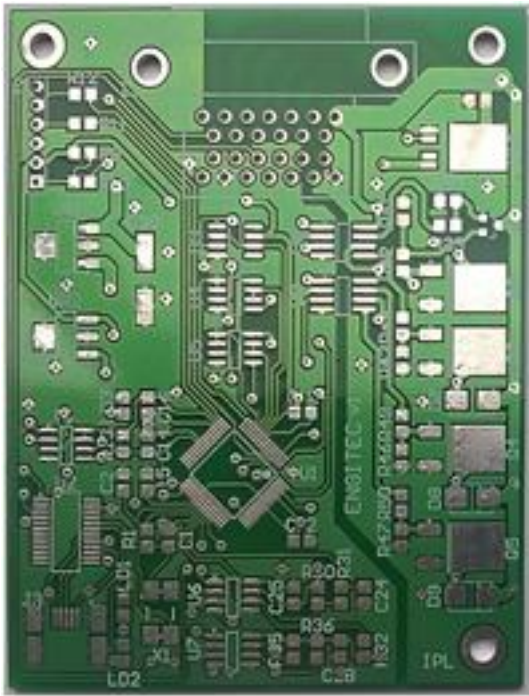
## 4.5. Fabrico da PCB

---

Dependendo da capacidade do equipamento de fabrico, os limites técnicos podem sofrer alterações. Para este projeto pretendia-se que a PCB fosse produzida por uma empresa externa, pela qualidade que os processos de fabrico mais recentes oferecem. Assim, efetuou-se uma pesquisa de empresas que dispõem deste tipo de serviço e após a avaliação de cotações, optou-se pelo fabrico na empresa Guimocircuito – Circuitos Impressos Lda [24]. Dos limites técnicos especificados pela empresa, destacam-se a distância mínima entre *pads*, pistas e planos de 0.254 mm, a largura mínima de pista de 0.254 mm e o diâmetro mínimo do *pad* das vias de duas vezes o diâmetro do furo. O *pad* é o termo em inglês para a zona de cobre que permite a soldadura do componente. Estes limites técnicos revelaram-se universais por permitem o fabrico noutras empresas que utilizam os mesmos limites técnicos ou inferiores. Por exemplo, na Olimex LTD [25] em que a distância mínima entre *pads*, pistas e planos de massa é de 0.2 mm e o diâmetro mínimo do *pad* das vias é de mais 0.4 mm que o diâmetro do furo.

O protótipo foi produzido no material FR-4 de 1,6 mm de espessura. Este material é constituído por várias camadas de tecido de fibra de vidro com uma resina epóxi com propriedades retardantes e resistentes a chamas, em conformidade com a norma UL 94V-0. Estas propriedades permitem a utilização em ambiente automóvel. O cobre da PCB apresenta um acabamento em máscara de solda. A máscara de solda é uma tinta fotográfica negativa industrial, desenvolvida para proteger os circuitos impressos contra oxidações e conservar as partes do circuito onde não serão soldados os componentes eletrónicos. Este acabamento possui um elevado nível de resistência química e dielétrica. Além disso, a PCB possui uma camada denominada em inglês por *Silk Screen* que corresponde à legenda dos componentes. Para melhorar o processo de soldadura, os *pads* dos componentes têm acabamento de estanhagem seletiva, isto é, os *pads* são pré estanhados com uma camada fina de estanho que melhora a transferência de calor e a posterior soldadura dos componentes. A Figura 4.3 apresenta o PCB produzida onde é possível visualizar a máscara de solda (cor verde), a camada de *Silk Screen* (identificação dos componentes) e a camada de acabamento de estanhagem seletiva (*pads* dos componentes).

Na Figura 4.4 é apresentado o protótipo utilizado nos testes práticos, com os componentes soldados através de soldadura manual, ao qual foi atribuído o nome de Engitec.



(a)



(b)

Figura 4.3 – PCB protótipo produzida: (a) face superior; (b) face inferior.



(a)



(b)

Figura 4.4 – Engitec - protótipo para aplicação prática: (a) face superior; (b) face inferior.

## 4.6. Custo estimado do protótipo

---

Um dos objetivos deste projeto consiste em manter o baixo custo da unidade de controlo desenvolvida. Por este motivo, estimou-se o custo do *hardware* do protótipo. A estimativa inclui todos os componentes, conetores e o custo da PCB.

Relativamente ao custo dos componentes e conetores, a estimativa foi efetuada com base nos preços *on-line* da empresa RS Components - Amidata S.A [26]. Além disso, considerou-se o preço para a quantidade mínima do produto (custo mais alto). Em relação à PCB, considerou-se o valor da cotação dado pela empresa Guimocircuito para uma unidade apenas. A compra de componentes e o fabrico de PCBs em grandes quantidades (por exemplo, 100 unidades) resulta numa diminuição significativa no custo final, que pode chegar a 50% do valor estimado.

O custo estimado de produção de uma unidade Engitec (protótipo) é de aproximadamente 100 €, conforme apresentado no Anexo D. Nesta estimativa não são considerados os custos de desenvolvimento do *software*, *hardware* e da soldadura dos componentes.

*Esta página foi intencionalmente deixada em branco*

## 5. Montagem e procedimentos experimentais

---

Neste capítulo é apresentada a montagem experimental do protótipo desenvolvido e descrevem-se as principais adaptações mecânicas efetuadas ao motor de testes. Por conseguinte, são apresentados os procedimentos experimentais para validação do *software* e do *hardware* desenvolvidos.

### 5.1. Montagem experimental

---

A montagem experimental baseou-se na aplicação prática da Engitec e destinou-se à obtenção de resultados com um motor em funcionamento real para análise e validação do *hardware* e *software* desenvolvidos. Na montagem experimental foi selecionado um motor normalmente utilizado em equipamentos agrícolas e industriais de baixo custo que foi previamente adaptado mecanicamente para possibilitar a montagem dos sistemas de controlo eletrónico e da Engitec.

#### 5.1.1. Motor de testes

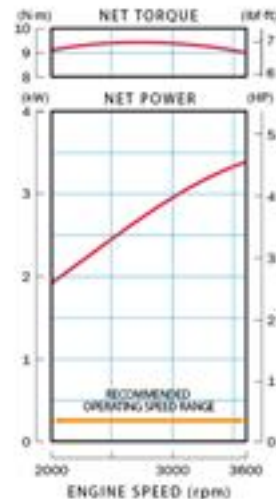
---

O motor utilizado nos testes práticos é o modelo Honda GC160, apresentado na Figura 5.1 (a), tipicamente utilizado em motocultivadores, máquinas de lavagem de alta pressão, geradores, entre outros equipamentos de baixo custo. Este motor monocilíndrico trabalha segundo o ciclo Otto a quatro tempos, com 160 cm<sup>3</sup> de cilindrada e uma razão de compressão de 8.5:1, debitando uma potência máxima de 3.4 kW às 3600 RPM e binário máximo de 9.4 Nm às 2500 RPM, conforme apresentado na Figura 5.1 (b).

O motor possui um sistema de ignição transistorizado por ímanes permanentes com um avanço de ignição fixo de 20 graus de cambota antes do PMS e um sistema de injeção de combustível por carburador horizontal de corpo simples. Relativamente ao acionamento das válvulas de admissão e escape, este é realizado por um veio de árvore de cames à cabeça ligado à cambota por uma correia de distribuição.



(a)



(b)

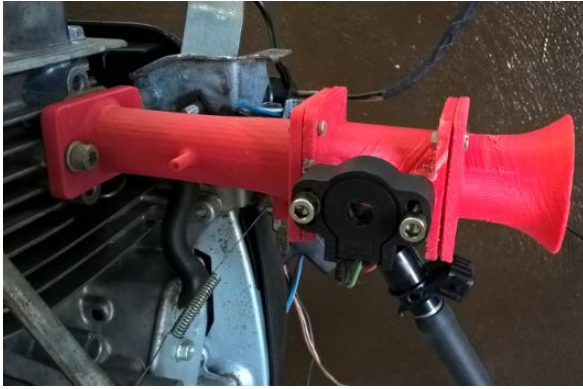
Figura 5.1 – (a) Motor Honda GC160 utilizado nos testes práticos, (b) curvas de performance (potência e binário).

### 5.1.2. Adaptação mecânica do motor

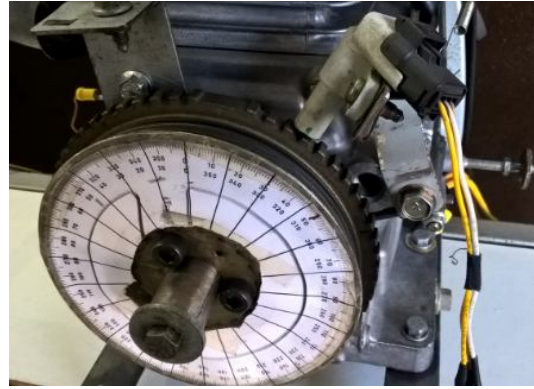
Para a realização dos ensaios experimentais, os sistemas de ignição e injeção de combustível originalmente montados no motor foram removidos e substituídos por sistemas eletromecânicos (injetor e bobine de ignição). As principais adaptações efetuadas de preparação do motor foram:

- A bobine de ignição original foi substituída por uma bobine eletrônica Bosch® P35-T, referência “0 221 604 014”, que possui um transistor de potência integrado;
- O carburador foi substituído por um injetor Magneti Marelli® referência “036 031 C”;
- Foi desenvolvido e aplicado um coletor de admissão com uma borboleta de 28 mm que permite o acoplamento do injetor, do sensor TPS do modelo 971-0002 da Vishay® e do sensor de pressão, representado na Figura 5.2 (a). O coletor foi produzido através da tecnologia de impressão 3D;
- Foi desenvolvida uma flange para o veio da cambota para permitir o acoplamento da roda dentada. A roda dentada escolhida possui 58 dentes e uma falha que corresponde à ausência de 2 dentes, representada na Figura 5.2 (b);
- Foi instalado um sensor de efeito de Hall do modelo 6PU 009 121-621 da Hella® junto à roda dentada para leitura dos dentes da roda dentada (Figura 5.2 (b));
- Foi instalado o sensor de temperatura do motor, modelo 31220 da FAE, no bloco do motor. O sensor instalado é do tipo de contacto.





(a)



(b)

Figura 5.2 – (a) Corpo de admissão: coletor, injetor, TPS; (b) roda dentada e sensor de posição/rotação cambota.

A Figura 5.3 apresenta o motor Honda GC160 após as modificações anteriormente descritas, onde se pode identificar a roda dentada, o sensor da cambota, a bobine de ignição e o corpo de admissão com sensor TPS e injetor.

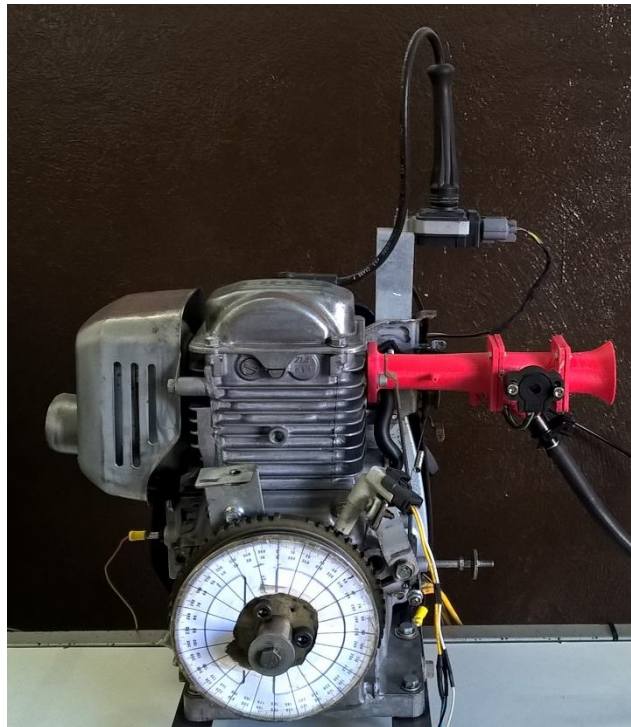


Figura 5.3 – Motor GC160 adaptado com sensores, bobine de ignição, injetor e coletor de admissão para realização de testes práticos.

### **5.1.3. Adaptação da Engitec**

---

Para a adaptação da Engitec ao motor foi desenvolvida uma instalação elétrica para ligação dos sensores, atuadores e componentes auxiliares à unidade de controlo. A instalação elétrica foi efetuada conforme apresentado no Anexo B, que apresenta o esquema de montagem genérico recomendado para a instalação da Engitec.

Do esquema elétrico é importante referir que a ECU controla, através de uma saída auxiliar e de relés, a alimentação dos circuitos da bomba de combustível e do sistema de ignição. Desta forma, previne-se que na fase de iniciação da ECU não ocorra atuação descontrolada que pode causar danos, principalmente no sistema de ignição. O esquema elétrico inclui notas de instalação que devem ser tidas em conta aquando da montagem da ECU, para evitar danos internos. Por exemplo, notas de utilização de fusíveis, de aplicação de relés, e de correntes máximas para as saídas de potência.

### **5.1.4. Identificação do Ponto Morto Superior**

---

Na montagem da roda dentada é importante conhecer a posição do pistão. Assim, procedeu-se à identificação do PMS do pistão através da utilização de um comparador de precisão (instrumento que permite medir deslocamentos com precisão de 0.01 mm). Foi removida a vela de ignição da cabeça do motor e inserido o comparador alinhado com o eixo de movimento do pistão. Através da rotação da cambota identificou-se a posição do motor (e da roda dentada acoplada) em que o pistão atinge o PMS. Esta informação permite definir o parâmetro *Crank Index Position* que define a posição, em graus de cambota, da posição da falha da roda dentada da cambota até ao PMS. Além disso, posteriormente, durante o funcionamento do motor, permite verificar se o ponto de ignição real está de acordo com o definido, através da utilização da pistola estroboscópica.

## **5.2. Procedimentos experimentais**

---

Os ensaios experimentais podem ser divididos em duas vertentes: ensaios para teste de *software* e para teste de *hardware*. Para comprovar o correto funcionamento do *software*, foram levados a cabo os seguintes procedimentos experimentais:

- **Protocolo de comunicação:** foram testadas todas as instruções de escrita e leitura de dados (variáveis, vetores e matrizes) segundo o protocolo de comunicação apresentado na secção 3.2.11. Foram realizados testes de comunicação com o motor em funcionamento e com o motor parado para verificar se a comunicação interferia no controlo do motor.
- **Gravação de dados em memória EEPROM:** após a introdução dos dados de todos os parâmetros de controlo, efetuou-se a gravação dos dados na EEPROM. De seguida, a alimentação da ECU foi desligada temporariamente. Após a reinicialização foram lidos todos os parâmetros escritos. Os testes foram efetuados com o motor parado e em funcionamento.
- **Captura dos dentes da roda dentada:** foi adicionado um bloco de instruções que mudava alternadamente o estado (entre os níveis lógicos 0 e 1) de um porto de saída digital do microcontrolador sempre que a função de captura dos dentes detetava um novo evento (mudança de flanco) e comparado esse sinal com o sinal do sensor da cambota.
- **Deteção da falha da roda dentada:** foi adicionado um bloco de instruções que mudava alternadamente o estado (entre os níveis lógicos 0 e 1) de um porto de saída digital do microcontrolador sempre que a função de deteção da falha da cambota a detetava. Foi comparado esse sinal com o sinal do sensor da cambota.
- **Deteção da fase do motor:** definiu-se o modo de controlo *Four Stroke* no parâmetro *Engine Control Mode*. Através de osciloscópio verificou-se se o motor se encontrava a funcionar apenas com uma ignição e uma injeção por cada duas voltas de cambota (um ciclo de motor a quatro tempos).
- **Cálculo da rotação da cambota:** para diferentes velocidades de rotação da cambota, foi comparada a velocidade calculada pela Engitec com a velocidade real calculada através do sinal medido pelo osciloscópio, bem como com a velocidade determinada através da pistola estroboscópica.
- **Cálculo da tensão da bateria:** a Engitec foi alimentada através de uma fonte de alimentação de saída regulável e foi comparado o valor medido pela ECU com o valor monitorizado na fonte de alimentação.

- **Cálculo da temperatura do motor:** o parâmetro *Engine Temperature Sensor Setup* foi preenchido de acordo com a folha técnica do sensor e foi comparado o valor de temperatura calculado pela Engitec com o valor teórico esperado.
- **Cálculo da temperatura do ar:** o parâmetro *Air Temperature Sensor Setup* foi preenchido de acordo com a folha técnica do sensor e foi comparado o valor de temperatura calculado pela Engitec com o valor teórico esperado.
- **Cálculo da pressão no coletor:** o parâmetro *Manifold Pressure Sensor Setup* foi definido de acordo com a folha técnica do sensor e foi comparado o valor de pressão calculado pela Engitec com o valor teórico esperado.
- **Cálculo da posição da borboleta:** os parâmetros *TPS LO* e *TPS HI* foram configurados respectivamente de acordo com a posição de abertura mínima e posição de abertura máxima e, em função da posição da borboleta, foi comparado o valor calculado pela ECU com o valor real de posição.
- **Controlo do tempo de *dwell*:** o parâmetro *Ignition Dwell Time* foi preenchido de acordo com a folha técnica da bobine e a Engitec foi alimentada por uma fonte de alimentação de saída regulável. Em função da tensão de alimentação foi medido o valor de *dwell* aplicado com recurso a osciloscópio.
- **Controlo do avanço de ignição base:** o parâmetro *Ignition Main Table* foi preenchido com valores de avanço experimentais e, em função apenas da posição da borboleta e da velocidade de rotação, foi comparado o valor calculado pela Engitec com o valor teórico esperado e com o valor de avanço medido com recurso a osciloscópio. Neste teste todos os outros parâmetros que contribuem para o avanço de ignição foram mantidos a zero.
- **Controlo do avanço de ignição final:** em função dos parâmetros *Ignition Main Table*, *Ignition Overall Trim* e *Ignition – Air Temp Comp*, foi comparado o valor de avanço teórico esperado com o valor de avanço calculado pela Engitec e com o valor de avanço medido com recurso a osciloscópio. Foram efetuados testes para três tipos de situações relativamente ao início da largura de pulso do *dwell*: após a falha, durante a falha e antes da falha.

- **Cálculo do avanço de injeção:** em função da velocidade de rotação do motor em funcionamento, verificou-se se o avanço de injeção correspondia aos valores definidos no parâmetro *Injection Timing*. A análise foi efetuada através da análise de sinais com o osciloscópio.
- **Controlo da largura de pulso de injeção base:** o parâmetro *Injection Main Table* foi preenchido com valores de injeção experimentais e, em função da posição da borboleta e da velocidade de rotação, foi comparado o valor calculado pela Engitec com o valor teórico esperado.
- **Cálculo da largura de pulso de injeção final:** em função dos parâmetros *Injector Scale*, *Injection Main Table*, *Fuel Overall Trim* e *Fuel - Air Temp Comp*, *Eng Temp Comp* e *MAP Comp* e *Injection Timing*, foi comparado a largura de pulso teórica esperada com a largura de pulso calculada pela Engitec e com a largura de pulso medida com recurso a osciloscópio. Foram efetuados testes para três tipos de situações relativamente ao início da largura de pulso de injeção: após a falha, durante a falha e antes da falha da cambota.

No sentido de comprovar o funcionamento do *hardware*, efetuaram-se os seguintes procedimentos experimentais:

- **Acondicionamento do sensor da cambota:** com recurso a osciloscópio, foi monitorizado o sinal do sensor no pino de saída e comparado com o sinal no terminal de entrada para o microcontrolador.
- **Acondicionamento dos sensores analógicos:** com recurso a osciloscópio, foram monitorizados os sinais à saída dos sensores (antes do acondicionamento de sinal) e à entrada para o microcontrolador (depois do acondicionamento de sinal).
- **Circuito de controlo da bobine:** com recurso a osciloscópio, foi analisado o sinal enviado do microcontrolador para a bobine de modo a comprovar o acondicionamento do sinal do nível de instrumentação (3.3 V) para o nível de potência (12 V). Analisaram-se também as curvas de corrente no primário e tensão no secundário da bobine.

- **Circuito de controlo do injetor:** com recurso a osciloscópio, foi analisado o sinal enviado do microcontrolador para o injetor, de modo a comprovar o acondicionamento do sinal do nível de instrumentação (3.3 V) para o nível de potência (12 V). Foram ainda analisados os sinais de tensão e corrente nos terminais do injetor.
- **Circuito das saídas de potência auxiliares:** com recurso a osciloscópio, foram analisados os sinais na respetiva saída do microcontrolador e verificada a consistência dos sinais nas saídas de potência.

No projeto de sistemas eletrónicos é imprescindível conhecer e verificar o maior número de características de funcionamento. Neste sentido, além dos testes ao *hardware* anteriormente identificados, efetuou-se também uma análise térmica à PCB desenvolvida. A análise térmica permite identificar problemas de projeto que proporcionam um comportamento inadequado ou até a falha geral da ECU. Neste caso, através da termografia pretendeu-se identificar as zonas de maior concentração de temperatura e avaliar a necessidade de substituição de componentes, alteração do *design* da PCB ou a adaptação de dissipadores.

### 5.2.1. Equipamento de teste

---

Na análise dos sinais do *hardware* foi utilizado o osciloscópio Picoscope<sup>®</sup> 4223 com as especificações apresentadas na Tabela 5.1. A análise através deste equipamento permitiu, essencialmente, comparar os tempos associados ao controlo da ignição e ao controlo da injeção e comparar esses tempos com os valores teoricamente esperados para as situações de funcionamento atuais.

Em forma de auxílio à confirmação do avanço de ignição e velocidade de rotação do motor foi utilizada a pistola estroboscópica do modelo Facom<sup>®</sup> X.730B.

Tabela 5.1 – Características do osciloscópio utilizado na medição de sinais.

Fabricante / Modelo	Picoscope®
Modelo	4223
Resolução vertical	12 bits
Largura de banda analógica	20 MHz
Taxa máxima de amostras	80 MS/s
Entradas	2 x BNC; Impedância: 1 MΩ / 22 pF
Exatidão	Tensão: 1%
	Tempo: 50 ppm

### 5.3. Configuração inicial

---

Para a realização dos testes práticos, os parâmetros da Engitec foram totalmente configurados, conforme apresentado detalhadamente no Anexo E, o que permitiu colocar o motor em funcionamento. Contudo, para a comprovação do funcionamento da Engitec e em função do teste a realizar, estes parâmetros foram cuidadosamente modificados. As modificações específicas são descritas em cada teste.

É importante referir que, nesta configuração inicial, foram tidas em conta as características do motor, da roda dentada, dos sensores e dos atuadores aplicados. Para a bobine de ignição, o parâmetro *Ignition Dwell Time* foi obtido pela consulta da respetiva ficha técnica.

Em relação aos parâmetros de avanço de ignição, duração de injeção e compensações, foram utilizados valores que não pusessem em risco a fiabilidade e o normal funcionamento do motor, sem qualquer tipo de otimização para desempenho ou consumos, pois apenas se pretendia verificar se o controlo decorria de acordo com os parâmetros de entrada.

*Esta página foi intencionalmente deixada em branco*



## 6. Resultados e discussão

---

Neste capítulo são apresentados e discutidos os principais resultados dos vários testes de *hardware* e *software* efetuados em condições de funcionamento reais, na aplicação do protótipo da ECU num motor monocilíndrico, para controlo dos sistemas de ignição e injeção.

### 6.1. Hardware

---

Os testes de *hardware* permitiram comprovar o correto funcionamento do circuito elétrico desenvolvido no decorrer deste projeto. Centraram-se essencialmente em comprovar os circuitos de acondicionamento de sinal dos sensores e os circuitos de acondicionamento/potência dos atuadores, através da análise dos sinais antes e após o acondicionamento.

#### 6.1.1. Testes e verificações gerais

---

Apesar de não serem apresentados graficamente, efetuaram-se um conjunto de testes e verificações gerais que possibilitaram comprovar o funcionamento dos circuitos de alimentação, processamento, programação, gravação de dados e comunicação USB.

No teste de alimentação, verificou-se se os circuitos reguladores de tensão (tensão da bateria para 5 V e de 5 V para 3.3 V) desempenhavam corretamente a sua função. Para isso, foram medidas as tensões em todos os pontos de alimentação não tendo sido detetadas irregularidades. Além disso, verificou-se o limite de tensão mínima para o qual a ECU perde estabilidade no seu funcionamento. Conforme era esperado, no mínimo a ECU tem de ser alimentada a 7 V (o regulador de tensão dos 5 V tem uma tensão de entrada mínima de 6.25 V e a utilização do díodo de proteção de tensões inversas na alimentação da ECU provoca uma queda de tensão de, aproximadamente, 0.7 V, portanto:  $6.25 + 0.7 = 6.95$  V).

No teste ao circuito do microcontrolador foram efetuados essencialmente dois testes. O primeiro teste consistiu em confirmar o circuito de programação do microcontrolador, através da programação e verificação da mesma. O segundo teste consistiu em confirmar o funcionamento do microcontrolador (que nesta aplicação é

dependente do cristal oscilador). Ambos os testes apresentaram resultados positivos pelo que se pode comprovar os circuitos do microcontrolador e programação.

Para verificar os circuitos de comunicação USB e gravação de dados na EEPROM, foram efetuados diversos testes de comunicação entre o PC e a ECU para introduzir e visualizar os parâmetros de funcionamento e utilizadas as instruções de escrita e leitura de dados para a EEPROM. Todos os testes foram realizados sem qualquer falha o que valida os circuitos de comunicação USB e comunicação entre o microcontrolador e a memória EEPROM.

### 6.1.2. Teste do acondicionamento do sinal do sensor da posição da borboleta

A Figura 6.1 apresenta as formas de onda correspondentes ao sensor da posição da borboleta (TPS), medidas no pino de sinal à saída do sensor e após o circuito de acondicionamento de sinal, respetivamente Canal A e Canal B. Na posição de borboleta totalmente fechada, o sinal do sensor aproxima-se dos 0 V, enquanto na posição de borboleta totalmente aberta, o sinal do sensor aproxima-se dos 5 V. Após o acondicionamento de sinal os níveis do sinal são convertidos para a escala de 0 - 3.3 V, conforme era esperado.

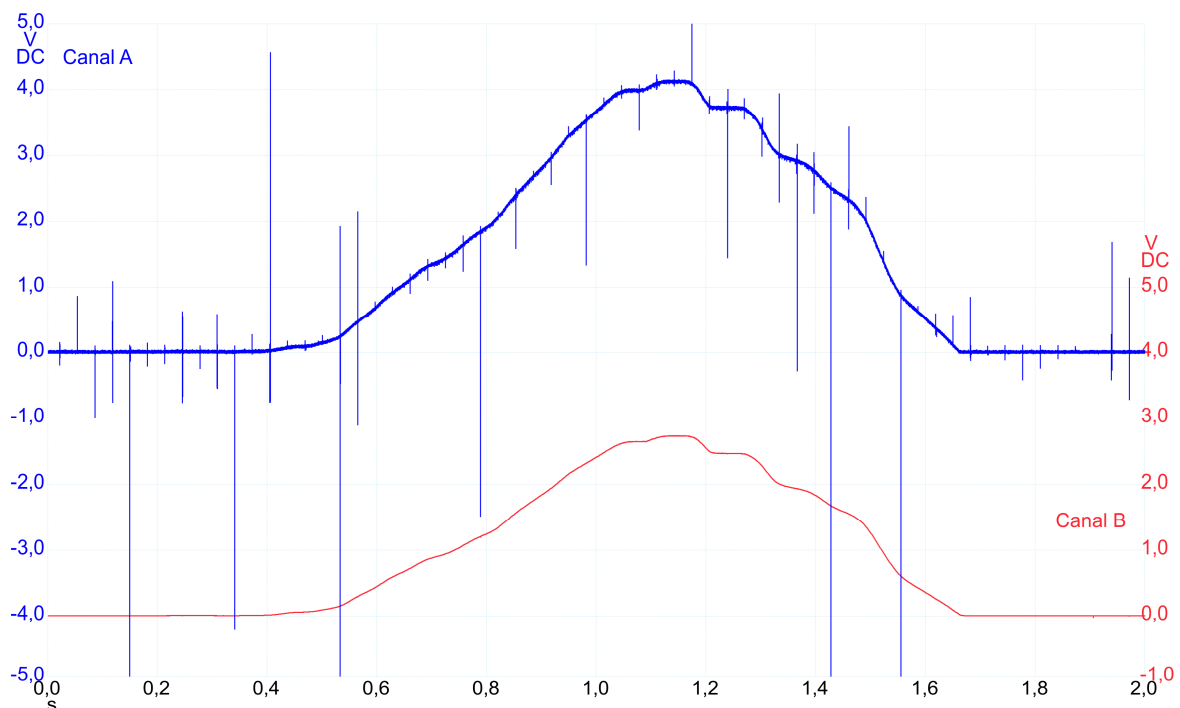


Figura 6.1 – Sinal do sensor da borboleta à saída do sensor (Canal A) e após acondicionamento de sinal (Canal B).

Pela análise à Figura 6.1 é ainda possível verificar que o ruído no sinal do sensor originado pela ocorrência de ignição é eliminado, tornando o sinal para o microcontrolador limpo e estável.

Como o resultado final está de acordo com o que é pretendido, pode-se validar o circuito de acondicionamento de sinal para o sensor de posição da borboleta.

### 6.1.3. Teste do acondicionamento do sinal dos sensores de temperatura

A Figura 6.2 apresenta as formas de onda correspondentes ao sensor da temperatura do motor, medidas no pino de sinal à saída do sensor e após o circuito de acondicionamento de sinal, respetivamente Canal A e Canal B. Na análise do Canal A, verifica-se a existência de ruído (picos verticais) em torno do sinal, provocados pela ignição. No entanto, no Canal B visualiza-se um sinal limpo, sem ruído, que permite comprovar o filtro passa-baixo determinado para este sensor (10 Hz). O nível de tensão do sinal é também corretamente convertido da gama de 0 - 5 V (Canal A) para a gama de 0 - 3.3 V (Canal B). Conclui-se assim que o circuito de acondicionamento de sinal está a funcionar corretamente e do modo como era de pretendido.

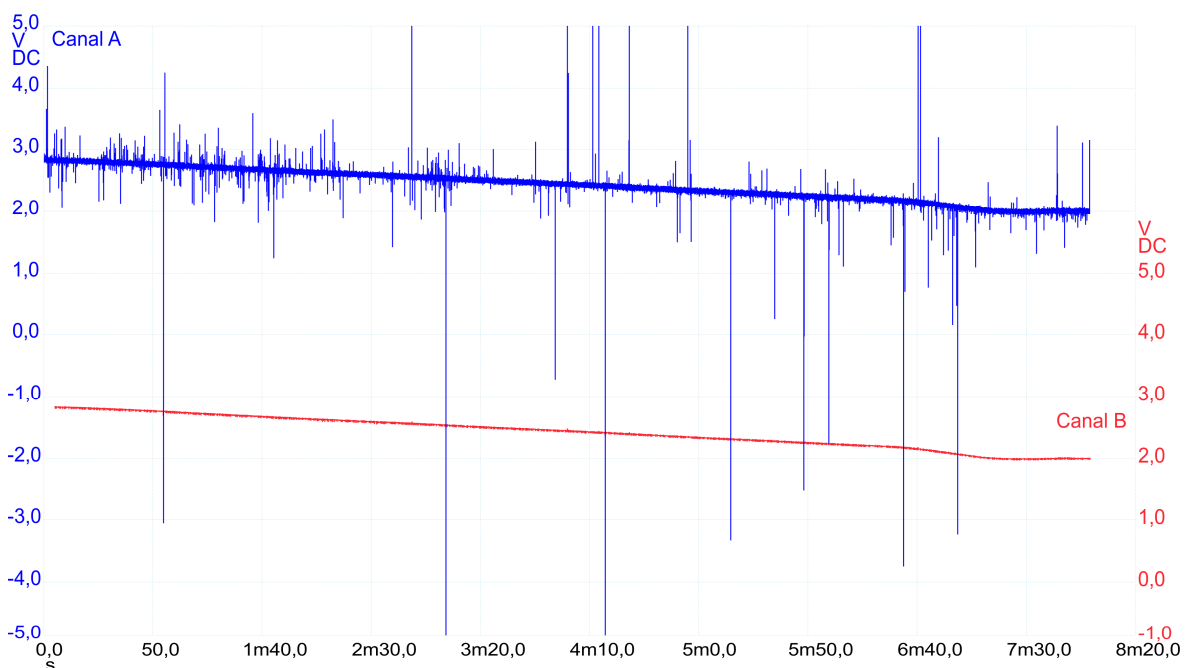


Figura 6.2 – Sinal do sensor de temperatura do motor à saída do sensor (Canal A) e após acondicionamento de sinal (Canal B).

## 6.1.4. Teste do acondicionamento do sinal do sensor da cambota

A Figura 6.3 apresenta as formas de onda correspondentes ao sensor de posição e velocidade do motor (da cambota), medidas no pino de sinal à saída do sensor (Canal A) e após o circuito de acondicionamento de sinal (Canal B), à entrada para o microcontrolador. Pela análise à figura, verifica-se a existência de ruído no sinal à saída do sensor, provocado pelo evento de ignição. Este ruído é eliminado através do filtro passa-baixo (150 kHz) do acondicionamento do sinal. O filtro é um elemento de elevada importância no circuito uma vez que o ruído pode interferir no controlo do motor se atingir níveis de tensão suficientes para a ECU interpretar como uma mudança de flanco.

Pela análise das ondas pode-se ainda verificar que o sinal após o acondicionamento de sinal está praticamente sincronizado com o sinal à entrada do circuito, logo, a eletrónica não causa atrasos no controlo do motor.

Deste modo, pode-se concluir que o circuito de acondicionamento do sinal do sensor da cambota, que permite ajustar o nível de tensão e eliminar o ruído de alta frequência, é realizado corretamente e de acordo com o que se pretendia.

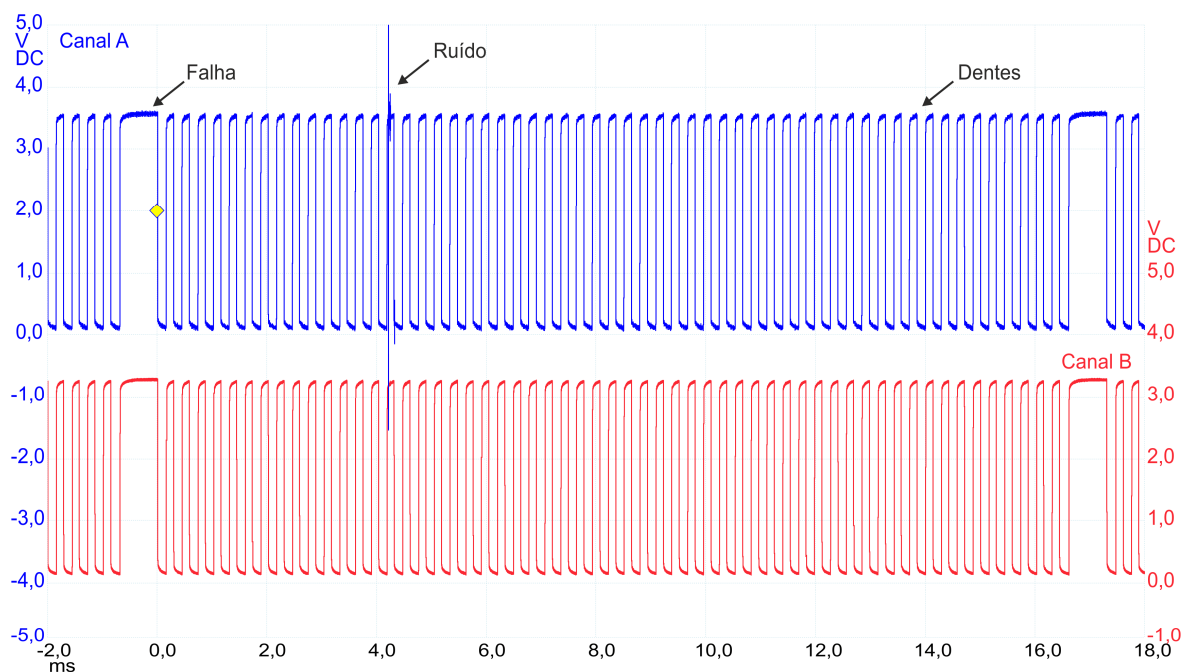


Figura 6.3 – Sinal do sensor da cambota à saída do sensor (Canal A) e após acondicionamento de sinal (Canal B).

## 6.1.5. Teste do circuito de controlo do injetor

A Figura 6.4 apresenta as formas de onda do sinal de controlo do injetor. No Canal A é apresentado o sinal digital à saída do microcontrolador que varia entre os níveis digitais 0 - 3.3 V. No Canal B é apresentado o sinal à saída da ECU (após o acondicionamento de sinal) para o terminal controlo do injetor (ativado à massa), que varia entre 0 V e a tensão da bateria (aproximadamente 12 V). Conforme se pode verificar, quando o sinal do microcontrolador está a 0 V, o sinal de controlo no injetor é o da tensão da bateria. Assim, como não há diferença de potencial nos terminais do injetor, este está fechado. Quando o sinal do microcontrolador muda para o nível lógico 1, o sinal de controlo do injetor muda para o nível de tensão da massa da bateria e a diferença de potencial aos terminais do injetor permite o seu funcionamento. Relativamente ao início do sinal, não foi detetado qualquer atraso mas o mesmo não acontece no momento final. Devido à eletrónica (*hardware*), o sinal do injetor tem um atraso de 52 microssegundos relativamente ao final do sinal do microcontrolador (maioritariamente devido ao atraso de desligar do circuito de acoplamento ótico). No entanto, como se trata de um sistema de injeção indireta, em que o combustível é injetado no coletor de admissão, este atraso provocado pelo *hardware* pode ser desprezado.

Pode-se assim concluir que o circuito de acondicionamento do sinal de controlo e o circuito de potência funcionam corretamente e de acordo com o que era pretendido.

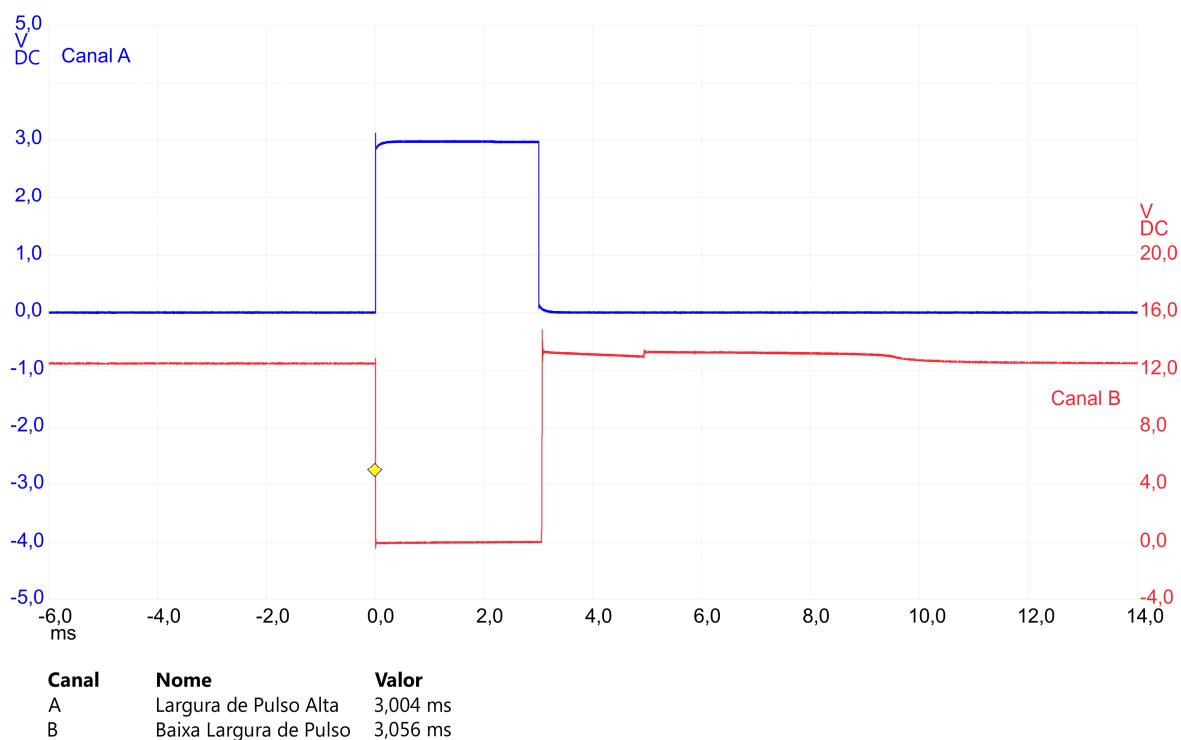


Figura 6.4 – Sinal de controlo do injetor à saída do microcontrolador (Canal A) e após circuito de potência (Canal B).

## 6.1.6. Teste do injetor

A Figura 6.5 apresenta as curvas correspondentes à tensão medida nos terminais do injetor (Canal A) e à curva de corrente (Canal B). Estas curvas foram obtidas num instante em que se esperava uma largura de pulso de 6 ms, calculada pela ECU. Pela análise da curva da tensão, é possível verificar que a largura de pulso aplicada ao injetor corresponde ao calculado. Pela curva de corrente, consegue-se identificar claramente o momento a partir do qual o injetor abre, podendo a forma de onda ser dividida em duas fases. A primeira fase decorre desde os 0 ms até aproximadamente 1.5 ms (ponto (a)) e corresponde ao instante em que a força eletromagnética provoca a abertura do injetor, ou seja, é o tempo de reação do solenoide. No restante tempo, fase 2, o injetor está totalmente aberto. Tratando-se de um injetor com uma impedância de  $17 \Omega$ , com a carga de bateria a aproximadamente 12 V, a corrente do injetor estabiliza em torno dos 0.7 A sensivelmente a partir dos 4 ms, denominado autocontrolo da corrente, tal como se pode verificar pela análise na forma de onda do Canal B.

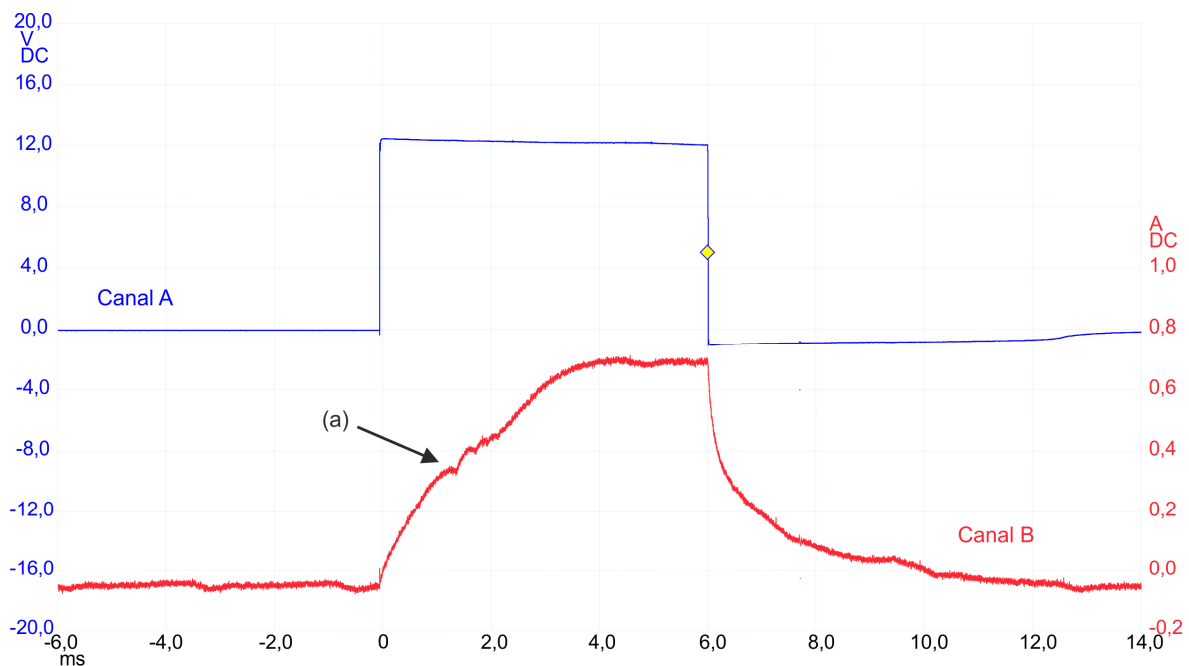


Figura 6.5 – Teste do controlo do injetor: tensão aos terminais do injetor (Canal A) e corrente no injetor (Canal B).

Conclui-se assim que o controlo do injetor é efetuado de acordo com o esperado, conforme apresentado na seção 2.4.1.

## 6.1.7. Teste do circuito de controlo da bobine

A Figura 6.6 apresenta as formas de onda do sinal de controlo da bobine de ignição, adquiridas à saída do microcontrolador e à saída da ECU (após circuito de acondicionamento do sinal) para a bobine, respetivamente Canal A e Canal B.

O nível de tensão do sinal de instrumentação (Canal A) é convertido na atuação do IGBT pela tensão da bateria. A utilização de um a resistência na entrada de controlo (porta ou *gate*) do IGBT, que fica em série com uma resistência interna do IGBT (entre os terminais da porta e emissor) resulta num divisor de tensão e num conseqüente sinal de 3.2 V na porta do IGBT. Devido à eletrónica de potência integrada, não existe acesso ao terminais de potência da bobine de ignição que é ativado pela ligação à massa.

Pode-se verificar também que a largura de pulso dos sinais é praticamente igual (Canal A = 2.684 ms e Canal B = 2.702 ms) e que o circuito de acondicionamento não provoca algum atraso com significância na mudança de flanco do sinal, o que permite manter um controlo preciso no tempo de *dwell* e no avanço de ignição.

Pode-se assim concluir que o circuito de acondicionamento do sinal e o circuito de potência funcionam corretamente e de acordo com o que era pretendido.

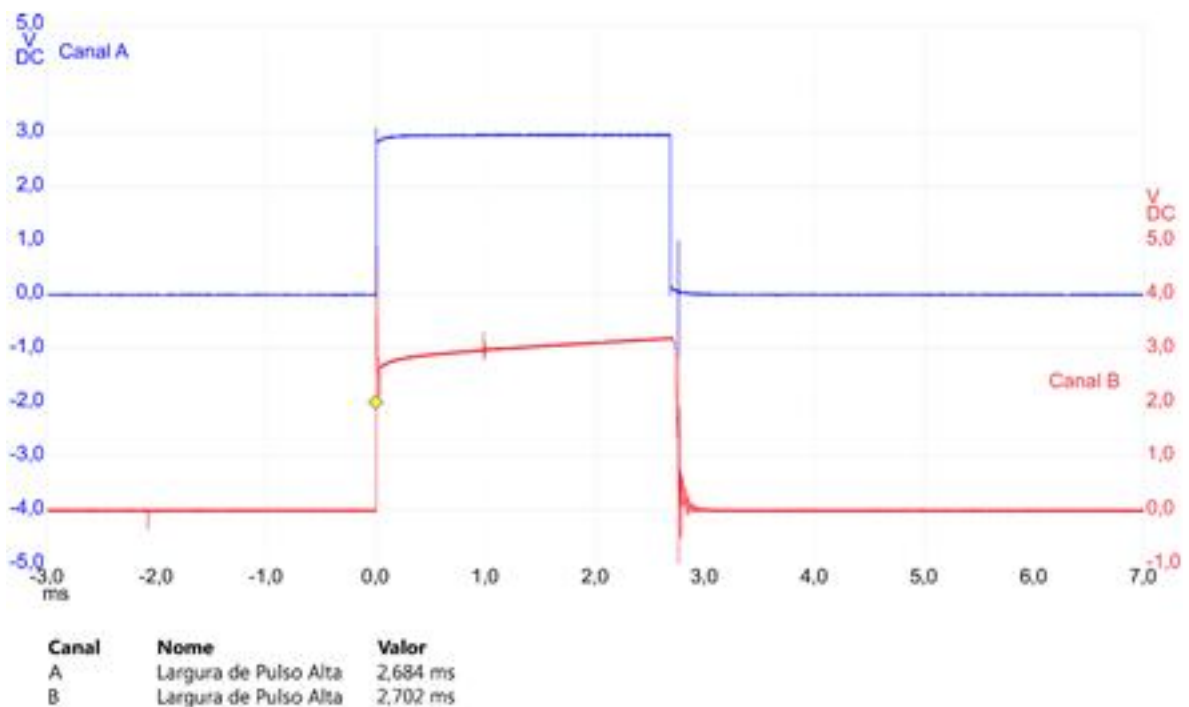


Figura 6.6 – Sinal de controlo da bobine à saída do microcontrolador (Canal A) e após circuito de potência (Canal B).

## 6.1.8. Teste da bobine

---

A Figura 6.7 apresenta as formas de onda correspondentes à tensão medida no secundário da bobine (Canal A) e à corrente no primário (Canal B). Como foi explicado na secção anterior, não é possível monitorizar a tensão no terminal de controlo do primário. Relativamente à forma de onda da tensão no secundário, pode-se identificar a duração da faísca (c), denominado tempo de queima, que corresponde ao tempo decorrido desde o ponto de alta tensão (pico de 10 kV) até ao ponto de oscilações da bobine (b). A oscilação negativa inicial identificada no ponto (a) é provocada pelo instante em que se inicia o carregamento da bobine. Em relação à corrente, verifica-se um aumento constante desde o início até ao fim do carregamento da bobine.

Pela análise à figura pode-se concluir que o controlo da bobine é efetuado de acordo com o apresentado na bibliografia na secção 2.4.2.

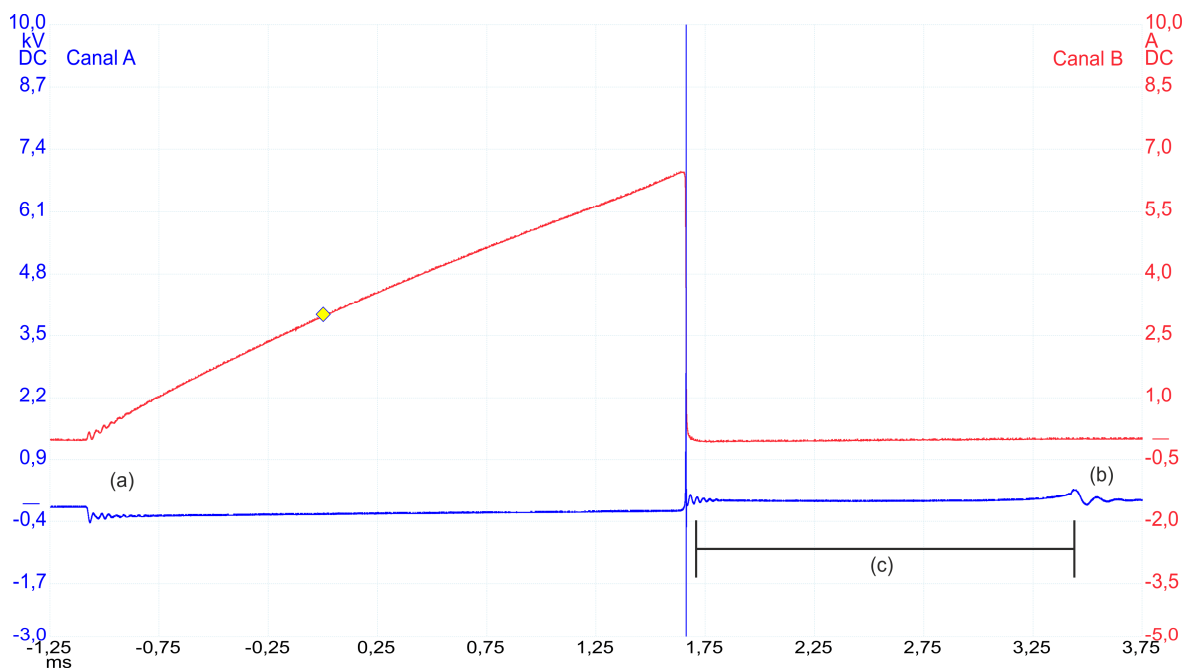


Figura 6.7 – Teste do controlo da bobine: tensão no secundário (Canal A) e corrente no primário (Canal B).

## 6.1.9. Resumo

---

Os testes efetuados ao *hardware* permitiram comprovar o dimensionamento do circuito elétrico da ECU desenvolvida. No caso do acondicionamento dos sinais dos sensores, verificou-se um bom desempenho e o correto funcionamento dos circuitos, que



permitem ajustar a gama de tensão e eliminar o ruído maioritariamente proveniente do evento de ignição, em que as altas tensões geradas pela bobine produzem ruído de alta frequência nos sinais.

Relativamente aos circuitos de potência verificou-se também o correto funcionamento dos mesmos. Identificaram-se ligeiros atrasos na resposta da eletrónica na ordem dos microssegundos que podem ser desconsiderados, tendo em conta a aplicação.

## **6.2. Algoritmo de controlo**

---

Os testes efetuados ao algoritmo de controlo (*firmware*) basearam-se essencialmente em perceber se as rotinas de controlo do motor, aquisição de sinais, cálculo e atuação são executadas corretamente. A estabilidade do algoritmo é um fator com elevada importância para o desempenho global da ECU. Assim, a análise de resultados centrou-se em comparar os resultados práticos com previsões teóricas calculadas em folha de cálculo, em função dos parâmetros configurados e das condições de funcionamento do motor.

### **6.2.1. Protocolo de comunicação e gravação de dados em memória EEPROM**

---

Para comprovar o algoritmo de comunicação e o protocolo apresentado na secção 3.2.11 foram configurados todos os parâmetros definidos na secção 3.2.1. Após a fase de introdução de valores efetuou-se uma leitura de todos os parâmetros. A correspondência total dos valores introduzidos e lidos permitiu comprovar o algoritmo de comunicação e o seu protocolo. O teste foi efetuado em situações com o motor parado e com o motor em funcionamento, tendo sido sempre bem-sucedida.

Para comprovar o algoritmo de comunicação série para a transferência e gravação dos dados do microcontrolador para a memória EEPROM, executou-se a instrução de gravação após a introdução dos dados de todos os parâmetros de configuração. Numa fase seguinte desligou-se a alimentação da Engitec, o que permitiu fazer um *reset* à memória volátil SRAM. Após a realimentação da Engitec, foi executada a leitura da memória EEPROM. A correspondência dos valores lidos com os valores introduzidos permitiu verificar o bom funcionamento do algoritmo de gravação de dados. À

semelhança da comunicação USB, a gravação de dados também foi efetuada em situações com o motor parado e com o motor em funcionamento, podendo esta última ser crítica e afetar o controle do motor. Contudo, a estruturação do algoritmo por interrupções com prioridades definidas, permite que, pelo menos a baixas rotações, a gravação de dados seja efetuada com sucesso sem interferir no controle.

Por outro lado, relativamente ao *hardware*, estes testes permitiram comprovar o correto funcionamento do módulo de comunicação série USB e do módulo de comunicação série entre o microcontrolador e a memória EEPROM, conforme exposto na seção 6.1.1.

## 6.2.2. Captura dos dentes da roda dentada

Para verificar se a captura dos dentes da roda dentada se executava corretamente, adicionou-se um bloco de instruções que alternava o estado lógico de saída de uma porta digital do microcontrolador à medida que eram detetados os flancos ascendentes e descendentes (sinal de prova) correspondentes aos dentes e falhas. A Figura 6.8 apresenta o sinal do sensor da cambota (Canal A) e o sinal de prova proveniente do microcontrolador (Canal B).

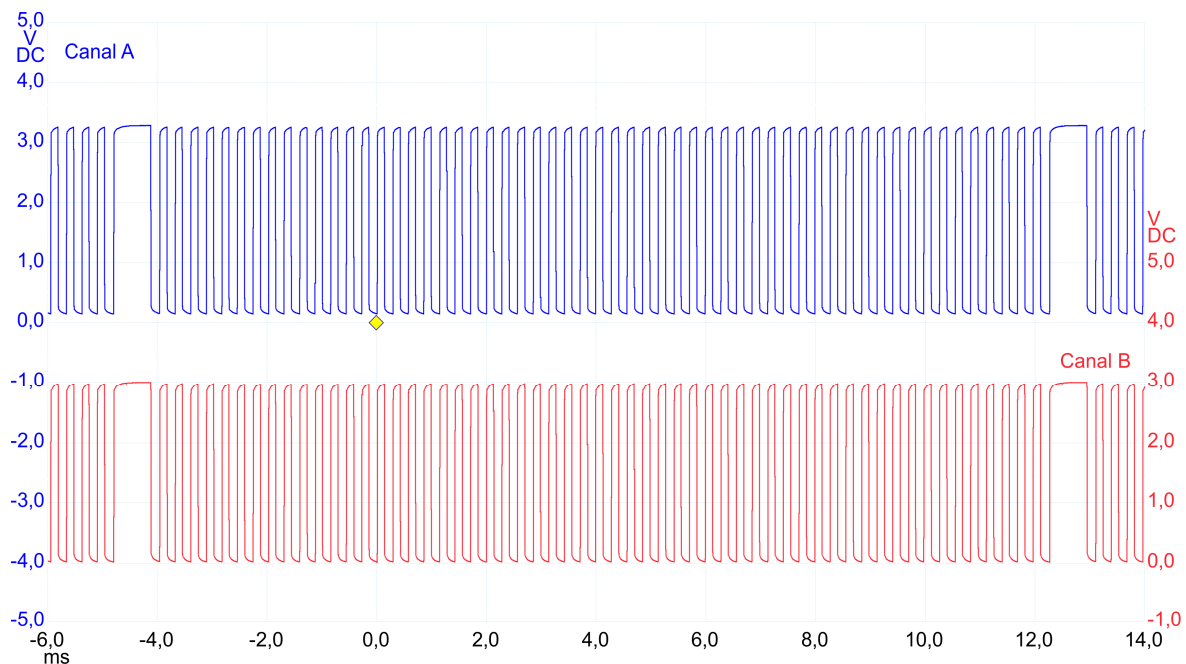


Figura 6.8 – Captura dos dentes da roda dentada: (a) sinal do sensor da cambota, (b) sinal do microcontrolador.

Conclui-se que o sinal do sensor da cambota é corretamente interpretado pela Engitec, uma vez que não foram detetadas falhas de deteção de mudança de flanco. O sinal do microcontrolador, que corresponde à interpretação do microcontrolador do sinal do sensor da cambota, é continuamente semelhante a este último. Se, por algum motivo, ocorresse uma falha na captura dos dentes, o sinal do Canal B não seria sincronizado com o sinal do Canal A.

### 6.2.3. Deteção da falha da roda dentada

Para comprovar a deteção da falha dos dentes na roda dentada, adicionou-se um bloco de instruções que alternava o estado lógico de saída de uma porta digital do microcontrolador à medida que o algoritmo de controlo detetava a falha. A Figura 6.9 apresenta o sinal do sensor da cambota (Canal A) e o sinal de prova proveniente do microcontrolador (Canal B).

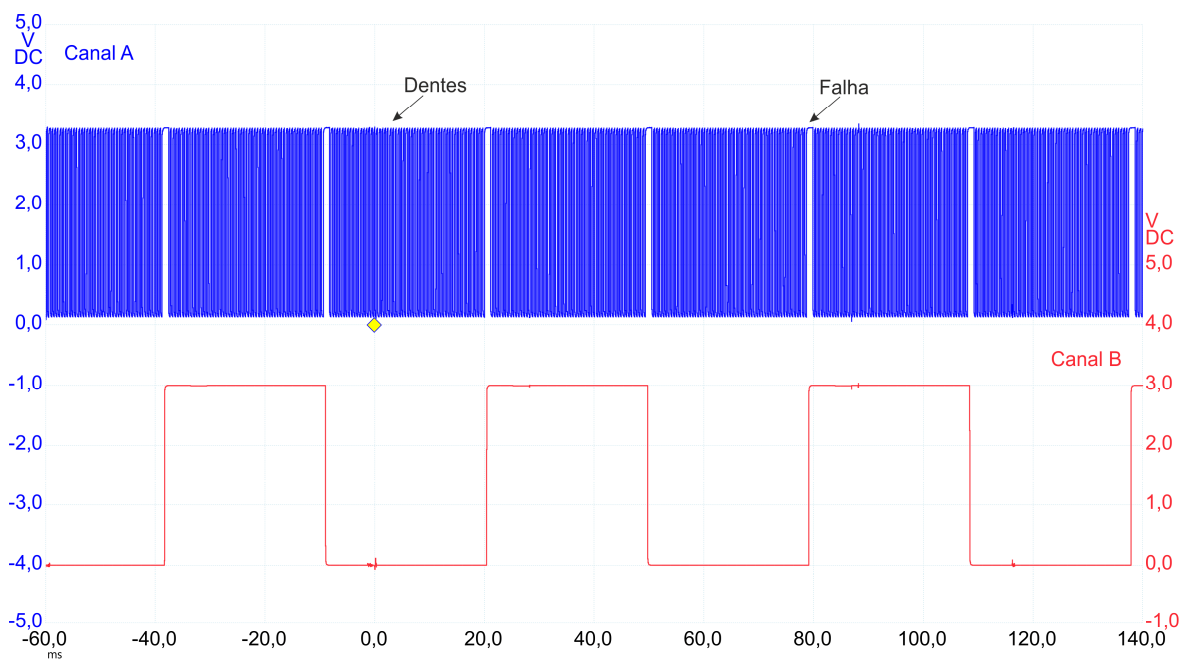


Figura 6.9 – Deteção da falha da roda dentada: (a) sinal do sensor da cambota, (b) sinal do microcontrolador.

Na Figura 6.9 comprovou-se que a falha é corretamente detetada pela Engitec uma vez que a mudança de flanco do sinal proveniente do microcontrolador (Canal B) é sincronizada com as falhas detetadas no sinal proveniente do sensor da cambota, tal como era esperado. O teste foi efetuado para diferentes velocidades de rotação, fase de

*cranking* e funcionamento normal, com acelerações e desacelerações da velocidade de rotação, sendo que sempre se verificou a correta deteção da falha.

## 6.2.4. Deteção da fase do motor

No teste de deteção da fase do motor é apresentada uma situação de funcionamento com o motor em modo *Four Stroke* (ver parâmetro *Engine Control Mode* na secção 3.2.1.1). Neste método a ECU determina a fase do motor e apenas ocorre uma injeção e uma ignição a cada duas voltas de cambota (um ciclo de motor a quatro tempos). Na Figura 6.10 são apresentadas as formas de onda do sinal do sensor da cambota (Canal A) e do sinal de ignição (Canal B).

Pela análise à figura, verifica-se que o controlo do motor realiza-se de acordo com o que era esperado, isto é, por cada duas voltas de cambota, apenas uma ignição. Conforme representado, a duração da rotação em que ocorre o evento de ignição (34.40 ms) é menor que a da rotação em que não ocorre tal evento (34.84 ms). É esta oscilação que permite ao motor identificar a fase do motor.

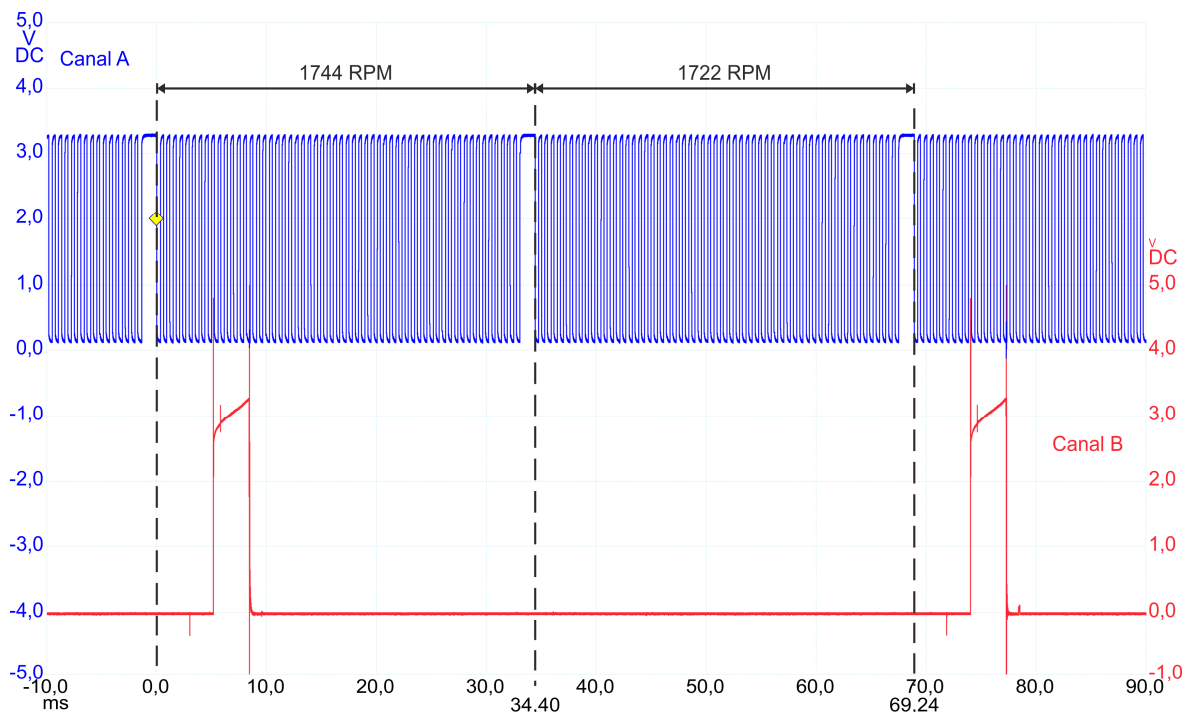


Figura 6.10 – Teste de deteção da fase do motor: controlo do motor *Four Stroke*.

Tendo em conta os resultados positivos obtidos nos inúmeros testes realizados, pode-se concluir que o algoritmo de deteção de fase do motor é eficaz, o que elimina a necessidade de utilização do sensor da árvore de cames.

### **6.2.5. Cálculo dos parâmetros de entrada**

---

No teste de cálculo dos parâmetros de entrada foram verificados os seguintes algoritmos: cálculo da tensão da bateria, temperatura do motor, temperatura do ar, pressão no coletor, posição da borboleta e velocidade de rotação da cambota. Para todos estes parâmetros, efetuou-se uma variação da sua grandeza e através do protocolo de comunicação visualizaram-se os valores calculados pela ECU. Os valores foram confirmados de acordo com o procedimento descrito na secção 5.2.

Em todas as situações de teste confirmou-se que a ECU calcula corretamente os parâmetros, pelo que se pode concluir que os algoritmos de leitura e cálculo destes parâmetros encontram-se corretos.

### **6.2.6. Controlo do dwell**

---

Considerando os tempos de *dwell* definidos na configuração inicial, conforme apresentado na secção 5.3, visualizou-se através de osciloscópio o comportamento da largura de pulso correspondente ao tempo de *dwell*, em função da tensão de alimentação da ECU (que corresponde à tensão da bateria) controlada por uma fonte de alimentação regulável. Por não ser possível representar a variação contínua da largura do pulso ao longo de todas as tensões de alimentação, apresenta-se na Figura 6.11 apenas uma situação. No Canal A é visualizada uma tensão média de alimentação de 12.04 V e no Canal B a largura de pulso do sinal de ignição (na entrada de controlo da bobine de ignição) com um tempo de *dwell* calculado de 2.68 ms.

Por se ter verificado que, quer neste exemplo quer em todas as outras situações, o tempo da largura de pulso era corretamente calculado e correspondente à tensão de alimentação, pode-se concluir que a função de cálculo do *dwell* está a funcionar corretamente.

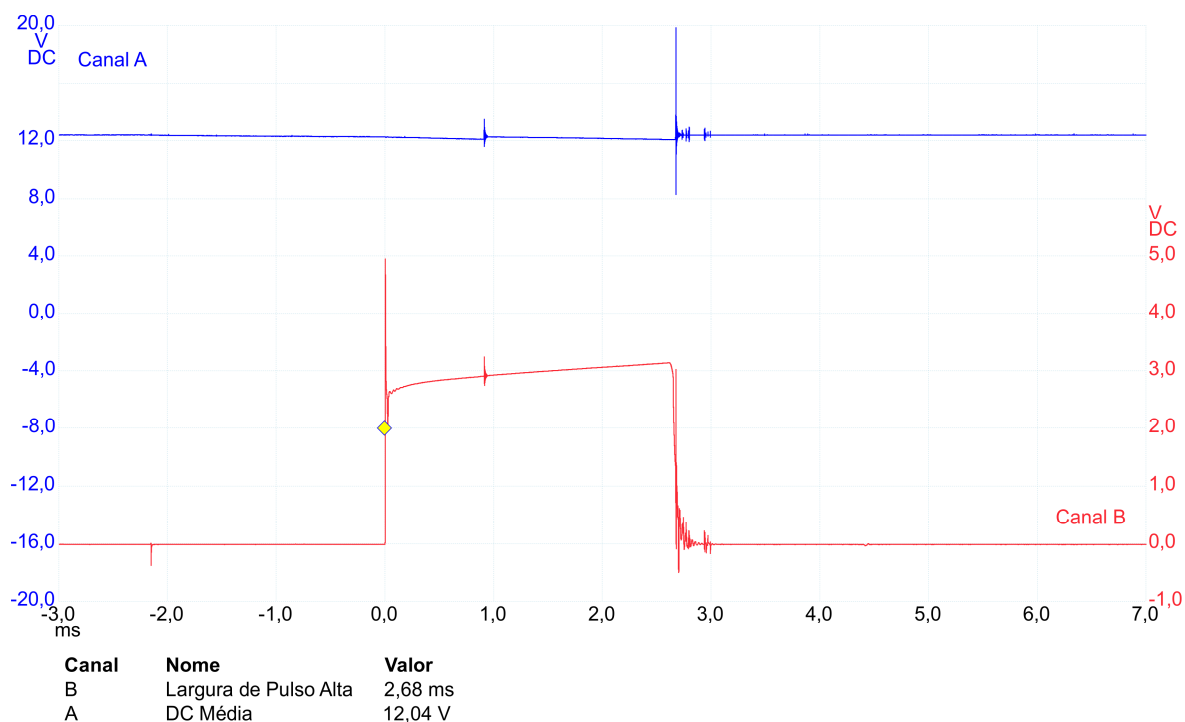


Figura 6.11 – Teste do cálculo do *dwell*: tensão da bateria (Canal A) e sinal de ignição (Canal B).

## 6.2.7. Controlo do avanço de ignição base

O avanço de ignição base é dependente da tabela definida pelo parâmetro *Ignition Main Table*, em função da velocidade de rotação do motor e da posição da borboleta. Para a realização deste teste foram consideradas as seguintes condições de funcionamento:

- *Ignition Main Table*: parâmetro preenchido de acordo com os valores apresentados no Anexo E;
- *Ignition Overall Trim*: definido a zero;
- *Ignition - Air Temp Comp*: definido a zero;
- Posição da borboleta: 32 %;
- Tensão da bateria: 12 V.

A Figura 6.12 apresenta um resultado obtido numa velocidade de rotação aleatória. No Canal A é apresentado o sinal do sensor da cambota e no Canal B é apresentado o sinal de controlo da bobine de ignição. Pela análise desta figura, pode-se verificar que a falha da cambota acontece a uma frequência de 55.52 Hz, ou seja, com o motor a uma velocidade de rotação de 3331 RPM. Pelo parâmetro *Ignition Main Table*, para a situação atual de velocidade de rotação e posição da borboleta, o avanço de ignição teórico é de

24.9º. Isto significa que o fim do *dwell* deve acontecer 4.15 ms após a falha da cambota. Considerando a tensão da bateria, espera-se que o *dwell* tenha uma duração de 2.7 ms.

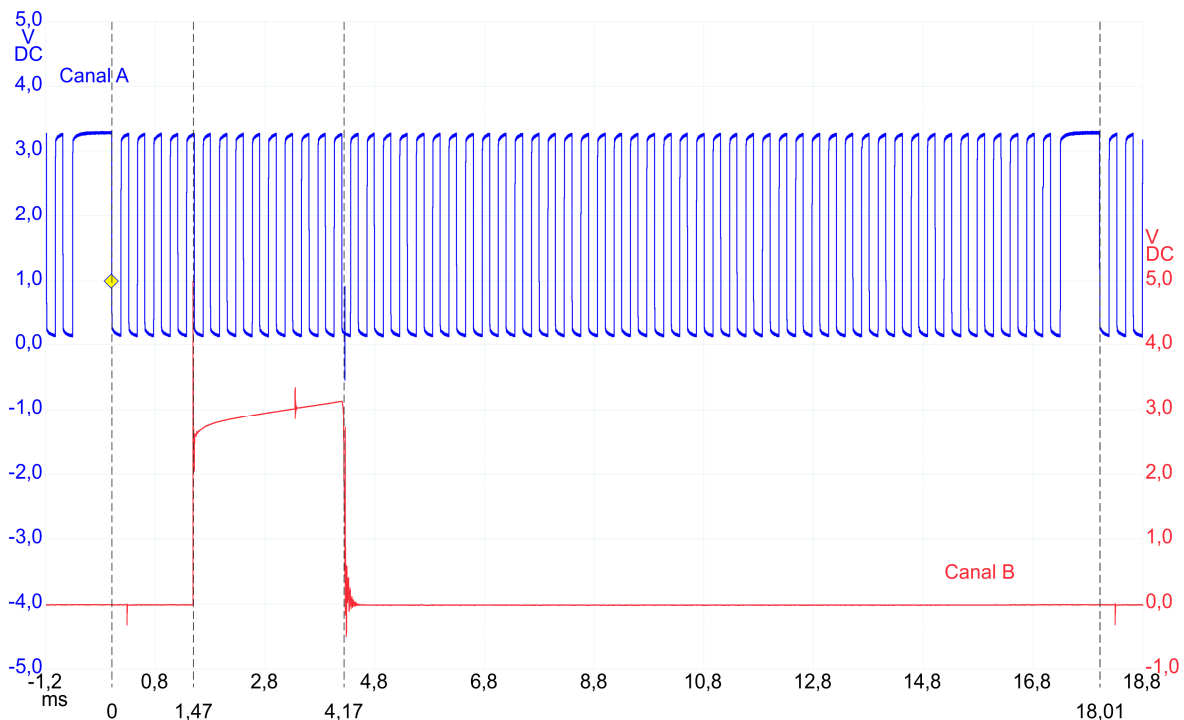


Figura 6.12 – Teste ao controlo do avanço de ignição base: sinal do sensor da cambota (Canal A) e sinal da tensão no secundário da bobine (Canal B).

Pela análise efetuada aos sinais através dos recursos do osciloscópio, os resultados esperados foram positivamente confirmados, conforme apresentado na Figura 6.12. O final do sinal do *dwell* aconteceu no instante teoricamente esperado e a duração da largura de pulso correspondeu à aguardada. Conclui-se assim que os controlos do avanço de ignição base e da duração do *dwell* são corretamente efetuados.

## 6.2.8. Controlo do avanço de ignição final

O avanço de ignição final é um dos parâmetros mais importantes para o controlo da ignição e é dependente de vários parâmetros, conforme apresentado na secção 3.2.6. Em função da velocidade de rotação, do tempo de *dwell* e do avanço de ignição final, o início do sinal para a bobine pode ocorrer antes, depois ou durante a falha da cambota (que corresponde ao instante em que é realizado o cálculo das funções de controlo da ignição e injeção). Por este motivo, são apresentados três resultados em que as condições de funcionamento são diferentes, para permitir que o início do sinal para a

bobine ocorra nas três situações referidas. Nestes testes foram considerados os parâmetros de acordo com o apresentado no Anexo E e as seguintes condições de funcionamento:

- Temperatura do ar: 25 °C;
- Tensão da bateria: 11 V.

As Figura 6.13, Figura 6.14 e Figura 6.15 apresentam os resultados obtidos, respetivamente, para uma velocidade de rotação baixa, em que o início do *dwell* acontece após a deteção da falha, para uma velocidade de rotação média, em que o início do *dwell* acontece durante a deteção da falha e para uma velocidade de rotação alta, em que o início do *dwell* acontece antes a deteção da falha. Nas figuras, no Canal A é apresentado o sinal do sensor da cambota e no Canal B é apresentado o sinal de controlo da bobine de ignição.

No primeiro teste foi colocada a borboleta a 26 % de abertura e definido o parâmetro *Ignition Overall Trim* a 20 %. Pela análise da Figura 6.13 pode-se verificar que a falha da cambota acontece a uma frequência de 32.33 Hz, ou seja, o motor encontra-se a uma velocidade de rotação de 1940 RPM. Considerando as condições de funcionamento anteriormente referidas, o avanço de ignição final teórico esperado é de 27.8°. O tempo de *dwell* deve apresentar uma duração de 3.2 ms e deve terminar 6.88 ms após a falha.

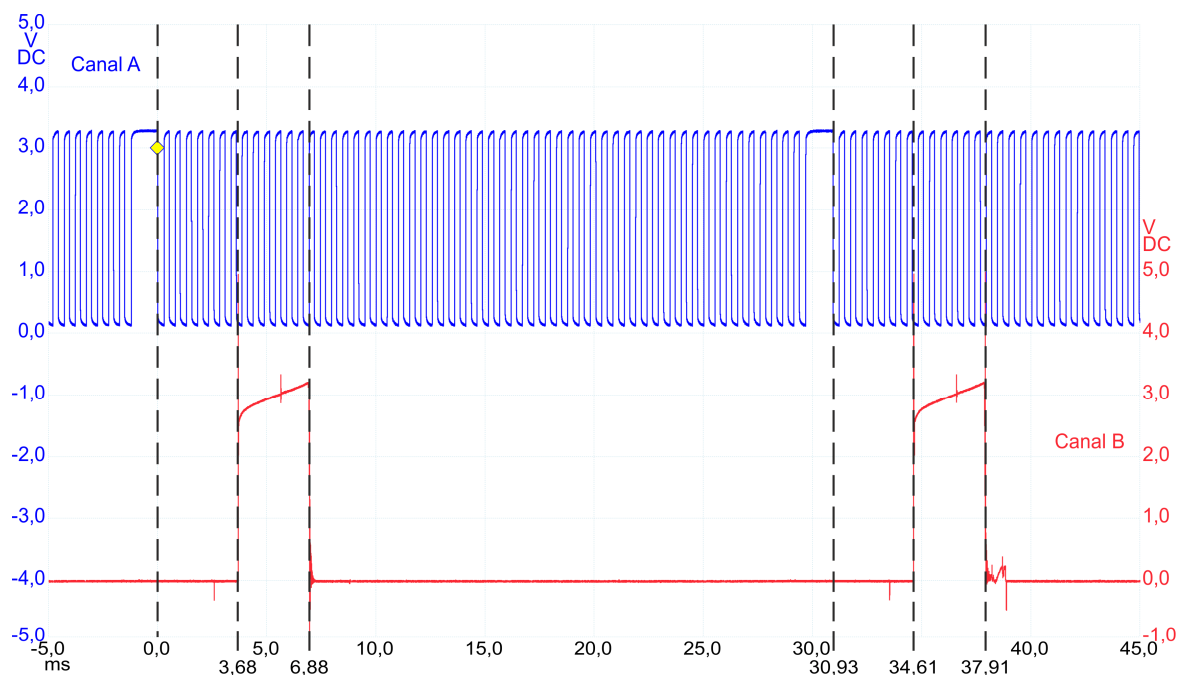


Figura 6.13 – Teste ao controlo da ignição com o início do sinal do *dwell* após a deteção da falha.



No segundo teste foi definido o parâmetro *Ignition Overall Trim* a 25 %. Com a borboleta a 40%, pela análise à Figura 6.14, verifica-se que a falha da cambota acontece a uma frequência de 72.37 Hz, ou seja, com o motor a uma velocidade de rotação de 4343 RPM. Assim, o avanço de ignição final teórico esperado é de 26.3°. Conseqüentemente, o tempo de *dwell* deve de apresentar uma duração de 3.2 ms e deve de terminar 2.89 ms após a falha.

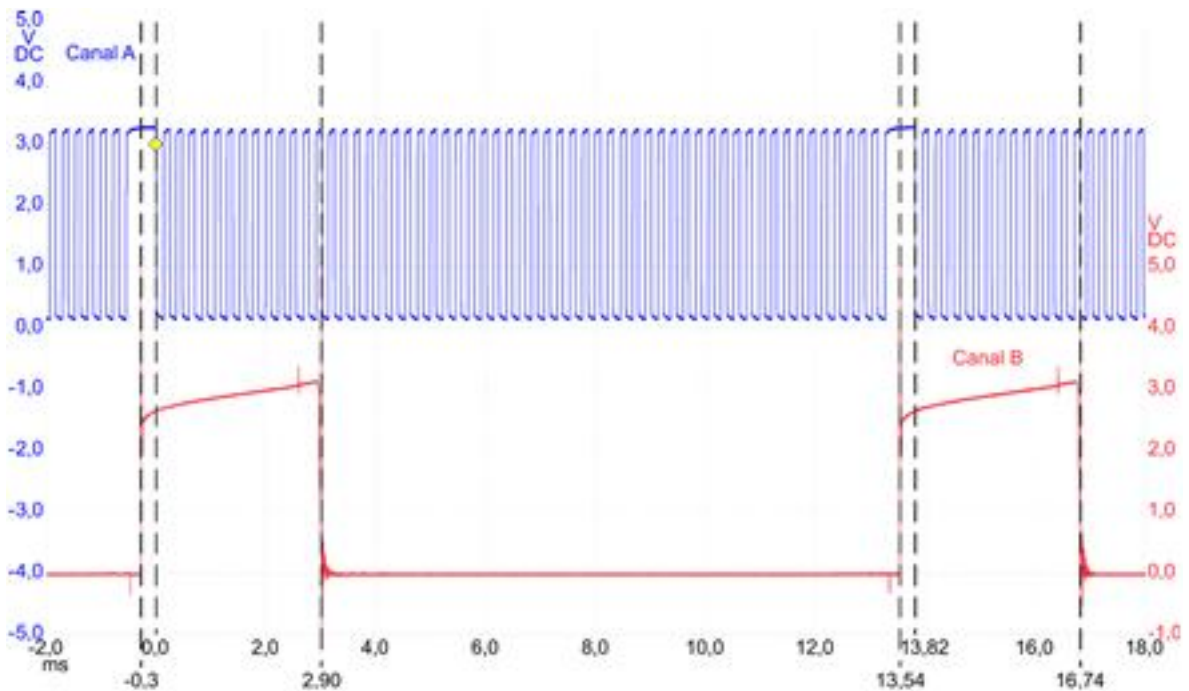


Figura 6.14 – Teste ao controlo da ignição com o início do sinal do *dwell* durante a deteção da falha.

No terceiro teste, o parâmetro *Ignition Overall Trim* foi definido a 30 % e a borboleta na posição de 90 % aberta. Na Figura 6.15, verifica-se que a falha da cambota acontece a uma frequência de 76.77 Hz, que representa uma velocidade de rotação de 4607 RPM. Assim, o avanço de ignição final teórico esperado é de 37.7°. O tempo de *dwell* deve de apresentar uma duração de 3.2 ms e deve de terminar 2.54 ms após a falha.

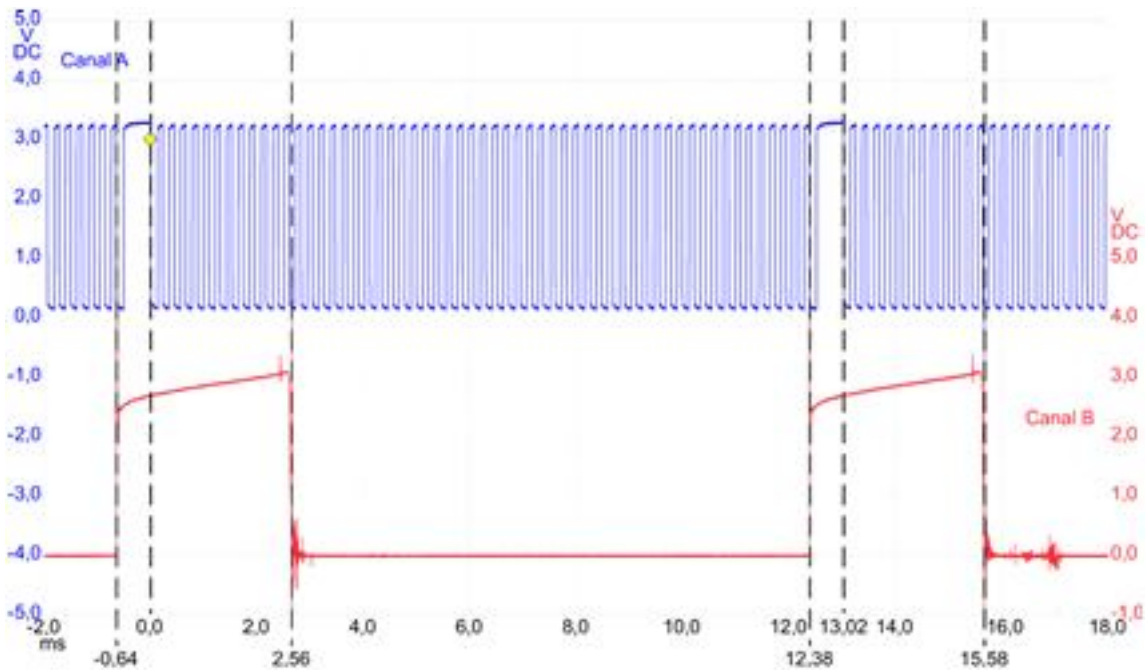


Figura 6.15 – Teste ao controlo da ignição com o início do sinal do *dwell* antes a deteção da falha.

Analisando as formas de onda das três figuras anteriormente apresentadas através dos recursos do osciloscópio, é possível confirmar que os resultados práticos correspondem aos resultados teóricos esperados. Independentemente do momento em que ocorre o início do *dwell*, o algoritmo de controlo é capaz de controlar corretamente a ativação bobine de ignição. Isto permite que o tempo de *dwell* e o avanço de ignição se mantenham corretos, independentemente das condições de funcionamento. Além disso, como a velocidade de rotação, a posição do TPS e o parâmetro *Ignition Overall Trim* são diferentes nas três situações, pode-se concluir também que a interpretação da tabela de ignição *Ignition Main Table* e os cálculos matemáticos são corretamente executados.

### 6.2.9. Controlo do pulso de injeção base

A largura de pulso de injeção base é uma variável dependente do parâmetro *Injector Scale* e da tabela definida pelo parâmetro *Injection Main Table*, em função da velocidade de rotação do motor e da posição da borboleta. Para a realização deste teste foram consideradas as seguintes condições de funcionamento:

- *Injection Main Table*: parâmetro preenchido de acordo com os valores apresentados no Anexo E;
- *Injector Scale*: 5 ms;
- *Fuel Overall Trim*: definido a zero;

- *Fuel - Air Temp Comp*, *Eng Temp Comp* e *MAP Comp*: definidos a zero;
- *Injection Timing*: definido totalmente com 40° de avanço.

A Figura 6.16 apresenta as formas de onda obtidas no teste prático. No canal A é representado o sinal do sensor da cambota e no Canal B o sinal de controlo da injeção. Pela análise da figura verifica-se que a falha da cambota acontece a uma frequência de 31.13 Hz o que representa uma velocidade de rotação de 1868 RPM. Considerando este valor de rotação, a borboleta a 21.3% e as condições de funcionamento acima especificadas, é esperado um sinal de controlo de injeção com uma largura de pulso de 2.97 ms. Relativamente ao avanço de injeção este deve de ser de 40°. Portanto, o sinal de injeção deve de iniciar-se aos 3.10 ms e terminar aos 6.07 ms.

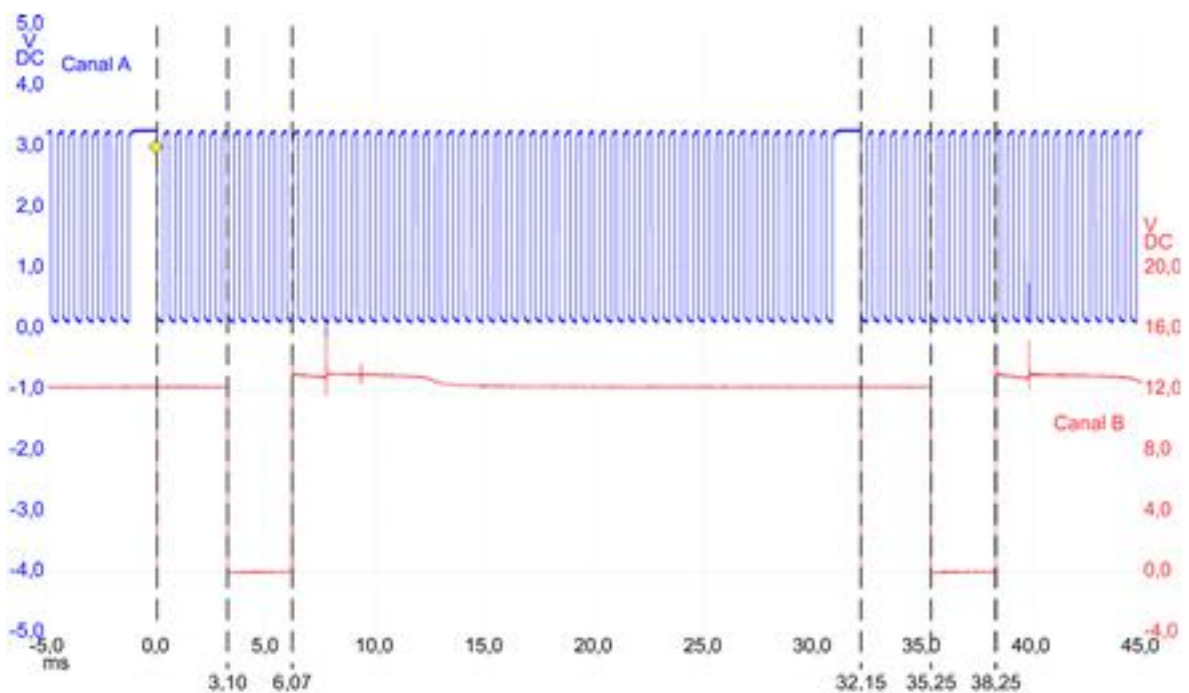


Figura 6.16 – Teste ao controlo da largura de pulso de injeção base.

Através dos recursos de análise de formas de onda do osciloscópio, é possível verificar que a largura de pulso prática corresponde ao tempo teórico esperado. Isto significa que o controlo da largura de pulso base, sem compensações, é efetuado corretamente. Por outro lado, a análise permite confirmar o ponto de início e de fim do pulso de injeção, que correspondem aos tempos esperados. Logo, também o avanço de ignição é controlado corretamente pela Engitec.

Apesar de apenas ser apresentada uma situação de teste, o processo de confirmação do controlo do pulso de injeção base, foi efetuado inúmeras vezes para diferentes condições de funcionamento.

## 6.2.10. Controlo do pulso de injeção final

---

Nos testes de controlo do pulso de injeção final, o controlo da injeção foi efetuado tendo em conta todos os parâmetros afetos a este controlo. À semelhança do controlo da ignição, em função da velocidade de rotação do motor, do avanço de injeção e do tempo de largura de pulso final, o início do pulso para a injeção pode ocorrer em três momentos distintos: antes, durante ou após a falha da cambota. Por este motivo, foram testadas diferentes velocidades de rotação do motor para proporcionar o início do pulso nessas três situações. Nestes testes foram considerados os parâmetros de acordo com o apresentado no Anexo E e as seguintes condições de funcionamento:

- *Injection Main Table*: definido de acordo com o Anexo E;
- *Injection Timing*: definido de acordo com o Anexo E;
- *Fuel Overall Trim*: 15 ms;
- *Fuel - Air Temp Comp*, *Eng Temp Comp* e *MAP Comp*: definidos de acordo com o Anexo E;
- Temperatura do ar: 25 °C;
- Temperatura do motor: 82 °C;
- Tensão da bateria: 12 V.

A Figura 6.17 apresenta as formas de onda obtidas para uma situação em que o início do pulso de injeção acontece após a falha de ignição. No Canal A é apresentado o sinal do sensor da cambota e no Canal B o sinal de controlo da injeção. Pela análise à figura verifica-se que a falha da cambota ocorre a uma frequência de 35,57 Hz (motor a uma velocidade de rotação de 1954 RPM). Considerando as condições de funcionamento anteriores, a posição da borboleta a 11.8 % e o parâmetro *Injector Scale* = 5 ms, a largura de pulso final esperada é de 3.1 ms. Além disso, o fim do pulso de injeção deve de ocorrer a 4.91 ms depois da falha para respeitar o avanço de ignição de 49.6°.

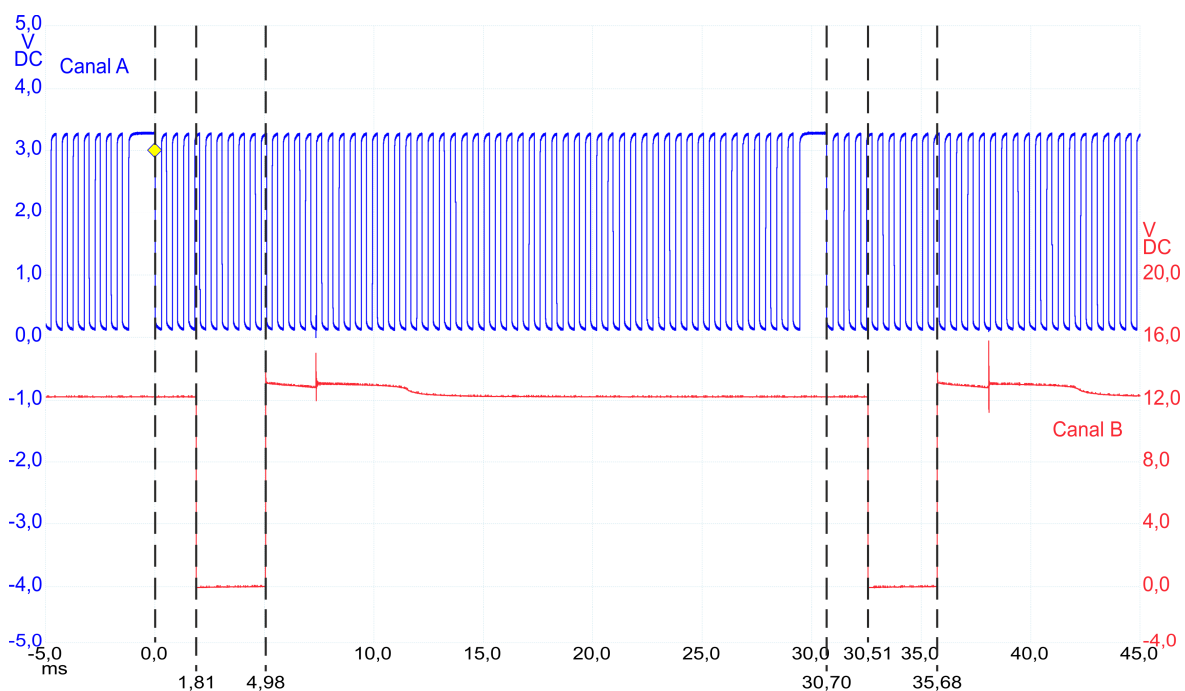


Figura 6.17 – Teste ao controlo da injeção com o início do pulso após a deteção da falha.

Na Figura 6.18 são apresentadas as formas do sensor da cambota (Canal A) e do sinal de injeção (Canal B) para a situação em que o início do pulso de injeção ocorre durante a falha da cambota. Analisando a figura, verifica-se que o motor está a uma velocidade de rotação de 3788 RPM uma vez que a falha da cambota ocorre a 61.13 Hz. Considerando esta velocidade de rotação, a posição da borboleta a 19.2%, *Injector Scale* = 3 ms e as condições de teste anteriormente especificadas, a largura de pulso esperada é de 2.7 ms. Para confirmação positiva do controlo do avanço de injeção, o fim do pulso deve de ocorrer cerca de 2.1 ms após a falha da cambota.

Na Figura 6.19 é representado o resultado para a situação em que o início do pulso de injeção ocorre antes da falha da cambota. À semelhança das figuras anteriores, o Canal A apresenta o sinal do sensor da cambota e o Canal B o sinal de injeção. Pela observação da figura, verifica-se que a falha da cambota ocorre a uma frequência de 66.13 Hz (velocidade de rotação de 3968 RPM). Tendo em conta todas as condições de funcionamento indicadas, a posição da borboleta a 78.1% e *Injector Scale* = 3 ms, espera-se que o sinal do Canal B apresente uma largura de pulso de 3.4 ms e o fim do pulso ocorra 2.0 ms após a falha da cambota.

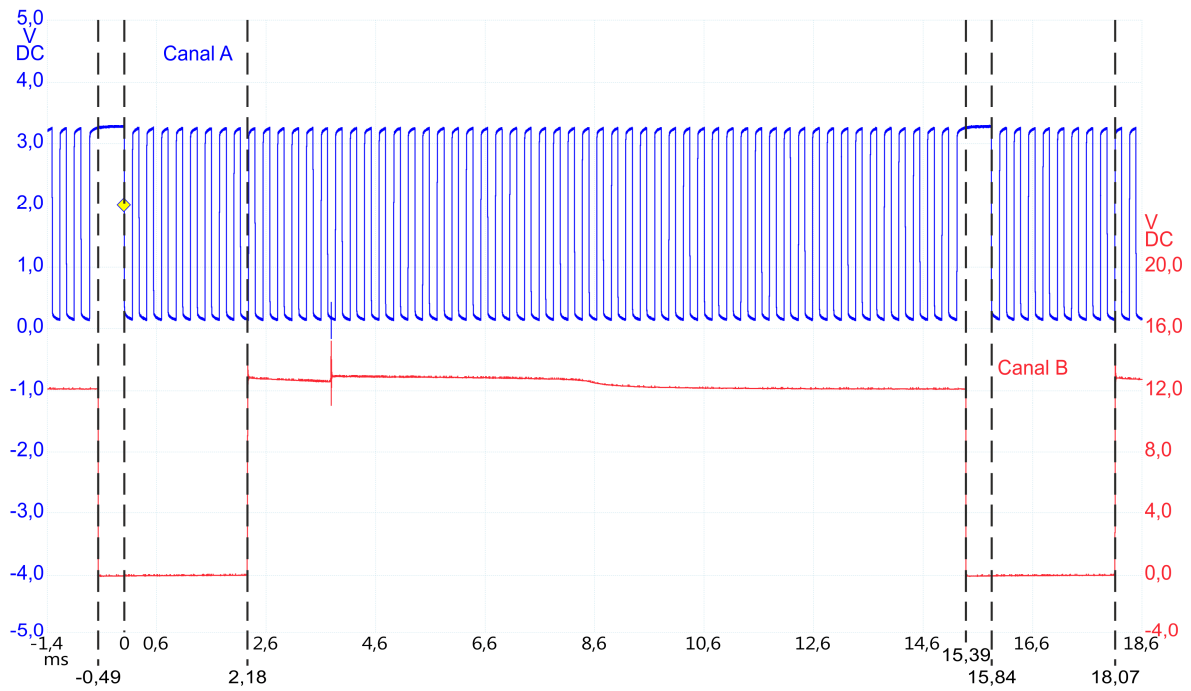


Figura 6.18 – Teste ao controlo da injeção com o início do pulso durante a deteção da falha.

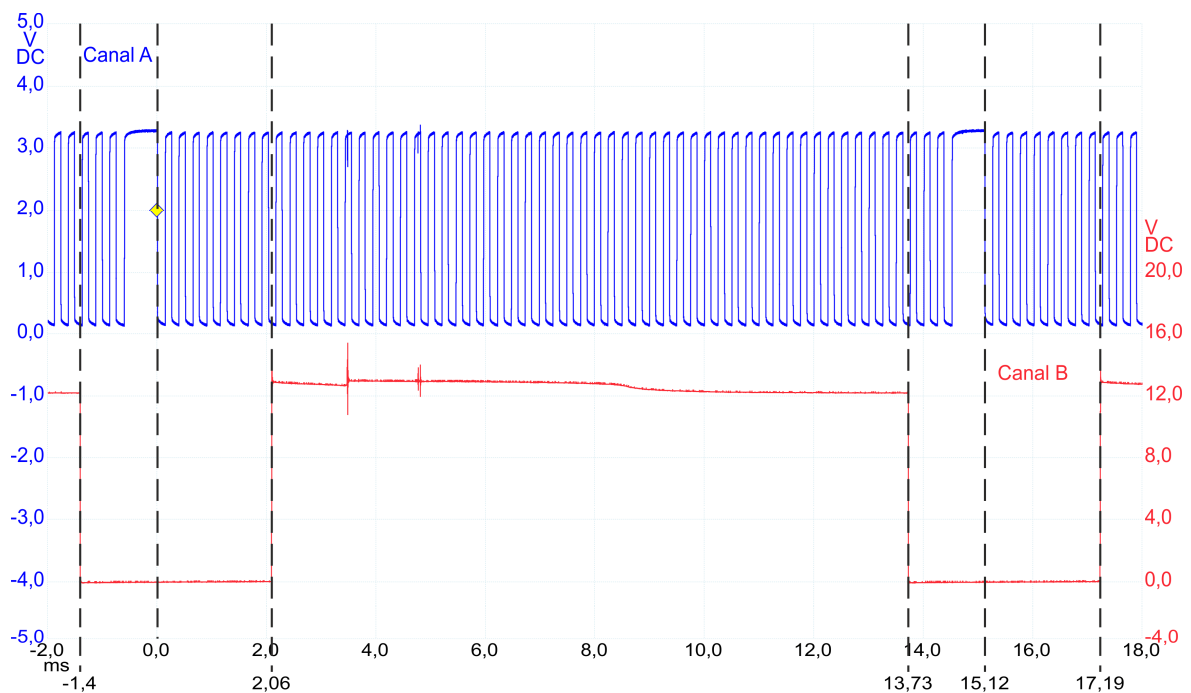


Figura 6.19 – Teste ao controlo da injeção com o início do pulso antes da deteção da falha.

Analisando as formas de onda das três figuras anteriormente apresentadas através dos recursos do osciloscópio, é possível confirmar que os resultados práticos correspondem aos resultados teóricos esperados. Apesar do início da largura poder

ocorrer antes, durante ou após a falha da cambota, o algoritmo de controlo é sempre capaz de controlar corretamente quer o avanço de injeção, quer a largura do pulso.

Apesar de apenas serem apresentadas estas três situações de teste, o processo de confirmação do controlo do pulso de injeção final, foi efetuado inúmeras vezes para diferentes condições de funcionamento, tendo-se obtido resultados positivos em todos os testes. Assim, pode-se dizer que está confirmado o correto controlo para o sistema de injeção de combustível.

### **6.2.11. Resumo**

---

Os testes efetuados ao *software* permitiram avaliar os algoritmos de aquisição dos dados dos sensores, deteção da falha da cambota, deteção de fase do motor, cálculo, controlo da ignição e controlo da injeção. Para comprovar os algoritmos, foram analisadas as formas de onda dos controlos e comparados os tempos reais com os valores teoricamente esperados para as condições de funcionamento verificadas. A correspondência dos valores teóricos com os valores experimentais permitiram comprovar o desempenho dos algoritmos. Assim, pode-se validar positivamente o algoritmo de controlo desenvolvido para a Engitec.

## **6.3. Teste termográfico à PCB**

---

O teste termográfico realizado à PCB permitiu identificar as zonas de maior concentração de temperatura. Deste modo, é possível prevenir falhas e avaliar a necessidade de substituição de componentes ou modificação do *design* do protótipo desenvolvido. Adicionalmente é possível comprovar o correto dimensionamento dos circuitos de controlo dos componentes eletrónicos do módulo de potência.

As Figura 6.20 e Figura 6.21 apresentam as imagens térmicas da face superior e face inferior, respetivamente, adquiridas através da camara termográfica de infravermelhos, com uma temperatura ambiente de 22 °C, a uma distância de 50 cm. As imagens foram captadas após um longo período de funcionamento da ECU, e num instante em que a ECU ainda se encontrava em funcionamento.

Pela análise à Figura 6.20 (face superior) pode-se identificar que a zona de temperatura mais elevada corresponde à zona onde se encontra posicionado o regulador de tensão que converte a tensão da bateria para 5 V. Pela escala de temperatura,

verifica-se que a temperatura do regulador de tensão aproxima dos 80 °C. Em consequência, a zona envolvente possui uma temperatura na ordem dos 40 °C, originada pela dissipação de calor através do plano de massa.

Além disso, verifica-se que também o microcontrolador trabalha numa temperatura de aproximadamente 35 °C, ao contrário do que era esperado. Por outro lado, comprova-se, pela respetiva dissipação de calor (potência dissipada é mínima), que os circuitos eletrónicos (MOSFETs e PROFET) de controlo de injeção, por trabalharem em curtos períodos de tempo (na ordem dos milissegundos), não aquecem, mantendo-se praticamente à temperatura ambiente. Já o transístor de controlo da bobine de ignição trabalha a uma temperatura aproximada de 35 °C. Além disso é possível comprovar o correto funcionamento dos restantes circuitos de controlo dos componentes eletrónicos do módulo de potência (saídas auxiliares), que, de igual modo, apresentam baixas resistências internas e as características necessárias para a aplicação.

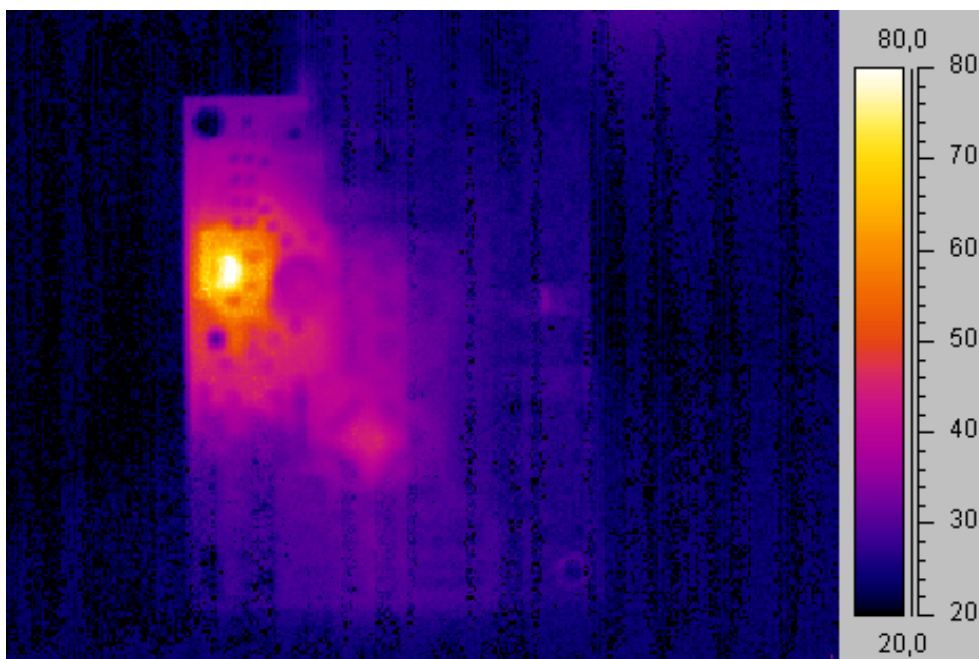


Figura 6.20 – Teste de termografia: vista da face superior da ECU.

No caso da face inferior, através da análise da Figura 6.21, identifica-se que a zona de maior concentração de temperatura corresponde à posição em que, do lado oposto, se encontra o regulador de tensão dos 12 V para 5 V, conforme era esperado. Na zona envolvente a temperatura dissipa-se através do plano de massa e mantém uma temperatura de aproximadamente 35 °C. Nesta face não se identificam zonas de concentração de temperatura na área de potência.



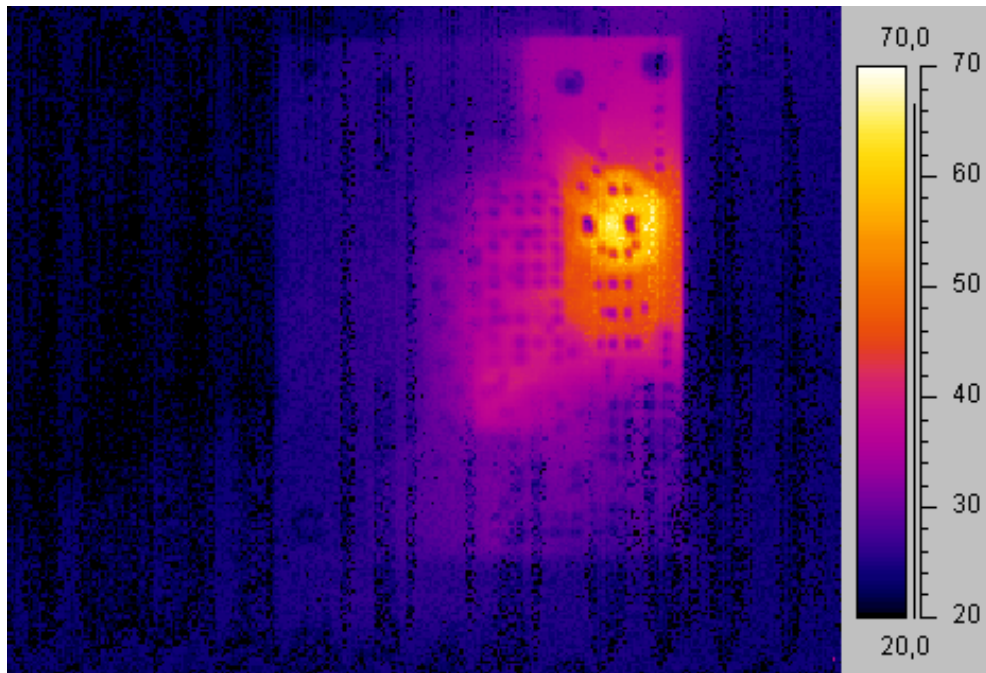


Figura 6.21 – Teste de termografia: vista da face inferior da ECU.

É importante referir que a medição termográfica foi efetuada com uma temperatura ambiente baixa (22 °C) e com a PCB ao “ar livre”. Isto significa que, numa situação de temperatura ambiente superior e em condições em que a PCB está isolada por uma caixa de proteção, a temperatura máxima atingida pelo regulador de tensão pode aumentar, podendo comprometer o seu funcionamento e consequentemente o da Engitec.

Tendo em conta o apresentado, pode-se concluir que, para garantir um funcionamento mais estável a temperaturas inferiores, deve ser acoplado um dissipador de calor no regulador de tensão. Outra solução seria a substituição do regulador de tensão linear por um regulador de tensão comutado.

*Esta página foi intencionalmente deixada em branco*

## 7. Conclusão

---

O presente trabalho apresentou o projeto de desenvolvimento de uma unidade de controlo eletrónico programável de baixo custo com base num microcontrolador de 32 bits, para aplicação em motores monocilíndricos de equipamentos agrícolas e industriais. O objetivo é otimizar a eficiência da combustão, reduzir os consumos e emissão de poluentes, através do controlo eletrónico da ignição e da injeção de combustível. A pesquisa bibliográfica permitiu perceber como as unidades de controlo são estruturadas em termos de *hardware* e *software*. Além disso, permitiu entender a influência do controlo eletrónico da ignição e injeção no desempenho global dos motores e como é efetuado esse controlo. Também possibilitou compreender as tecnologias dos sensores e atuadores e o modo como estes interagem nos sistemas eletrónicos.

A ECU desenvolvida, batizada de Engitec, possui um conjunto de entradas que permitem medir a temperatura do motor, temperatura do ar admitido, pressão absoluta no coletor de admissão, posição da borboleta, posição e velocidade de rotação do motor. Além disso, detém de saídas de potência que possibilitam a atuação da bobine de ignição e do injetor. O *hardware* da ECU é composto por módulos que permitem o acondicionamento dos sinais de entrada de forma a eliminar o ruído (alta-frequência) e ajustar os níveis de tensão ao microcontrolador. Os módulos de potência convertem os sinais do microcontrolador de baixa tensão e poucos miliamperes para tensões e correntes de potência adequadas aos atuadores.

A Engitec possibilita o controlo totalmente eletrónico dos sistemas de ignição e injeção em função da carga do motor até às 16000 RPM. O avanço de ignição e o tempo de injeção são parâmetros programados pelo utilizador em mapas cartográficos RPM-TPS. Através dos sinais dos sensores e da tensão da bateria, são efetuadas correções (programadas pelo utilizador em vetores) que permitem adequar o controlo a todas as condições de funcionamento do motor. Através de comunicação série, a programação da ECU pode ser feita em tempo real, com o motor em funcionamento. Isto permite a otimização dos valores dos parâmetros em banco de potência de motores e perceber diretamente a influência da alteração de parâmetros no desempenho do motor. A Engitec integra ainda limitador de rotação através do corte de ignição, injeção ou ambos.

A Engitec possui um algoritmo inovador de deteção da fase do ciclo Otto para motores monocilíndricos de quatro tempos, através da análise da velocidade de rotação da cambota. Assim, sem a utilização de sensor de fase na árvore de cames, é possível

implementar o controlo de injeção e ignição em modo “sequencial” a partir da fase de arranque.

Um protótipo totalmente funcional foi desenvolvido e aplicado num motor monocilíndrico de quatro tempos, tipicamente utilizado em equipamentos agrícolas, industriais e pequenos veículos desportivos, tais como: motocultivadores, geradores e *karts*, respetivamente. O motor foi previamente adaptado para os sistemas de injeção e ignição eletrónica. Com a realização de inúmeros testes foi possível otimizar o *software* desenvolvido e por fim verificar o correto funcionamento da ECU. Os testes permitiram comprovar o correto controlo do tempo de injeção, do avanço de injeção e do avanço de ignição para diferentes condições de carga e diferentes valores de entrada dos sensores de temperatura, e posição da borboleta. Também se verificou o correto ajuste no tempo de carga da bobine em função da tensão de carga da bateria. O funcionamento da ECU em condições reais permitiu ainda comprovar a compatibilidade eletromagnética dos componentes, por não terem sido detetadas falhas.

Apesar de a Engitec ter sido desenvolvida para um motor monocilíndrico, com as devidas alterações, também pode ser utilizada no controlo de motores com dois cilindros, sendo apenas necessário habilitar o modo *Two Stroke* (funcionamento em modo de uma ignição e uma injeção por cada volta de cambota) e utilizar um sistema de injeção monoponto (apenas um injetor) ou alternativamente dois injetores em paralelo (injeção agrupada).

A ECU de baixo custo desenvolvida é um produto inovador que permite a otimização do desempenho dos equipamentos de baixo custo com motores de combustão de ciclo Otto, tais como ferramentas industriais, agrícolas, geradores elétricos, e também de pequenos veículos desportivos (*karts*, motos, etc.). Por outro lado, permitirá uma utilização mais eficiente dos recursos naturais da Terra e aos utilizadores uma experiência de utilização melhorada.

## 7.1. Trabalho futuro

---

O trabalho aqui desenvolvido pode ser continuado e aperfeiçoado. Por se tratar dum projeto com *firmware*, considera-se uma mais-valia a realização de testes exaustivos para sujeitar a Engitec a diferentes condições de funcionamento, de modo a validar totalmente o algoritmo e o *hardware*. O ideal seria a aplicação da ECU desenvolvida num motor e testada a sua utilização continuada.

É também pertinente o desenvolvimento de um ambiente gráfico que permita visualizar e alterar todos os parâmetros de funcionamento através do protocolo de comunicação pré-configurado na Engitec. Deste modo, simplifica-se a comunicação que atualmente tem de ser efetuada através de linha de comandos.

Relativamente à PCB, é de considerar a substituição do regulador de tensão linear, que converte a tensão dos 12 V para 5 V, por um outro (comutado) com maior eficiência, de modo a reduzir a temperatura de funcionamento deste componente.

Apesar de aumentar os custos, a implementação de um controlo em malha fechada com sensor lambda do sistema de injeção de combustível seria uma evolução que permitiria reduzir o consumo de combustível e as emissões de poluentes.

Como os equipamentos que utilizam estes motores funcionam, muitas das vezes, a um regime de rotação estacionário, seria útil a implementação de um sistema *drive-by-wire* para controlo da posição da borboleta. Através de um sistema em malha fechada, a ECU controla a velocidade de rotação estacionária do motor que pode ser pré-definida pelo utilizador.

Por ultimo, o desenvolvimento de um algoritmo de autodiagnóstico e a implementação de um protocolo de comunicação OBD, segundo as normas ISO em vigor, seria uma utilidade que permitiria aos utilizadores identificar avarias através de dos equipamentos de diagnóstico automóvel comuns.

*Esta página foi intencionalmente deixada em branco*

# Bibliografia

---

- [1] H.-H. Braess e U. Seiffart, Handbook of Automotive Engineering, Warrendale: Sae International, 2005.
- [2] J. R. C. Trigueira, "Otimização da Gestão Eletrónica do Motor," Faculdade de Engenharia - Universidade do Porto, Porto, 2014.
- [3] R. Bosch, Bosch Automotive Handbook, Plochingen: Bentley Publishers, 8th edition.
- [4] N. Hall, "National Aeronautics and Space Administration," NASA Official, [Online]. Available: <https://www.grc.nasa.gov/www/K-12/airplane/engopt.html>. [Acedido em 05 Janeiro 2015].
- [5] M. Kelly, "FotoLibra," [Online]. Available: <http://www.fotolibra.com/gallery/49476/four-stroke-engine-diagram-illustration/>. [Acedido em 30 Janeiro 2015].
- [6] "AvStop Online Magazine," [Online]. Available: [http://avstop.com/ac/power\\_parachute/chapter4\\_1.html](http://avstop.com/ac/power_parachute/chapter4_1.html). [Acedido em 15 Maio 2015].
- [7] F. D. d. Santos, "Utilização de DSPs e FPGAs em Unidades Eletrónicas Automotivas," Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.
- [8] I. Audi of America, "Engine Management Systems," VW/Audi, U.S.A., 200.
- [9] R. B. GmbH, Gasoline-engine management - Systems and Components, England: John Wiley & Sons, Ltd, 2006.
- [10] R. B. GmbH, Automotive electrics automotive electronics, England: John Wiley & Sons, Ltd, 2007.
- [11] T. Denton, Automobile Electrical and Electronic Systems, Oxford: Butterworth Heinemann, 2000.
- [12] M. Farrugia, M. Farrugia e B. Sangeor, ECU Development for a Formula SAE Engine, Detroit: SAE International, 2005.
- [13] W. J. Fleming, "Overview of Automotive Sensors," IEEE SENSORS JOURNAL, 2001.
- [14] T. Denton, Advanced Automotive Fault Diagnosis, Oxon: British Library, 2012.

- [15] PicoScope, "PicoScope Waveform Library," 2015.
- [16] C. E. Milhor, Sistema de Desenvolvimento para Controlo Eletrónico dos Motores de Combustão Ciclo Otto, São Carlos: Universidade de São Paulo, 2002.
- [17] B. S. GmbH, All about ignition coils, Kontich: Ferrel Mogul, 2013.
- [18] D. K. Hurtado e A. d. A. Souza, "A EVOLUÇÃO DO SISTEMA DE INJEÇÃO DE COMBUSTÍVEL EM MOTORES CICLO OTTO," Revista Eletrônica do Curso de Direito da UFSM, 2008.
- [19] Motec, "Motec Engine Management and Data Acquisition Systems," [Online]. Available: <http://www.motec.com/aboutecu/ecuoverview/>. [Acedido em 25 Janeiro 2015].
- [20] R. B. GmbH, "Bosch Motorsport," [Online]. Available: [http://www.bosch-motorsport.de/en/de/produkte/catalog\\_categories\\_sncd\\_lev\\_1\\_397314.php](http://www.bosch-motorsport.de/en/de/produkte/catalog_categories_sncd_lev_1_397314.php). [Acedido em 01 2015].
- [21] J. M. Guerra, "Electronic Engine Control Unit - FST 2007/2008," Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2009.
- [22] MOTEC, *Engine Management Program*, Motec Pty Ltd, 2002.
- [23] A. Limited, "Altium," [Online]. Available: <http://www.altium.com/>. [Acedido em 03 Junho 2015].
- [24] "Guimocircuito - Circuitos Impressos Lda," [Online]. Available: <http://www.guimocircuito.com/>. [Acedido em 05 2015].
- [25] "Olimex," [Online]. Available: <https://www.olimex.com/>. [Acedido em 05 2015].
- [26] A. S.A, "RS Components," [Online]. Available: <http://pt.rs-online.com/web/>. [Acedido em 05 2015].
- [27] B. Sendyka e M. Noga, *Advances in Internal Combustion Engines and Fuel Technologies*, Croacia: InTech, 2013.
- [28] J. F. Vicente, *Advanced Automotive Fault Diagnosis*, Lisboa: Instituto Superior Técnico - Universidade Técnica de Lisboa, 2009.
- [29] M. P. Ltd, "MoTec - Engine Management & Data Acquisition Systems," [Online]. Available: <http://www.motec.com/home>. [Acedido em 01 2015].



*Esta página foi intencionalmente deixada em branco*