



Projeto

Mestrado em Engenharia Automóvel

***Sistema de controlo distribuído para veículos
automóveis***

Helder Henrique Carvalho Gomes

Leiria, *Setembro* de 2016



Projeto

Mestrado em Engenharia Automóvel

***Sistema de controlo distribuído para veículos
automóveis***

Helder Henrique Carvalho Gomes

Dissertação de Mestrado realizada 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 2016

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

“It’s definitely the brain but it's also part of the soul”

Christian von Koenigsegg

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Aos Meus

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Agradecimentos

Agradeço a Deus pela proteção, por me guiar nos momentos mais difíceis, por manter a minha família unida e bem de saúde.

Agradeço aos meus pais pelo elevado esforço financeiro, imensa compressão e apoio incondicional mesmo após o prolongamento do tempo de entrega da tese.

Gostaria de agradecer ao meu orientador professor Doutor Carlos Ferreira pela valiosa oportunidade de trabalhar neste projeto, pelo acreditar, empenho, tempo despendido na minha orientação e por todo o conhecimento transmitido ao longo da minha formação universitária.

Gostaria de agradecer ao Engenheiro Nuno Pires pela ajuda prestada, pelo conhecimento transmitido e pelo facto de ser uma referência para mim.

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Resumo

Os motores de combustão interna são cada vez mais eficientes. Estes apresentam cada vez melhores rendimentos, recorrendo a um menor consumo de combustível e inferiores emissões de poluentes. Isto deve-se em grande parte à introdução do controlo eletrónico de motores e à constante evolução dos mesmos juntamente com outras tecnologias aplicadas. No entanto, a evolução tecnológica tem sido acompanhada por um aumento das necessidades tanto do ponto de vista do condutor como do próprio veículo implicando o aumento dramático dos sistemas eletrónicos auxiliares implementados assim como a interação entre os mesmos. Para combater estas necessidades os construtores têm inevitavelmente recorrido à utilização de sistemas distribuídos de controlo eletrónico.

Com base na revisão bibliográfica realizada procedeu-se à conceção e desenvolvimento de um sistema de gestão eletrónico de motores recorrendo ao conceito de controlo distribuído. Neste âmbito foram implementados diferentes módulos de controlo cada um com tarefas e características próprias, nomeadamente o módulo de sensores, módulo de atuadores, módulo de motor e módulo de cálculo. Para cada um deles foi desenvolvido o *hardware*, *firmware* e funções específicas de controlo. No sentido de possuir maior flexibilidade e adaptabilidade de controlo, assim como realizar a afinação do motor, foi desenvolvido um *software* de calibração e visualização dos diversos parâmetros relativos ao sistema.

Posteriormente, foi contruído um protótipo da arquitetura desenvolvida com vista à aplicação em um motor Otto Ford 2.0i de injeção indireta sequencial com ignição agrupada. Neste contexto foi realizada uma calibração do motor em banco de potência, nomeadamente afinação dos mapas de combustível e ignição assim como a caracterização dos principais sensores e atuadores. Foram realizados um conjunto de testes e análise dos resultados no sentido de garantir o correto funcionamento do motor, verificar a efetividade do algoritmo de controlo aplicado, fiabilidade dos diversos módulos desenvolvidos, assim como validação da arquitetura implementada.

Palavras-chave: CAN bus, arquitetura de controlo distribuído, motor de combustão interna, módulos, calibração, ECU, sistemas de ignição e combustível.

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Abstract

Internal combustion engines are becoming even more efficient. This show higher performance, using less fuel consumption and lower emissions. This is largely due to the introduction of electronic control of engines and constant developments, together with other technologies applied. However the technological evolution has been accompanied by an increase in the needs of both the driver's point of view as the vehicle itself which led to the increase of auxiliary implemented systems as well as the interaction between them. To comply with these needs, manufacturers have inevitably made use of distributed electronic control systems.

Based on the literature review previously made was executed the design and development of an internal combustion engine's electronic management system using the concept of distributed control. Based on this were developed various control modules each with specific tasks, including the sensor module, actuator module, motor module and the computation module. To each one it was developed hardware, firmware and specific control functions. To have flexibility and adaptability of control, to perform the tuning of the engine and display of various system parameters it has developed a calibration software.

Posteriorly, it was built a prototype of the developed architecture for the application use in a Ford 2.0i Otto engine with sequential indirect injection and grouped ignition. Also in this context, an engine power bench calibration was performed, including the tuning of the fuel and ignition maps as well as both characterization of main sensors and actuators. They were carried out a series of tests and analysis of results in order to verify the engine's correct operation, effectiveness of the applied control algorithm, reliability of the various modules developed, as well to validate the implemented architecture.

Keywords: CAN bus, distributed control architecture, internal combustion engine, modules, calibration, ECU, fuel and ignition systems.

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Lista de figuras

Figura 2.1 – PMS e PMI de um motor [3].	6
Figura 2.2 – Ciclo de um motor Otto [3].	7
Figura 2.3 – Injeção Multiponto [3].	11
Figura 2.4 Emissões poluentes (esquerda) e consumo e potência (direita) em função de lambda [3].	12
Figura 2.5 – Bobine de ignição: a) faísca perdida; b) bobine individual [4].	13
Figura 2.6 – Sistema de gestão eletrónica d motores de combustão interna [3].	15
Figura 2.7 – Unidade de controlo eletrónico [7].	15
Figura 2.8 – Conetor J1962 e pinos de comunicação [7].	25
Figura 2.9 – Diferentes sistemas eletrónicos de um veículo automóvel.	25
Figura 2.10 – Sistema com comunicação discreta e CAN [4].	26
Figura 2.11 – Organização física do LIN.	29
Figura 2.12 – Organização física do Flexray.	30
Figura 2.13 – Barramento CAN.	31
Figura 2.14 - Níveis de tensão da comunicação CAN.	32
Figura 2.15 – Processo de arbitragem do protocolo CAN.	33
Figura 2.16 – Constituição de uma mensagem CAN.	34
Figura 2.17 – <i>Data Frame</i> com identificador de 11 bits.	34
Figura 2.18 – <i>Remote Frame</i> do tipo CAN 2.0A.	35
Figura 2.19 – <i>Error Frame</i> .	35
Figura 3.1 - Esquema gráfico do sistema de gestão eletrónica de motor desenvolvido.	38
Figura 3.2 - Esquema gráfico do módulo de aquisição de sensores.	39
Figura 3.3 - PCB do módulo de aquisição de sensores: (a) top layer e (b) bottom layer.	42
Figura 3.4 - Fluxograma organizacional do módulo de aquisição sensores.	44
Figura 3.5 - Esquema gráfico do módulo controlo atuadores.	45
Figura 3.6 - Esquemático das ligações do transceiver CAN aplicado nos módulos desenvolvidos que utilizam o PIC18F.	47

Figura 3.7 - Esquemático do hardware desenvolvido para o controlo dos diferentes atuadores conectados ao módulo de atuadores.....	47
Figura 3.8 - Top layer (esquerda) e bottom layer (direita) da PCB do módulo controlo de atuadores.....	48
Figura 3.9 - Fluxograma organizacional do módulo de controlo de atuadores.	49
Figura 3.10 - Esquema gráfico do módulo de cálculo.	51
Figura 3.11 - Esquemático das ligações do transceiver CAN aplicado nos módulos desenvolvidos que utilizam o PIC32MX.	52
Figura 3.12 - Esquemático das ligações da EEPROM 25AA512, utilizada no módulo de cálculo como <i>backup</i> de todos os dados do sistema.....	53
Figura 3.13 - Placa de desenvolvimento Chipkit Max32.....	53
Figura 3.14 - Top layer (esquerda) e bottom layer (direita) da PCB do módulo de cálculo.	54
Figura 3.15 - Fluxograma organizacional do módulo de cálculo	55
Figura 3.16 - Esquema gráfico do módulo do motor.....	56
Figura 3.17 - Esquemático do hardware desenvolvido para condicionamento, conversão e filtragem dos sensores de referência e sincronismo.	58
Figura 3.18 - Esquemático do hardware desenvolvido para o controlo das bobines de ignição.	58
Figura 3.19 - Top layer (cima) e bottom layer (baixo) da PCB do módulo controlo do motor.	59
Figura 3.20 - Fluxograma organizacional do módulo de controlo do motor.....	61
Figura 3.21 - Imagem representativa do PLM utilizado no sistema.....	63
Figura 4.1 - Painel frontal e diagrama de blocos do Labview.	66
Figura 4.2 - Esquema gráfico da organização do software desenvolvido em Labview.	67
Figura 4.3 - Excerto do diagrama de blocos em referente à comunicação serie.....	68
Figura 4.4 - Excerto do diagrama de blocos referente ao “handshake”.....	69
Figura 4.5 - Excerto do diagrama de blocos em referente à comunicação serie.....	70
Figura 4.6 - Excerto do diagrama de blocos do pedido de valores em tempo real. ...	70
Figura 4.7 - Excerto do diagrama de blocos em referente à composição das variáveis.....	71
Figura 4.8 - Excerto do diagrama de blocos referente à mostragem da informação. 72	72

Figura 4.9 - Excerto do diagrama de blocos referente à gravação de um ficheiro de dados.....	73
Figura 4.10 - Excerto do diagrama de blocos referente à deteção e alteração de parâmetros na EMS.	74
Figura 4.11 - Interface gráfico desenvolvido: A) Menu Principal; B) Comunicação; C) Gravação de dados; D) Botões; E) Painel fixo; F) Janela principal.	75
Figura 4.12 - Ficheiro de dados “.txt” gravado pela EMS.....	76
Figura 4.13 - Painel frontal com os diferentes tipos de indicadores.	77
Figura 4.14 - Menu de visualização e resumo de todas as variáveis do motor.	78
Figura 4.15 - Tabela 2D do mapa de avanço de ignição e respetivo gráfico 3D.	79
Figura 5.1 - Conectores: (a) ligação ao motor e (b) ligação aos módulos.	82
Figura 5.2 - Esquema gráfico do circuito elétrico de potência.	83
Figura 5.3 - Esquema gráfico do circuito elétrico de sinal.	84
Figura 5.4 - Protótipo com a EMS implementada.....	85
Figura 5.5 - Sensor TPS utilizado.	88
Figura 5.6 - Sensor MAP utilizado	89
Figura 5.7 - Sensor ET utilizado	89
Figura 5.8 – Sensor AT utilizado	90
Figura 5.9 – Sensor lambda Bosch LSU 4.2	91
Figura 5.10 – Atuador <i>ralenti</i>	95
Figura 5.11 - Sensor de sincronismo utilizado.....	98
Figura 5.12 - Sensor de referência utilizado.	98
Figura 5.13 - Bobines de ignição utilizadas.....	100
Figura 6.1 - Desenvolvimento aos sistemas: (a) em bancada e (b) simulador Ford VI.	110
Figura 6.2 - Testes ao motor: (a) no simulador e (b) no veículo.....	110
Figura 6.3 - Maha LPS 3000 - R100.....	111
Figura 6.4 - Equipamentos Bosch BEA 250 (esquerda) e Bosch FSA 720 (direita).	112
Figura 6.5 - Pistola estroboscopia Facom X.730B (esquerda) e medidor de temperatura Testo 735-2 (direita).	112
Figura 6.6 - Condicionamento de sinal dos sensores analógicos.....	115
Figura 6.7 - Condicionamento de sinal do sensor de referência	116

Figura 6.8 – Sinal de controlo do injetor (pedido pelo MCU) e medição aos terminais do injetor.	117
Figura 6.9 - Sinal de controlo da bobine (pedido pelo MCU) e medição aos terminais da bobine.	117
Figura 6.10 - Sinal de controlo do atuador do <i>ralenti</i> (pedido pelo MCU) e medição aos terminais do atuador.....	118
Figura 6.11 – Sincronismo do motor.	119
Figura 6.12 – <i>Dwell</i> de 2.5ms da bobine de ignição.....	120
Figura 6.13 – Tempo de injeção de 4ms.	120
Figura 6.14 – Cálculo da RPM entre dentes da arvore de cames.	121
Figura 6.15 – Cálculo da RPM entre cada vota do motor.....	121
Figura 6.16 – Cálculo da RPM dente a dente (938 RPM).	121
Figura 6.17 – Variação da compensação do combustível em função da temperatura.	122
.....	
Figura 6.18 – Variação do combustível injetado em função do TPS.	122
Figura 6.19 – Processo de afinação do motor para as 5500 RPM.	123
Figura 6.20 – Resultados dos testes realizados.....	123
Figura 6.21 – Diferença entre os testes realizados.....	124

Lista de tabelas

Tabela 1 – Mensagem CAN do módulo de sensores A.	87
Tabela 2 - Mensagem CAN do módulo de sensores B.	87
Tabela 3 – Mensagem CAN do PLM.....	87
Tabela 4 – Mensagem CAN do módulo C.....	94
Tabela 5 – Mensagem CAN do módulo D.....	94
Tabela 6 – Mensagem CAN do módulo F.	97
Tabela 7 – Mensagem CAN 1 do módulo F.	101
Tabela 8 - Mensagem CAN 2 do módulo F.....	101
Tabela 9 - Mensagem CAN 3 do módulo F.....	101

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Lista de siglas

ABS	Anti-Lock Braking System
ACK	Acknowledgement
ADC	Analog to Digital Conversion
APPS	Accelerator Pedal Position Sensor
AT	Air Temperature
BA	Bitwise Arbitration
CAN	Controller Area Network
CCP	Capture/Compare/PWM
CO	Carbon Monoxide
CO ₂	Carbon Dioxide
CRC	Cyclic Redundancy Check
DLC	Data Length Code
DMA	Direct Memory Access
ECU	Engine Control Unit
EEPROM	Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory
EGR	Exhaust Gas Recirculation
EMC	Electromagnetic Compatibility
EMS	Engine Management System
ET	Engine Temperature
ETC	Electronic Throttle Control
FTDMA	Flexible Time Division Multiple Access
LIN	Local Interconnect Network
HC	Hydrocarbons
ID	Identifier
IDE	Identifier Extension
I ² C	Inter-Integrated Circuit
ISO	International Organization for Standardization
MA	Multiple Access
MAF	Mass Air Flow
MAP	Manifold Absolute Pressure
MBT	Maximum Brake Torque
MCI	Motor de Combustão Interna
MCU	Microcontroller

NO _x	Mono-Nitrogen Oxides
NRZ	Non-Return-to-Zero
NTC	Negative Temperature Coefficient
OBD	On-Board Diagnostic
PCB	Printed Circuit Board
PLM	Professional Lambda Meter
PM	Particulate Matter
PMS	Ponto Morto Superior
PMI	Ponto Morto Inferior
PWM	Pulse-Width Modulation
PTC	Positive Temperature Coefficient
RAM	Random Access Memory
RPM	Revolutions per Minute
RTR	Remote Transmission Request
SAE	Society of Automotive Engineers
SPI	Serial Peripheral Interface
TDC	Top Dead Center
TDMA	Time Division Multiple Access
TPS	Throttle Position Sensor
UART	Universal Asynchronous Receiver/Transmitter
USB	Universal Serial Bus
VI	Virtual Instrument

Índice

AGRADECIMENTOS	VII
RESUMO	IX
ABSTRACT	XI
LISTA DE FIGURAS	XIII
LISTA DE TABELAS	XVII
LISTA DE SIGLAS	XIX
ÍNDICE	XXI
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Contexto e Motivação	1
1.2. Objetivos	2
1.3. Estrutura do relatório	3
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1. Motores de Combustão Interna	5
2.2. Gestão Eletrónica de Motores	14
2.3. Controlo Eletrónico Distribuído	25
3. ARQUITETURA	37
3.1. Tipologia da Arquitetura	37
3.2. Módulo Sensores	38
3.3. Módulo Atuadores	45
3.4. Módulo Cálculo	50
3.5. Módulo Motor	56
3.6. Outros (Módulos Expansíveis)	62
4. SOFTWARE DE VISUALIZAÇÃO E CALIBRAÇÃO	65
4.1. Plataforma de Programação	65
4.2. Organização Funcional	66
4.3. Interface Gráfico	74
5. IMPLEMENTAÇÃO	81
5.1. Motor Ford 2.0i	81
5.2. Instalação Elétrica	81
5.3. Arquitetura Implementada	85
6. TESTES E RESULTADOS	109
6.1. Metodologia de Desenvolvimento	109
6.2. Equipamento Utilizados	111
6.3. Validação de Hardware	114
6.4. Validação Funcional/firmware	118
6.5. Validação Prática	121
6.6. Testes em Banco de Potência e Estrada	123
7. DISCUSSÃO DE RESULTADOS	125
8. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	131

8.1.	Conclusão do Trabalho	131
8.2.	Trabalhos Futuros	132
9.	BIBLIOGRAFIA	135
10.	ANEXOS	137

1. Introdução

1.1. Contexto e Motivação

Desde o seu aparecimento que os motores de combustão interna têm desempenhado um papel importante na sociedade mundial. Ainda que possam ser utilizados em diversas atividades, como produção estacionária de energia elétrica, estes foram desde logo associados a meios de transporte para movimentação de pessoas e bens, por terra (veículos automóveis), ar e água. No entanto, e apesar das diversas vantagens, estes possuem inerentemente ao seu princípio de funcionamento um conjunto de características negativas tal como o baixo rendimento, emissões de poluentes e dependem na sua maioria da utilização de combustíveis fósseis.

A necessidade de cumprir com as crescentes normas ambientais aplicadas aos motores de combustão interna levada a cabo pelas entidades reguladoras juntamente com o aparecimento do transístor e cada vez maior domínio dos sistemas eletrónicos, levou à substituição dos respetivos sistemas de controlo eletromecânicos pelos sistemas de controlo eletrónicos. Por sua vez, a constante implementação de novas soluções tecnológicas na área da gestão eletrónica de motores, complementadas com soluções mecânicas em constante evolução, como por exemplo sobrealimentação, injeção direta, sistemas de reaproveitamento de energia ou até materiais mais leves, têm possibilitado a existência de motores cada vez com menor cilindrada para a mesma potência produzida.

Um sistema de gestão eletrónica é constituído por um conjunto de subsistemas, nomeadamente sensores, atuadores, unidade de controlo eletrónico (ECU), interface de diagnóstico e comunicação externa para com outros sistemas eletrónicos. Essencialmente o objetivo deste sistema é o controlo do combustível, ignição e gestão da carga do motor, para que este funcione dentro dos parâmetros ideais de funcionamento e eficiência assim como permitir a troca de informação com os restantes sistemas eletrónicos.

A contínua e crescente introdução de sistemas eletrónicos nos veículos automóveis com vista ao auxílio do condutor, otimização do funcionamento, performance e segurança assim como a necessidade da sua interligação permitiu concluir desde logo que o processamento centralizado deixaria de ser ter capacidade de resposta tanto pela complexidade de

cablagens como pelos custos de produção ou até pela estruturação e implementação dos algoritmos de controlo. Como tal, tornou-se imperativo o desenvolvimento de métodos de controlo descentralizados, assim como o desenvolvimento dos respetivos protocolos de comunicação no sentido de permitir a interligação e partilha de informação entre os vários subsistemas implementados. Um exemplo pioneiro, e hoje em dia obrigatório, deste tipo de controlo é o sistema anti bloqueio de rodas (ABS) e a sua interligação com a ECU do motor, recorrendo ao protocolo CAN (*Controller Area Network*).

Considerando esta tendência no desenvolvimento dos sistemas de controlo eletrónico e tendo em conta que a sua implementação pode acarretar um conjunto de vantagens, é então desenvolvido um sistema de gestão eletrónica de motores de combustão interna recorrendo ao conceito de controlo distribuído.

1.2. Objetivos

A realização deste trabalho tem como objetivo principal a desenvolvimento de um sistema de gestão eletrónica de motores recorrendo ao conceito de controlo distribuído. No sentido de provar a viabilidade da arquitetura/conceito realizou-se o trabalho de forma gradual tendo sido estipulados um conjunto de objetivos secundários.

Inicialmente realizar uma revisão bibliográfica no sentido de ver o estado de arte e adquirir conhecimento sobre os assuntos a tratar.

Com base na revisão bibliográfica proceder-se à conceção de um arquitetura de controlo distribuído, nomeadamente o desenvolvimento os diferentes módulos, respetivo *hardware*, *firmware* e organização estrutural/funcional.

Criar um *software* de que permita a visualização e calibração dos diferentes parâmetros de controlo do sistema assim como a capacidade de afinação do motor.

Implementação prática do sistema desenvolvido, primeiramente num ambiente controlado/laboratorial e posteriormente num motor Otto Ford 2.0i de injeção sequencial indireta e fâisca perdida.

Calibração do motor em banco de potência, realização de testes práticos e respetiva análise à fiabilidade do protótipo, vantagens e desvantagens do sistema.

1.3. Estrutura do relatório

O trabalho apresentado encontra-se organizado em oito capítulos. Estes são a introdução, revisão bibliográfica, arquitetura, *software* de visualização e calibração, implementação prática, resultados e respetiva análise, terminado nas conclusões. O primeiro capítulo trata da introdução, contexto e motivação do trabalho realizado. No segundo capítulo é realizada uma revisão bibliográfica abordando o estado de arte atual, funcionamento de motores de combustão interna, gestão eletrónica de motores e principais características, assim uma abordagem ao controlo distribuído aplicado no automóvel e respetivos protocolos. No terceiro capítulo expõe-se a arquitetura proposta e explica-se o conceito desenvolvido, principais módulos e características técnicas. Posteriormente, no quarto capítulo, aborda-se o *software* desenvolvido com vista à visualização dos parâmetros e calibração do motor de combustão interna. No sexto capítulo são realizados os principais testes práticos de validação e calibração do sistema com respetiva apresentação e discussão dos resultados. Por fim, no último capítulo, apresentam-se as conclusões assim como as propostas de trabalhos futuros.

2. Revisão Bibliográfica

Neste capítulo será realizada a fundamentação teórica necessária para a compreensão dos diversos temas abordados ao longo do trabalho, e que servirão como base técnica durante a implementação do mesmo. Serão abordados os motores de combustão interna ciclo Otto, compreensão dos seus elementos mecânicos, respetivo ciclo de funcionamento, as suas principais características e propriedades assim como os sistemas de controlo. Será feita uma análise aos sistemas de gestão eletrónica deste tipo de motores, abordagens de implementação, principais sensores e atuadores e os respetivos algoritmos e variáveis de controlo. Por fim, será realizada uma abordagem aos métodos de controlo distribuídos utilizados na indústria automóvel, necessidades técnicas de utilização, sistemas nos quais são aplicados, assim como os principais protocolos de comunicação utilizados.

2.1. Motores de Combustão Interna

Motores Otto ou motores de ignição por faísca são motores de combustão interna (MCI) no qual é admitida e comprimida uma mistura homogénea de ar e combustível (no caso dos motores de injeção indireta) idealmente no estado gasoso, cuja combustão é iniciada no momento ideal por meio de uma faísca gerada na vela de ignição. Este acontecimento produz um pico de pressão no interior do cilindro, idealmente no ponto de binário máximo (MBT) resultando no movimento descendente do pistão e produzindo assim trabalho [1] [2].

2.1.1. Princípio de Funcionamento

Nos motores de quatro tempos, um ciclo completo corresponde a duas voltas de cambota (720°) de todos os cilindros, sendo que cada um dos tempos dura cerca de 180° . Os quatro ciclos denominam-se de admissão, compressão, expansão e escape e apresentam-se na figura abaixo. Durante o movimento de rotação da cambota, os cilindros diretamente acoplados à mesma pelas bielas, vão executar o movimento entre o ponto morto inferior (PMI) e o ponto morto superior (PMS).

De realçar que ao longo do tempo os motores de combustão interna foram melhorados, em que apesar de cada um dos ciclos se manter, foram sendo constantemente otimizados, tanto por modificações mecânicas (rendimentos mecânicos, volumétricos, térmicos, etc.) como pelo controlo dos diferentes sistemas de gestão eletrónica.

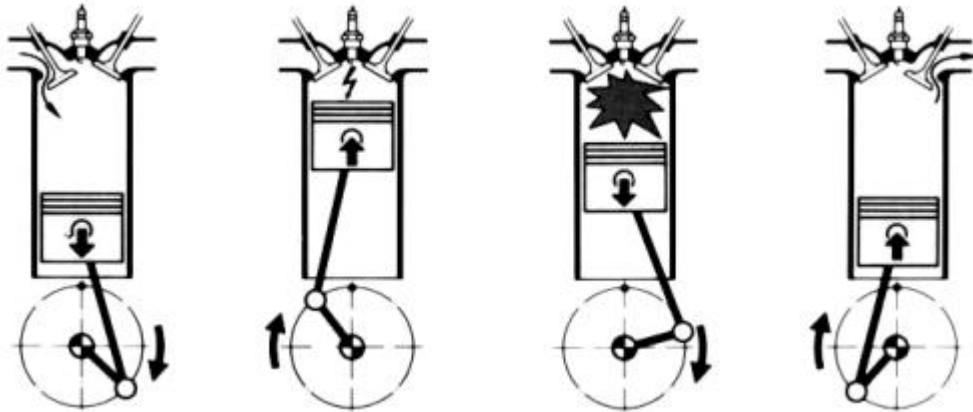


Figura 2.2 – Ciclo de um motor Otto [3].

2.1.1. Parâmetros de Funcionamento

Os motores de combustão interna, especificamente o seu rendimento, performance e emissão de poluentes, depende de inúmeros parâmetros abaixo descritos. Alguns destes parâmetros são adaptáveis ao tipo de controlo/funcionamento que se pretende do motor enquanto outros são fatores não controláveis (como as propriedades do ar ambiente) ou são parâmetros de construção do motor que não se alteram sem modificações mecânicas profundas (rendimento volumétrico).

Relação de compressão

A relação de compressão de um motor é definida como a relação entre o volume do cilindro quando o pistão está no ponto morto inferior e o volume do cilindro quando o pistão está no ponto morto superior.

A relação de compressão afeta diretamente o funcionamento do motor a vários níveis, principalmente a compressão efetiva do gás admitido (e portanto pressão e temperatura

atingidos) com impacto direto no rendimento do motor, sendo estas duas variáveis diretamente proporcionais em qualquer motor de combustão interna [2].

Capacidade

A capacidade de um motor, vulgarmente denominada de cilindrada, é o volume de ar deslocado por ciclo. Uma vez que a relação entre massa de ar e massa de combustível deve estar sempre compreendida dentro de um certo intervalo, para as mesmas propriedades do ar admitido quanto maior a capacidade do motor maior a quantidade de combustível que consegue queimar e logo para o mesmo rendimento maior a potência/binário disponível.

Pressão de sobrealimentação

Como alternativa a um aumento de capacidade, é possível aumentar a massa de ar admitido por um motor ao aumentar a pressão a que este faz a admissão, com um efeito semelhante de aumento de binário e potência. Há várias formas de o fazer, mas enquanto compressores mecânicos produzem pressão de uma forma que não pode ser alterada sem modificações mecânicas (num compressor volumétrico a pressão depende essencialmente da relação de transmissão do motor para o compressor e das dimensões do motor e do compressor), o turbocompressor é um tipo de compressor muito particular em que não há ligação mecânica ao motor e o seu movimento é feito através de uma turbina acionada pelo caudal dos gases de escape. Uma válvula chamada *wastegate* funciona como *bypass* permitindo controlar quanto deste caudal passa pela turbina e assim qual a rotação que atinge e respetiva pressão que o compressor gera (encontra-se acoplado à turbina por um veio). Ainda que cada mais reduzido, estes sistemas de turbo-compressão possuem inerentes a eles um fenómeno de atraso de resposta denominado de *turbo-lag* associado ao método de controlo dos mesmos [1].

Rendimento volumétrico

O rendimento volumétrico é essencialmente a eficiência do motor como bomba de ar. É definido como a massa de ar admitida face à massa de ar teoricamente correspondente à capacidade do motor. Este varia com o funcionamento do motor, podendo ser projetado para ser elevado a certos regimes em detrimento de outros. Sistemas de admissão recentes incluem variação de geometria e/ou tempos de abertura de válvulas para conseguir elevado rendimento num intervalo de funcionamento mais amplo [2].

Rendimento mecânico

Do trabalho realizado no interior do motor pela expansão dos gases algum é perdido a mover os componentes devido aos atritos internos e a alimentar componentes necessários ao funcionamento do motor (ex: sistema de lubrificação). Considera-se rendimento mecânico à relação entre potência/binário disponível à cambota para realizar trabalho e aquilo que foi inicialmente produzido pelo motor [2].

Propriedades do ar

O comportamento de um motor de combustão está inevitavelmente condicionado pelas propriedades químicas e termodinâmicas do ar que utiliza. O calor específico ou capacidade térmica do ar - essencialmente a quantidade de energia necessária para alterar a sua temperatura - afeta diretamente o rendimento dos motores, em proporcionalidade direta. Este valor no ar admitido pelos motores é por norma ligeiramente inferior ao do ar atmosférico devido ao aquecimento do ar no compartimento do motor e nas condutas de admissão.

A densidade do ar define a massa de oxigénio presente num dado volume, logo afeta diretamente a potência. A variação da temperatura e pressão ambiente devem ser acompanhadas por uma correspondente variação na quantidade de combustível alimentado. A velocidade com que o ar é admitido também influencia o rendimento do motor. A combustão beneficia de turbulência que aumenta com a velocidade a que o ar entra no cilindro [2]. Martins A temperatura e pressão do ar afetam a velocidade da frente de chama que tem impacto direto na ocorrência de detonação. A pressão aumenta a velocidade enquanto a temperatura tem o efeito oposto [1]. Uma vez que a ocorrência de detonação é o fator limitador da relação de compressão e do avanço de ignição de um motor Otto estes fatores afetam o rendimento do motor.

Propriedades do combustível

O poder calorífico do combustível afeta diretamente a quantidade de energia que é libertada na combustão, com impacto direto nos consumos. A estequiometria define a quantidade de combustível que o motor consegue queimar, e portanto a potência que consegue produzir. Uma relação ar/combustível mais baixa permite queimar mais combustível na mesma quantidade de ar.

A capacidade de um combustível resistir a detonação é medida e padronizada segundo o índice de octano (que compara esta característica nos vários combustíveis com o ISO-

octano). Um índice de octano mais elevado permite um maior rendimento do motor ao utilizar uma relação de compressão superior e/ou maior avanço de ignição sem que ocorra detonação [1].

Emissões poluentes

Uma combustão ideal de combustíveis compostos por hidrocarbonetos resulta em oxidação perfeita e produção de apenas dióxido de carbono e água. No entanto por vários motivos a combustão nunca é perfeita e são produzidos subprodutos da combustão indesejados que são tóxicos e nocivos para o ambiente. Estes são sobretudo hidrocarbonetos (HC), monóxido de carbono (CO), óxidos de azoto (NO_x) e partículas (PM), podendo ser ainda produzidos outros compostos resultantes de impurezas nos combustíveis (por ex. sulfuretos) ou até mesmo do óleo de lubrificação do motor. Como regra geral emissões de hidrocarbonetos e monóxido de carbono estão associadas a motores Otto convencionais (mistura homogénea) e emissões de óxidos de azoto a motores de mistura pobre (Diesel e Otto de injeção direta). Partículas são problema sobretudo de motores Diesel [4]. Atualmente todos os automóveis que circulam na via pública estão equipados com catalisador de gases de escape, que converte emissões de HC, CO e NO_x em CO₂, água e nitrogénio. Associado ao catalisador existem atualmente inúmeros métodos implementados e que visam a redução de emissões, tal como o sistema de recirculação de gases de escape (EGR), filtro de partículas, sistemas de recuperação de energia elétricos, *canister*, *start-and-stop*, estratégias de controlo eletrónica para rápido aquecimento do motor, entre outros sistemas [4].

Sistema de injeção

Existem várias formas de fazer a alimentação de combustível em motores Otto. O sistema clássico passa por carburadores, tendo estes já sido quase totalmente substituídos por sistemas de injeção eletrónica. Em motores de injeção eletrónica a massa de combustível a ser injetada é calculada pela unidade de controlo e depois é gerado um sinal elétrico que fará a abertura do injetor.

Nestes sistemas a injeção pode ser feita por um ou vários injetores (monoponto ou multiponto). Com sistema multiponto a injeção pode ser em simultâneo ou sequencialmente, e embora tradicionalmente feita na admissão atualmente a tendência é para sistemas de injeção direta (no interior dos cilindros). Na fase de arranque um sistema sequencial pode fazer injeção simultânea ou agrupada, que dependendo da temperatura do motor pode continuar a ser feita durante a fase de aquecimento.

A principal vantagem de injeção direta passa pelo controlo mais preciso e em tempo real dos tempos de injeção (o combustível pode ser injetado no cilindro com as válvulas fechadas), e o ganho em concentração de oxigénio no ar que advém de minimizar a quantidade de vapores de combustível na admissão. A injeção direta permite carga estratificada, beneficiando os consumos [4].

O controlo da carga de um motor Otto é feito pelo controlo do ar admitido, normalmente pela borboleta de admissão, sendo que sem variar a posição da borboleta a ECU tem uma capacidade muito limitada de variar a carga do motor já que a relação ar-combustível (AFR) deve andar sempre próxima de um valor 14.7:1 para gasolina [3].

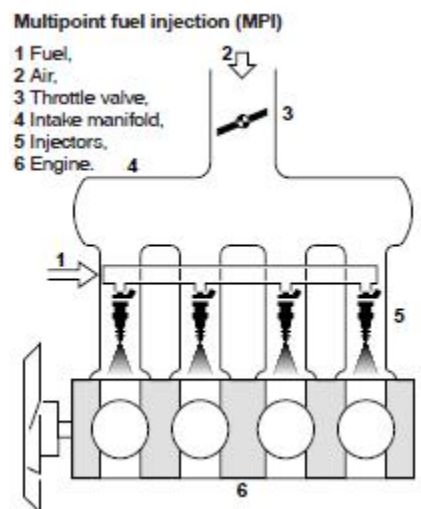


Figura 2.3 – Injeção Multiponto [3].

Lambda

O fator lambda ou fator de excesso de ar relaciona a relação estequiométrica real com a relação teórica do combustível. Embora seja tipicamente o parâmetro medido e utilizado, um motor também pode ser controlado com o seu inverso, a razão de equivalência. Um fator lambda de 1 indica mistura estequiométrica, acima de 1 mistura pobre (excesso de ar) e abaixo de 1 mistura rica (excesso de combustível). Podem ser utilizados dois tipos de sensores de medição do fator lambda, banda estreita (*narrow-band*) ou banda larga (*wide-band*), sendo um indicado apenas para medição de valores de lambda 1 e outro para valores de lambda mais alargados [3] [5].

Em motores Otto de veículos de estrada o fator lambda não varia muito em torno de 1 (se o fizer é por pouco tempo Ex: aceleração), por motivos de estabilidade da combustão e emissões poluentes, uma vez que os catalisadores estão por norma otimizados para funcionar na zona de lambda 1 com um pequeno desvio. Relações ligeiramente mais

baixas aumentam a potência mas também a emissão de hidrocarbonetos e monóxido de carbono, perdendo rendimento, e relações mais altas melhoram o rendimento mas causam elevadas emissões de NO_x (Figura 2.4). Para aplicação em desporto automóvel, em que a performance é o mais importante, é possível ver os valores de λ baixarem até perto de 0.8, mas para veículos de estrada este anda sempre entre 0.95 e 1.1 [6]

Motores de injeção direta podem funcionar com mistura estratificada, permitindo uma mistura em média muito pobre perto das parede do cilindro ($\lambda > 1.6$), mas que na zona perto da vela de ignição é estequiométrica ou rica [4].

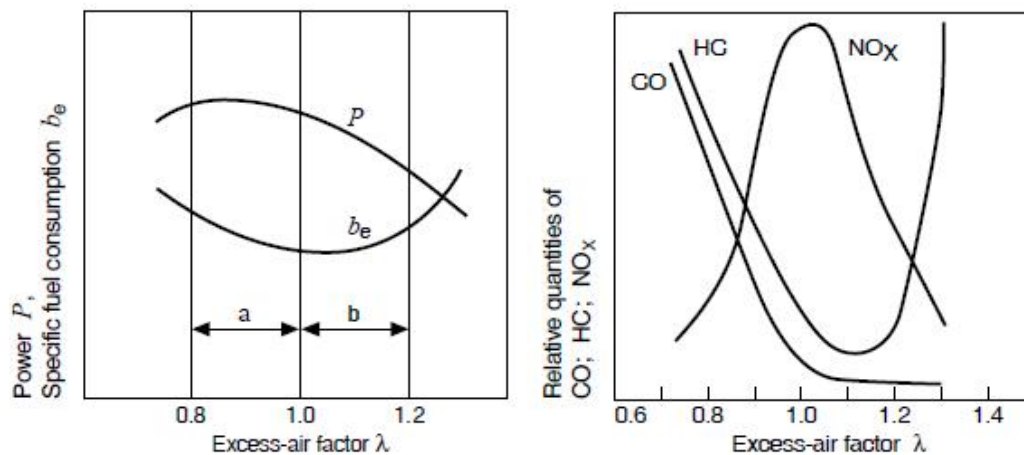


Figura 2.4 Emissões poluentes (esquerda) e consumo e potência (direita) em função de λ [3].

Sistema de ignição

O sistema de ignição é responsável por iniciar a combustão num motor Otto através de uma faísca gerada na vela de ignição. A mistura ar/combustível rapidamente deflagra na vizinhança da vela e a frente de chama propaga-se em todas as direções até todo o combustível estar queimado.

O sistema clássico de ignição recorria a um distribuidor de platinados para abrir sequencialmente os contatos que ligavam uma bobine de ignição à massa, causando um pico de tensão que era direcionado noutra zona do distribuidor para a vela desejada [5].

Atualmente utilizam-se sistemas totalmente eletrónicos que possuem drivers para fazer o controlo de ignição, podendo esta ser designada de ignição sequencial (uma bobine para cada cilindro) ou ignição de faísca perdida (uma bobine dupla cuja faísca acontece em simultâneo em dois cilindro nos quais um se encontra no tempo de compressão, bobine certa, e outro no tempo de escape sendo a faísca perdida).

Isto permite um controlo mais rápido do fecho do circuito de carregamento da bobine (gerando tensões superiores em que a tensão gerada pela bobine é proporcional à derivada da corrente que a percorre), mais preciso, sem desgaste mecânico e perda de fiabilidade. É ainda possível mais flexibilidade de controlo do avanço de ignição e do tempo de carregamento da bobine (*dwell*), anteriormente limitados pela mecânica do sistema, traduzindo-se em ganhos na performance como na redução de emissões [5].



Figura 2.5 – Bobine de ignição: a) faísca perdida; b) bobine individual [4].

Detonação

A detonação ou *knock* é a principal limitação no funcionamento de um motor Otto. É o fenómeno que se dá quando são geradas zonas pontuais de temperatura e pressão muito elevadas dentro do cilindro e que entram em combustão espontânea, libertando uma onda de pressão que interfere com a combustão normal e pode causar danos no motor [3] [5].

Trata-se de um fenómeno normal quando ocorre pontualmente e de forma pouco notória, mas torna-se problemático quando ocorre com maior frequência ou intensidade. É afetado por muitos fatores, entre eles a temperatura do ar e das superfícies do motor, pressão, relação ar/combustível, geometria da câmara de combustão, resíduos de combustão anterior, entre outros, mas é afetado e controlado sobretudo pelo avanço de ignição (Figura 2.6) [3]. Por norma devido à elevada velocidade e turbulência gerada não costuma ser problema a altos regimes, mas a baixos regimes e sobretudo com elevadas cargas é necessário atrasar a ignição para prevenir a sua ocorrência, infelizmente com inevitável perda de rendimento do motor. Sistemas mecânicos fazem uma variação mais simples com uma pior aproximação enquanto controlo eletrónico permite funcionar sempre mais próximo do limite. Para além dos valores de avanço pré-programados para prevenir a detonação, o motor está equipado com sensores piezoelétricos com a função específica de detetar a

ocorrência de detonação e informar a ECU que atua reduzindo o avanço até a combustão voltar à normalidade, geralmente reduzindo de dois em dois graus até deixar de detetar detonação, e depois avançando um grau de cada vez até ao máximo avanço possível sem detonação [3] [5].

2.2. Gestão Eletrónica de Motores

Com a evolução tecnológica e o advento dos transístores, registou-se um aumento exponencial do uso de microcontroladores. Este, juntamente com a necessidade de cumprir com as crescentes normas ambientais aplicadas aos motores de combustão interna levou à substituição dos sistemas de controlo eletromecânicos pelos sistemas eletrónicos. Esta inovação tecnológica levou à redução de poluentes para atmosfera, redução de consumos, aumento de performance dos motores, assim como ao desenvolvimento de sistemas de auxílio ao condutor, impossíveis de implementar anteriormente.

Um sistema de gestão eletrónica é constituído por um conjunto de subsistemas, nomeadamente sensores, atuadores, unidade eletrónica de controlo (ECU), interface de diagnóstico e comunicação externa para com outros sistemas eletrónicos. De uma forma resumida o objetivo deste sistema é o controlo do combustível, ignição e estão da carga do motor, para que este funcione dentro dos parâmetros ideais de funcionamento e eficiência, no sentido de reduzir emissões de poluentes e obter a melhor performance à custa do menor consumo de combustível.

Devido à instalação destes sistemas de gestão eletrónica, complementados com soluções mecânicas em crescente inovação, como por exemplo sobrealimentação sistemas de reaproveitamento de energia ou matérias mais leves de possibilita a existência de motores cada vez com menor cilindrada para a mesma potência produzida.

Como principal elemento deste sistema encontra-se a ECU. Esta recebe um conjunto de sinais provenientes dos diversos sensores e com base nos cálculos efetuados internamente (com base na calibração previamente realizada) e no respetivo algoritmo de estratégia/decisão executa o controlo dos diversos atuadores, para determinada condição do motor [4] [6].

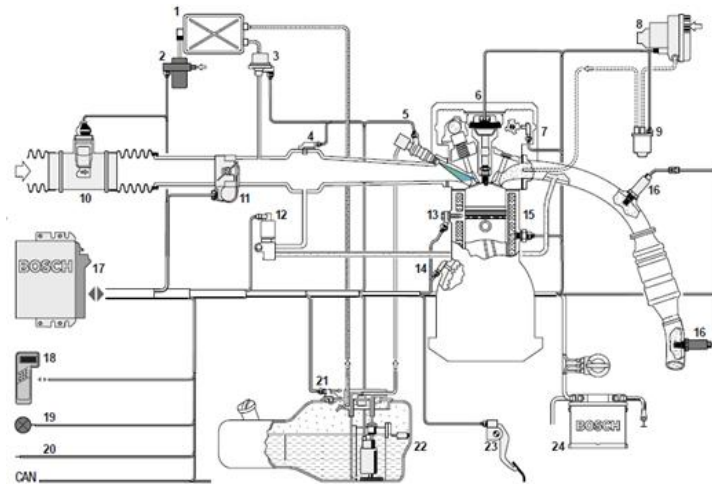


Figura 2.6 – Sistema de gestão eletrônica d motores de combustão interna [3].

Unidade de controlo eletrónico

A unidade de controlo de um motor consiste essencialmente em um microprocessador com vários periféricos internos (Timers, UART, ADC ou PWM) e um conjunto de hardware externo (reguladores de tensão, condicionamento de sinal ou drivers para atuadores). Contem ainda uma memória Flash (não-volátil) onde são armazenados os parâmetros de controlo, assim como uma EEPROM para parâmetros de configuração. Com base no firmware (previamente desenvolvido e programado) e acedendo aos diversos parâmetros e tabelas pré-definidas, vulgarmente denominado de mapas, o microprocessador executa o algoritmo de controlo.

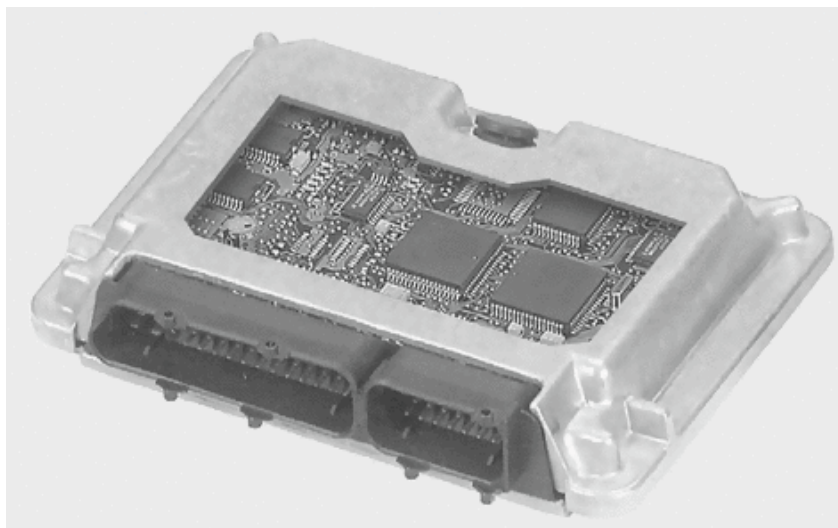


Figura 2.7 – Unidade de controlo eletrónico [7].

Principais sensores

Como foi referido, acima a ECU necessita de um conjunto de sensores para ter feedback daquilo que está a acontecer com o motor, como determinada velocidade, temperatura ou estado de carga pretendido. Com base nisso são apresentados abaixo os sensores mais comuns em motores Otto de injeção indireta com borboleta mecânica e que foram utilizados durante a implementação do projeto.

Sensor de sincronismo (SYNC)

Este sensor, juntamente com o dente instalado na árvore de cames (dependo da configuração das cames), tem como função determinar o momento em que o 1º cilindro está na fase de PMS de ignição. Ou seja em qual “volta” das duas voltas correspondentes a um ciclo do motor, o primeiro cilindro se encontra.

Normalmente é utilizado um sensor do tipo efeito de Hall. Por norma (e no caso de ser do tipo efeito de hall) apresenta uma variação na tensão de saída quando é submetido a um campo magnético variável (provocado pelo passagem do dente). Durante a passagem do dente da árvore de cames, e se estiver alimentado a 5V, o sinal digital vai a 0V (durante o tempo de passagem do dente) retornado posteriormente a 5V, como se pode ver pela figura abaixo.

Sensor de referência (REF)

Este sensor funciona segundo o princípio indutivo sendo que durante a passagem dos dentes da roda dentada (que roda acoplada à cambota), provocando uma variação do campo magnético induz aos seus terminais uma tensão alternada, posteriormente condicionada e transformada num pulso digital. Esta tensão é tanto maior quanto a velocidade de rotação do motor, assim como a proximidade do mesmo à roda dentada.

São constituídos por um núcleo ferroso e à sua volta um enrolamento de cobre. Ao núcleo da bobine é acoplado um íman permanente, que cria um campo eletromagnético. Normalmente a roda dentada é ferromagnética. O campo magnético criado à volta do íman permanente e da bobine estende-se aquando da aproximação de um material ferromagnético induzindo um pulso de tensão

Este tem como função, juntamente com uma roda dentada (por exemplo a configuração de 60 dentes e duas falhas), indicar (ao detetar a falha) que par de cilindros se encontra no ponto morto superior. Medindo o tempo de intervalo entre os seus pulsos (distância entre dentes) é possível calcular qual a rotação do motor.

O sinal proveniente deste sensor juntamente com o sinal do sensor de sincronismo (acima apresentado) permite à ECU saber qual posição exata do motor, realizando assim o processo de sincronização do motor, procedendo ao controlo exato do motor.

Sensor de posição da borboleta (TPS)

Este sensor tem como principal função determinar a posição da borboleta de admissão servindo assim como principal método de medição de carga do motor.

Trata-se de um sensor do tipo resistivo com um princípio de funcionamento idêntico a um potenciômetro, cuja saída em tensão é normalmente linear e diretamente proporcional à variação física do mesmo.

Sensor de medição da pressão de admissão (MAP)

Este sensor tem como principal tarefa a monitorização da pressão absoluta do ar de admissão cujo método de medição funciona por intermédio de um princípio de transdução piezo-resistivo. Servindo assim como principal método de medição da carga do motor ou como compensação para as variações de pressão.

Possui um diafragma interno que é deformado pela depressão sentida no coletor de admissão, comparativamente à interna (que serve de referência). Consoante essa deformação haverá uma alteração do elemento piezo-resistivo que por intermédio do circuito eletrónico interno (ponte *wheatstone*) irá fazer variar a tensão de saída.

Sensor de medição da massa de ar admitido (MAF)

Os medidores de massa de ar recentes, de fio ou filme quente têm como função determinar com precisão qual a massa de ar que é admitida pelo motor em cada instante. Essa informação é posteriormente utilizada no cálculo da quantidade de combustível que é necessário injetar, de modo a manter a mistura ar-combustível dentro dos parâmetros pretendidos.

A passagem de fluxo do ar é medida com base no processo de arrefecimento do elemento quente (aquecido pela passagem de corrente proveniente do circuito eletrónico interno) medido pelo aquecimento do sensor de temperatura interno. O arrefecimento é diretamente proporcional à quantidade de ar que atravessa o sensor.

Sensor de medição da temperatura do ar admitido (AT) e do motor (ET)

Estes sensores tem como principal função a medição da temperatura do líquido de refrigeração do motor assim como do ar admitido, sendo esse valor posteriormente utilizado como fator de compensação nos diversos mapas de injeção de combustível e avanço de ignição.

Tratam-se de sensores puramente resistivos do tipo NTC e PTC cujo valor nominal varia em função da temperatura medida. Tipicamente, os NTC apresentam uma curva de resistência característica inversa ao aumento da temperatura, são não lineares e possuem gama de medição mais alargada. Por sua vez a resistência dos PTC aumenta em função da diminuição da temperatura. Utilizam-se em série com outra resistência de modo a criarem um divisor de tensão, permitindo assim serem medidos pela ECU.

Sensor Lambda

Este sensor tem como função medir a concentração de oxigénio presente nos gases de escape de forma a ser possível monitorizar o estado da mistura. Com isto é possível uma afinação ideal do motor, ao mesmo tempo que permite tirar conclusões quanto ao estado dos sistemas de injeção e ignição, entre outros.

Existem dois tipos de sensores lambda, o de banda estreita e o de banda larga, sendo que primeiro permite que a ECU apenas saiba se a mistura está rica ou pobre (dois estados) enquanto o segundo permite saber exatamente qual o seu valor, possibilitando uma gama mais alargada de afinação da injeção.

Na figura abaixo é possível observar os dois sinais dos tipos de sensores, em que o sinal de saída da banda larga varia entre dois valores de tensão, 0V (mistura rica) e 1V (mistura pobre). Por sua vez o sensor de banda estreita apresenta uma maior resolução variando o seu sinal entre 0V (muito rico) e 5V (muito pobre).

Sensor de detonação

O funcionamento dos sensores de detonação baseia-se no princípio do efeito piezoelétrico. Trata-se de um microfone instalado nas paredes laterais do bloco do motor, que possui a capacidade de detetar as vibrações produzidas pelo fecho de knock. Na figura abaixo é possível observar o sinal do sensor sem detonação (A) e com deteção de detonação (B). Este sensor é muito útil permitindo que ECU detete este estado indesejado no motor ajustando o avanço de ignição de forma contínua.

Principais atuadores

Aliada à necessidade de sensores a ECU dispõe de diversos atuadores para manter um motor no estado ideal de funcionamento. Com base nisso são apresentados abaixo os atuadores mais comuns em motores Otto de injeção indireta, alguns dos quais utilizados durante a implementação do projeto.

Injetores

A função dos injetores é regular com precisão a quantidade de combustível injetado para o motor. Estes são normalmente caracterizados pelo seu caudal (cm^3/min) assim como a sua impedância, sendo que ambas têm influência tanto no método de calibração do motor como no tipo de controlo eletrónico.

São constituídos por uma válvula solenoide que ao ser excitada (pela passagem da corrente) provoca o levantamento da respetiva agulha iniciando a injeção. O início real da injeção acontece determinado tempo posteriormente ao sinal recebido pela ECU e normalmente é denominado por *dead time* [5].

Existem essencialmente dois tipos de injetor: de alta impedância e de baixa impedância. Em injetores de alta impedância ao ser aplicada uma tensão e dada a sua elevada impedância interna ele mesmo limita a corrente, sendo simplesmente cortada a alimentação assim que tiver sido injetada a quantidade de combustível desejada. Injetores de baixa impedância necessitam de um controlo em corrente para evitar que esta suba para valores que possam causar danos. Este método de controlo denomina-se de *peak and hold* em que após o pico de corrente inicial (para fazer a rápida abertura do injetor) este é sucessivamente ligado e desligado durante o tempo injeção para manter a corrente dentro de um intervalo pré-definido [5].

Bobine de ignição

As bobines de ignição tem como função criar a energia necessária para, que através da vela, se produza uma faísca para iniciar o processo de combustão da mistura de ar-combustível. Atualmente existem dois grande tipo de bobines, nomeadamente as smart coil, cujo sinal de controlo é digital (possui driver de potencia interno) ou saturated coil, cujo controlo obriga a uma grande passagem de corrente pelo driver da ECU. Denton ou Bosch

Enquanto o circuito de controlo (efetuado pela ECU) de encontra fechado, existe corrente a atravessar entre bateria e o circuito do primário que estando enrolado num núcleo de metal ferroso cria um do campo magnético forte. Este ao ser subitamente interrompido pela ECU provoca um colapso no campo magnético induzindo uma tensão elevada no

secundário da bobine que por sua vez fornece uma tensão elevada às velas de ignição que se traduz numa faísca destas ao bloco do motor (conectado à massa). Denton ou Bosch

Atuadores auxiliares

Além dos injetores e bobines existem um conjunto de atuadores que necessitam de ser controlados para o funcionamento dos restantes sistemas auxiliares na gestão de motores. Entre outros, podem ser destacados o controlo da EGR, do turbo do ralenti, bomba de combustível ou o ventilador. Usualmente estes são atuados por meio de servomotores (incluindo o motor de passos) ou electroválvulas, sendo que em ambos os casos é possível a utilização do controlo por largura de pulso (PWM). Para sistemas de controlo discreto e de elevada potência a utilização de reles é o método frequentemente utilizado.

Os servomotores possuem normalmente dois enrolamentos internos que quando ativados criam uma variação no campo magnético que por sua vez permite a rotação do rotor (indução magnética) nos sentidos pretendidos e de forma controlada.

A electroválvula é atuada intermitentemente por intermédio de um PWM, efetuado pela ECU. Ou seja, através do ajuste da percentagem de trabalho (duty-cycle) num período fixo (determinada frequência), pelo fecho do circuito à alimentação ou à massa, conseguimos obter diferentes valores médios de tensão aplicado no atuador. Este valor de tensão média irá corresponder a um determinado campo magnético aplicado na electroválvula correspondente a uma posição.

Algoritmo de controlo

Com o que foi referido acima é com base no firmware previamente desenvolvido e programado que o microcontrolador executa o algoritmo de controlo. Este juntamente com os diversos parâmetros e tabelas pré-definidas, vulgarmente designado de mapas, e que foram contidas com base numa calibração rigorosa permite à ECU executar o controlo do motor com base em diversas estratégias.

Através destes sensores, a unidade de comando determina o estado do motor (ralenti, aceleração, desaceleração), ajustando a quantidade de injeção e avanço de ignição em conformidade. Como compensação aos mapas principais de combustível e ignição podem ser utilizados mapas de compensação em aceleração, como tensão da bateria, temperatura do motor, pressão atmosférica, detonação, entre outros.

Método de cálculo de combustível e ignição

Existem três grandes métodos de cálculo de combustível que podem ser adotado pelas diferentes ECU dependendo do tipo de controlo pretendido, custos ou rigor de implementação, denominado de Alpha-N Speed Density e Mass Flow. Para cada um deste sistemas um ou mais sensor são utilizados como método de cálculo no cálculo de combustível para as diversas cargas e regimes do motor.

Para o caso do método Alpha-N são Utilizados a posição da borboleta de admissão (sensor TPS) e a rotação do motor, como fatores de entrada no mapa método de cálculo de combustível. Teoricamente, se não houvesse variações no motor, sensores, injetores, ou das condições

O método Speed Density utiliza a velocidade de rotação do motor e a pressão no coletor de admissão para calcular o fluxo de ar admitido e conseqüentemente a quantidade de injeção necessária. O mapa de quantidade de injeção é muito maior que o utilizado nos sistemas Alpha-N e tem em conta a eficiência volumétrica, conferindo-lhe por isso maior precisão. Como a densidade do ar varia com temperatura é também utilizado um sensor no coletor de admissão que mede a temperatura do ar de admissão.

Por fim o método Mass Flow utiliza um medidor de massa de ar (MAF) montado na tubagem de admissão que mede diretamente o caudal de ar aspirado pelo motor em cada instante. Inclui também um sensor de temperatura ao que permite efetuar a correção do caudal de acordo com a densidade do ar. Os sistemas MAF têm muito maior capacidade para compensar alterações efetuadas no motor sem necessitarem inúmeras compensações. No entanto o medidor de massa de ar uma vez montado nas tubagens de admissão torna-se uma restrição à passagem do ar, introduzindo uma perda de carga, principalmente em motores que exijam um fluxo de ar muito elevado.

Principais mapas

Ainda que possam existir pequenos mapas de compensação, podem-se considerar o tempo de injeção, avanço de injeção, o avanço de ignição e respetivo *dwell* como os principais mapas de controlo de um motor Otto de injeção indireta. Estes são, juntamente com as variáveis de entrada (valores de sensores) utilizados pela ECU pra calcular os valores de injeção e ignição.

Tempo de injeção

O tempo de injeção ou tempo de abertura do injetor é aquilo que irá definir a quantidade de combustível injetado. Naturalmente o tempo de injeção deverá aumentar proporcionalmente à carga do motor para acompanhar o aumento de ar admitido e manter a relação ar/combustível (figura XX). O tempo de injeção está limitado no seu valor máximo porque idealmente teria de ficar compreendido entre o ponto de início de injeção (avanço) e o fecho das válvulas de admissão.

Durante o aquecimento do motor o tempo de injeção é alargado (mistura enriquecida) para compensar a fraca evaporação do combustível e o efeito “Wall wetting” (quantidade de combustível que fica depositado nas superfícies das condutas frias), e é acompanhado de alimentação de ar secundária diretamente no escape para oxidar hidrocarbonetos livres e aquecer rapidamente o catalisador [7]. Em aceleração o tempo de injeção é ligeiramente alargado para compensar rapidamente o aumento de ar e prevenir mistura pobre em situações transientes. Em desaceleração a injeção pode ser cortada para eliminar o consumo e emissões desnecessários [2].

Avanço de injeção

O avanço de injeção é definido como o ângulo em graus de cambota antes do ponto morto superior em que se inicia a injeção. Para permitir o tempo de injeção necessário deve ser maior quanto maior a carga e o regime do motor. Motores de injeção direta devem ser capazes de funcionar com avanços inferiores para fazer a injeção já durante a fase de compressão [2].

Avanço de ignição

Um dos parâmetros mais importantes na gestão de um motor Otto é o momento em que se dá a ignição. Teoricamente sabe-se que para conseguir o máximo rendimento a pressão no interior do cilindro deve atingir o seu máximo no MBT, aproximadamente 10° depois dos PMS, sendo que deve aumentar com o regime do motor e diminuir com a carga (figura XX).

O tempo que corresponde à propagação da chama varia com o regime do motor, sendo que a elevada velocidade o tempo que a cambota leva a percorrer uma dada distância é muito inferior do que a baixas rotações. A velocidade com que a chama se propaga também não é constante, e varia com fatores como a pressão, a temperatura ou a relação

ar/combustível. Desta forma e para combater todos estes fatores é necessário antecipar o avanço de ignição em conformidade.

Iniciando a combustão muito cedo a pressão vai aumentar quando ainda está a ser feita compressão, funcionando como travão ao motor e aumentando drasticamente a probabilidade de ocorrer detonação, e iniciando muito tarde vai haver desperdício de energia uma vez que não se aproveita todo o curso do pistão para realizar trabalho e vai-se iniciar o escape com ainda muita energia por aproveitar. Enquanto o motor não atinge a temperatura de funcionamento o avanço pode ser retardado para aumentar a temperatura dos gases de escape e promover um aquecimento mais rápido do catalisador [2]. Na figura 1.7 podemos observar o efeito do avanço nas emissões poluentes e consumo.

Tempo de carregamento

Não sendo libertada energia suficiente na faísca ocorrem falhas de ignição ou não há combustão de todo. A energia máxima que está disponível para a faísca corresponde à energia que está armazenada na bobine de ignição, sendo que o seu tempo de carregamento é denominado de dwell. A bobine é carregada milissegundos antes de se dar efetivamente a faísca, o que a regimes mais elevado do motor (menos tempo por grau de motor) o angulo de dwell (início do carregamento) tem de ser antecipado [4]. O dwell deve também ser ajustado de acordo com a tensão da bateria, uma vez que uma tensão inferior resulta em menor corrente e maior tempo de carga (figura 1.8).

Arquitetura de Sistema de Controlo em Malha Aberta ou malha fechada

O controlo por parte da ECU é feito com base no feedback dos vários sensores e portanto ajustado em malha fechada, reajustando a saída em função dos valores de entrada. Normalmente em motores de produção os sistemas de injeção e ignição funcionam em malha fechada (close-loop). Isto consiste no ajuste da saída por parte da ECU, com base nos valores de entrada e em ciclo contínuo. Existem diversos subsistemas de um motor que são calculado em malha fechada, tal como o controlo de combustível, o controlo da detonação ou o próprio ralenti. No entanto em certas situações este tipo funcionamento pode não ser possível, passando a funcionar em malha aberta (open-loop). Um exemplo desta situação pode ser quando um motor se encontra frio, e num estado de enriquecimento, onde o próprio sensor lambda ainda não atingiu a temperatura de funcionamento. Nesta situação o controlo de combustível funciona em malha aberta.

Também em situações de aceleração ou deteção de avarias de sensores, este tipo de controlo em malha fechada pode ser desativado, sendo que são utilizados valores pré-definidos para certas variáveis [4].

Borboleta eletrónica

Nos dias de hoje é comum o uso de um sistema de controlo com borboleta eletrónica (ETC) em detrimento de uma ligação mecânica. Nestes casos, o controlo da própria borboleta é efetuado pela ECU, com base na medição do valor do pedal do acelerador (APPS), que por sua vez traduz qual o pedido de binário por parte do condutor. A atuação da ETC é feita através de um duty-cycle proveniente dos mapas predefinidos na ECU, que utiliza um conjunto de sensores resistivos no corpo da borboleta como método de obter feedback. Por norma tanto os sensores APPS (efeito de hall), como os da borboleta (potenciómetros resistivos) são duplos, para permitir redundância no sistema, devido ao facto de este se tratar de sistema crítico.

Sistema de diagnóstico OBD2

Com o crescente número de sistemas eletrónicos utilizados nos veículos e a necessidade de controlar emissões houve a necessidade por parte dos construtores e das entidades reguladoras em criar uma norma comum, surgindo assim o conceito de “diagnóstico a bordo” (OBD). Em 1988, a Society of Automotive Engineers (SAE) especificou um conector comum para a OBD, denominado de J1962 (figura XX). Este veio permitir realizar diagnóstico aos diferentes sistemas, no sentido de regular e garantir o bom funcionamento dos mesmos não colocando em risco o cumprimento das normas ambientais. Inicialmente estes sistemas tinham protocolos específicos a cada construtor mas que passaram a ser pré-definidos com introdução da OBD. A partir de Janeiro de 1996, entrou em vigor a especificação OBD2, uma evolução da OBD1 com novos requisitos e que ao longo do tempo foi evoluindo estando atualmente na quinta norma implementada. Em 2008 entrou em vigor a ISO 15765-4 (CAN 11-bit e 29-bit) que especifica os requisitos para a utilização do protocolo CAN em sistemas OBD2.

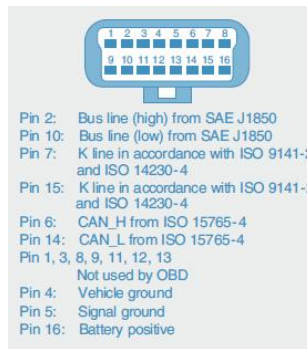


Figura 2.8 – Conetor J1962 e pinos de comunicação [7].

2.3. Controlo Eletrónico Distribuído

Desde cedo, o processamento centralizado deixou de ser suficiente nos veículos automóveis. Este tipo de arquitetura juntamente com o tipo de ligações (ponto-a-ponto) aliadas à crescente introdução de sistemas eletrónicos deixarem de serem possíveis, tanto pela complexidade como pelos custos de produção. Como tal, tornou-se imperativo o desenvolvimento de métodos de controlo descentralizados, assim como os respetivos protocolos de comunicação para permitir a interligação e partilha de informação entre os vários subsistemas implementados.

Hoje em dia um automóvel possui dezenas de microcontroladores espalhados (figura abaixo) cada um deles responsável por uma tarefa específica ou conjunta, estando ligados por um tipo meio físico/protocolo de comunicação. Na figura XX é possível observar a complexidade dos sistemas eletrónicos dos veículos atuais.

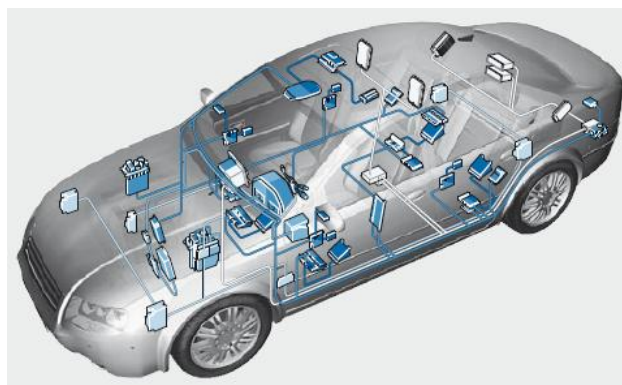


Figura 2.9 – Diferentes sistemas eletrónicos de um veículo automóvel.

Um exemplo pioneiro e hoje em dia obrigatório deste tipo de controlo é o controlo do sistema anti bloqueio de rodas (ABS) e a sua interligação com a ECU do motor, recorrendo ao protocolo CAN (Controller Area Network). Os dois subsistemas agem em conjunto durante uma travagem, em que por exemplo a unidade do ABS envia um pedido à ECU para cortar parte da potência do motor, no sentido de auxiliar na paragem do carro. Outra situação, muito menos crítica, é a partilha da informação da velocidade do veículo para todos as unidades presentes no veículo e que possam utilizar a mesmo para determinado processamento local.

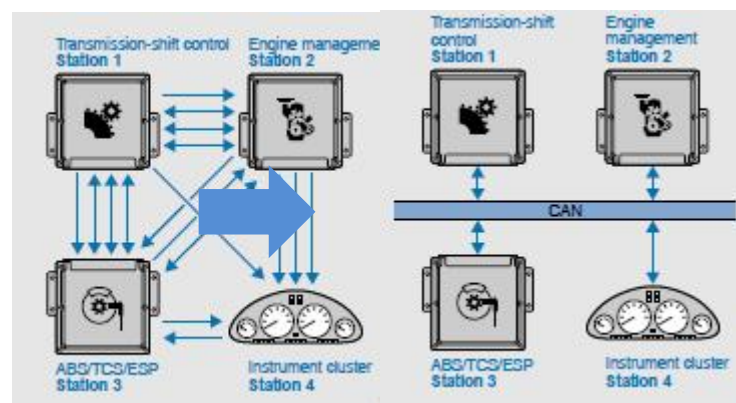


Figura 2.10 – Sistema com comunicação discreta e CAN [4].

Estes sistemas de comunicação podem ser organizados em redes de diferentes configurações dependendo do tipo de escalabilidade, flexibilidade, conjunto de redes sub-redes ou criticidade. Existem barramentos do tipo linear (clássico), estrela, anel, ou híbrido, com ou sem mestre. Dependendo do tipo de aplicação que se tem em uso, existem mensagens que são mais urgentes que outras, obrigando à existência de um esquema de prioridades. Este tipo de gestão de mensagens pode ser provocada por eventos específicos/assíncronos ou ser efetuado de forma sistemática (frequência constante).

Principais características

Para que um sistema de controlo seja considerado distúrbio este tem de possuir mais que uma unidade de controlo, um tipo de meio de comunicação (barramento físico/ protocolo) e um estado de operação de partilha e organização de dados.

Existem no entanto um conjunto de caraterística inerente a este tipo de controlo e que se prendem essencialmente, com a sua estabilidade, a sua segurança, autonomia, fiabilidade e facilidade de expansão. Por norma os sistemas descentralizados são mais facilmente

expansíveis (desde que tenham sido desenvolvido para tal), apresentam maior imunidade à falha assim como um poder de processamento conjunto maior.

No entanto apresentam pontos negativos comparativamente à solução centralizada no que diz respeito à gestão do controlo (todo o firmware está num único microprocessador) simplicidade de implementação (menos partilha) assim como no custo (teoricamente superior). Relativamente à segurança, ambos os sistemas podem ser comprometidos ainda que uma falha num dos subsistemas da arquitetura descentralizada possa ser compensada com deteção do erro e respetiva substituição por valores predefinidos, enquanto na arquitetura centralizada todo o sistema fica danificado.

Protocolos de comunicação

É impossível falar de sistemas de controlo distribuído sem abordar o meio de comunicação entre os mesmos e respetivo protocolo. Normalmente cada tipo de protocolo adaptado ao tipo de sistema que controla, podendo ser escolhido com base na velocidade, complexidade, segurança/fiabilidade ou custo. Abaixo encontra-se a descrição dos protocolos considerados para a implementação deste projeto, nomeadamente CAN, LIN e FlexRay. Devido ao elevado custo e complexidade do Flexray, à baixa largura de banda e topologia master-slave do LIN (Local Interconnect Network), o protocolo CAN foi o escolhido para aplicação na arquitetura distribuída implementada.

Este veio permitir inclusive sistema distribuídos de controlo em tempo real, possibilitando o uso da informação de sensores localizados em diferentes partes do veículo, sem ter de os duplicar, bastando para apenas a partilhar da informação desse sensor no barramento CAN, tornando-a assim disponível para todos os sistemas de controlo.

LIN

O protocolo LIN (*Local Interconnect Network*) foi inicialmente introduzido em 1999 por um consórcio entre vários construtores automóveis tal como a BMW AG, Daimler-Chrysler AG ou Volkswagen AG.

É um protocolo de baixa velocidade e custo reduzido que serve essencialmente como complemento de sub-redes onde o módulo mestre possui acesso a outra rede, normalmente CAN. Isto proporciona o acesso a diversa informação, permitindo que comandos provenientes do barramento CAN sejam transmitidos e executados pelos

módulos escravos (controlados pelo mestre), reduzindo a dimensão e complexidade de cablagens.

No entanto, não pode ser encarado como um substituto para o CAN ou Flexray, onde aplicações críticas de tempo real com necessidade elevado processamento são essenciais. Um exemplo frequente da sua utilização é no comando dos sistemas de vidros elétricos, fechos das portas ou banco ajustáveis.

Principais características

É um protocolo de comunicação com tipologia master-slave baseado no protocolo série e no qual o gerenciamento da rede é efetuado pelo módulo mestre e respetivos módulos escravos (até um máximo de 15).

Os dados são enviados numa mensagem constituída por um cabeçalho (header) e uma resposta (response) sendo que existe um tempo predefinido entre eles para que o nó slave tenha oportunidade para responder (se o tipo de mensagem assim o permitir). Cada conjunto mensagem /resposta é enviada numa frame slot determinada de forma arbitrária pelo nó master.

O tamanho da mensagem de dados (frame) é variável, possuindo normalmente 2, 4 ou 8 bytes.

Possui um conjunto de características técnicas tais como, algoritmo de deteção e correção de erros (mensagem danificada ou módulo defeituoso), auto sincronização (sem a necessidade de ter oscilador interno nos nós slave), utilização de um fio condutor como barramento, velocidade máxima de comunicação de 20Kbit/s (para um comprimento máximo de barramento de 40m) e uma tensão de operação de 12V.

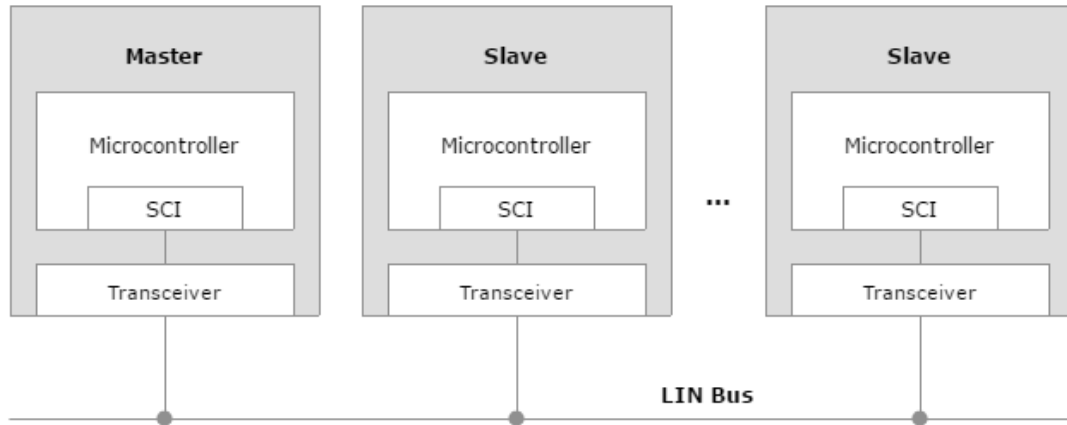


Figura 2.11 – Organização física do LIN.

FlexRay

O FlexRay é um protocolo de comunicação de elevada velocidade cujo início do desenvolvimento se deu em 1999 pela BMW juntamente com a Daimler-Chrysler. Foi criado como um protocolo de comunicação automóvel no sentido de fazer frente aos emergentes e cada vez mais complexos sistemas de controlo de segurança ativa (sistemas críticos e de tempo real).

Estes são vulgarmente designados como sistemas x-by-wire, como steering e o brake-by-wire que são sistemas de direção e travagem em que os componentes mecânicos e/ou hidráulicos de ligação são substituídos por controlo eletrónico descentralizado e de alta velocidade.

O Flexray é ideal para este tipo de sistemas devido às suas características de comunicação time-triggered ou event-triggered, que aliado ao sistema de duplo barramento permite, um controlo de elevada velocidade (até 10Mbit/s), determinístico, tolerante a falhas e de elevada fiabilidade (redundância).

Principais características

O FlexRay utiliza várias ECU's, mas apenas uma comunica de cada vez, havendo assim uma ECU emissora e uma ECU recetora, que comunicam entre si através de um barramento. Permite ter um canal (Single Channel) ou dois canais de transmissão de dados (Dual Channel).

O protocolo FlexRay funciona segundo dois segmentos, o estático e o dinâmico. O primeiro funciona respeitando o princípio Time Division Multiple Access (TDMA), no qual cada nó tem um determinado slot de tempo exclusivo para enviar a sua informação barramento, sendo estes repetidos ciclicamente, para que cada mensagem tenha precisamente o mesmo tempo de acesso ao barramento (método de eliminação da latência de comunicação). O segundo segmento, com características dinâmicas, denominado de Flexible Time Division Multiple Access (FTDMA) usa um mecanismo de arbitragem do tipo minislottting, no qual cada mensagem a ser transmitida por um módulo possui um intervalo de tempo específico.

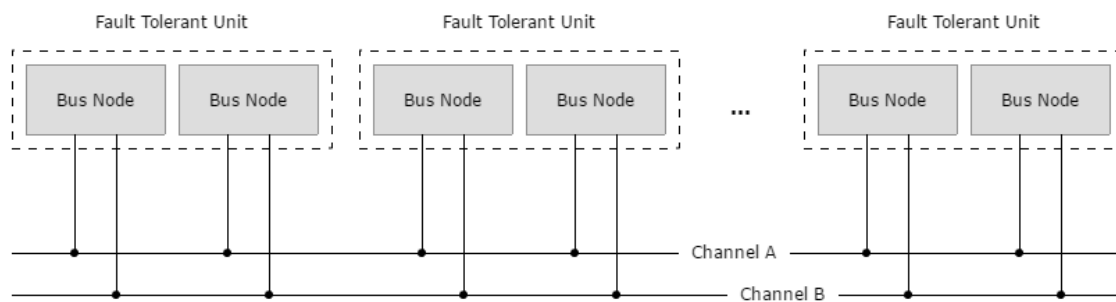


Figura 2.12 – Organização física do Flexray.

CAN

O protocolo CAN (Controller Area Network) foi desenvolvido, em finais dos anos 80 pela Bosch ficando especificado pela norma 2.0A (identificador de 11 bits) e 2.0B (identificador 29 bits). Atualmente encontra-se definido segundo a norma ISO 11898-1 (define o data link layer) e a ISO 11898-2 (physical layer).

Foi desenvolvido como um protocolo de elevada velocidade, imunidade ao ruído e tipologia multi-master com o intuito de tornar os sistemas de processamento distribuído (e respetivas funções de controlo) uma realidade. Estas necessidades eram cada vez mais difíceis de implementar recorrendo aos sistemas centralizados. Ainda que tenha sido desenvolvido especificamente para a indústria automóvel, a sua vasta aplicabilidade veio melhorar a capacidade funcional dos métodos de controlo aplicados, diminuindo simultaneamente o peso e complexidade das cablagens/sistemas em diferentes áreas como a industrial, aeronáutica ou médica.

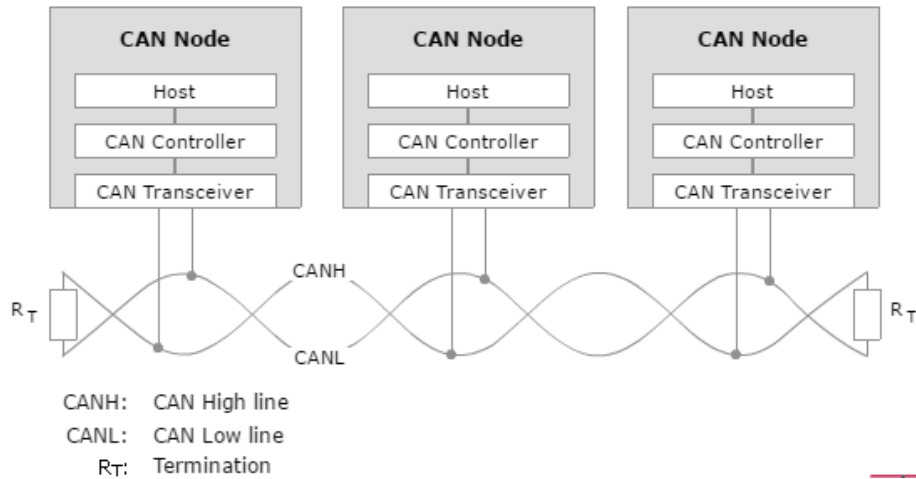


Figura 2.13 – Barramento CAN.

Principais características

Funciona segundo a tipologia multi-master com prioridade de mensagens, no qual cada módulo pode transmitir uma mensagem, que fica acessível aos demais, em que a prioridade da mesma é tanto maior quando mais pequeno o seu identificador (ID). Apesar de esta mensagem ficar disponível aos vários módulos presentes no barramento estes só a aceitarão se algum dos seus filtros internos assim o permitirem. Apresenta uma capacidade de transmissão (baud-rate) de 1Mbit/s para um máximo de 40m de barramento assim como um máximo exequível de 116 no barramento. Como meio físico de transmissão de dados são utilizados um par de condutores entrelaçados (frequência do entrelaçado pode variar), que juntamente com o diferencial de tensão aos mesmos e mecanismos por hardware de deteção de erros apresenta uma grande capacidade de imunidade ao ruído eletromagnético (figura XX).

A característica deteção de colisões, CSMA, permite que o módulo a transmitir efetue uma verificação e monitorização do barramento esperando que este esteja livre para poder comunicar. Isto juntamente com a capacidade de “Multiple Access” (MA) permite que todos os módulos tenham a mesma possibilidade de transmitir uma mensagem quando detetam inatividade no barramento. Se por ventura houver uma colisão de duas ou mais mensagens cada módulo vai proceder ou abortar com a transmissão dependendo da sua prioridade, que se define pela comparação dos bits do ID até que um ganhe prioridade sobre o outro. O barramento usa o conceito de non return to zero (NRZ) e utiliza bit-stuffing. Se um dos módulos ligados ao barramento estiver a forçar um bit dominante (0) o barramento ficará no estado lógico 0, independentemente dos nós que estiverem a tentar transmitir um bit

recessivo (1). O uso de bit-stuffing provem da necessidade de ser mantida uma sincronização do barramento. Quando um emissor envia cinco bits do mesmo tipo (dominantes ou recessivos) este insere automaticamente um bit complementar (que é removido pelo recetor) a fim de provocar variação do nível lógico do barramento para que outros módulos possam realizar o processo de sincronização.

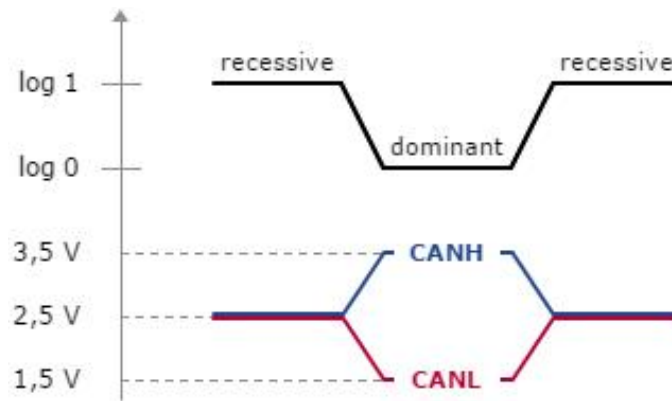


Figura 2.14 - Níveis de tensão da comunicação CAN.

Processo de arbitragem

O processo de arbitragem que define qual dos módulos a transmitir ganha o acesso ao barramento denomina-se de bitwise arbitration (BA). Esta é talvez a principal característica deste tipo de comunicação, tendo relevo ao nível da largura de banda e baixa latência do sistema. Qualquer módulo CAN pode iniciar a transmissão quando deteta inatividade no barramento principal, podendo ver a sua transmissão interrompida dependendo da prioridade de outro módulo que também tenham iniciado a transmissão. Cada um dos bits do ID dos módulos a transmitir irá ser monitorizado pelos próprios e aquele que for dominante (0), sobrepõem-se ao recessivo (que deixa de transmitir enquanto o dominante continua a sua transmissão). Os módulos que perderam acesso ao barramento voltam a retransmitir a mensagem anterior assim que voltarem a detetar inatividade.

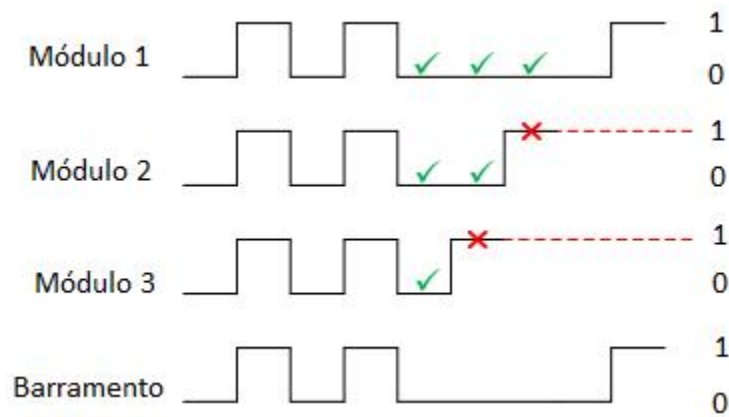


Figura 2.15 – Processo de arbitragem do protocolo CAN.

Mensagens CAN

Como se pode ver pela figura abaixo uma mensagem CAN (data frame) é composta pelo Arbitration Field, Control Field, Data Field, CRC Field e Acknowledgement Field.

O Arbitration Field define os parâmetros de identificação da mensagem e respetiva arbitragem, e o Control Field incorpora os dados de controlo nomeadamente com a indicação de mensagem standard ou extended. Por sua vez o Data Field contém os dados de informação enviados e o CRC Field corresponde ao campo de deteção de erros. Existe ainda Acknowledgement Field que indica a receção de mensagem e os bits que marcam o início da frame CAN (stat of frame e end of frame).

Cada mensagem CAN utiliza o próprio ID, definido pelo programador, sendo que cada módulo pode enviar diferentes ID. O identificador de cada mensagem pode ser de dois tipos, standard (CAN 2.0A) ou extended (CAN 2.0B), contendo um identificador de 11 bits e 29 bits respetivamente. Esta diferença reside no bit denominado de IDE, que é colocado como dominante (0) no caso de uma mensagem de identificador de 11 bits, e como recessivo (1), no caso de uma mensagem de identificador de 29 bits (composto por 11 bits standard mais 18 bits que funcionam com uma extensão).

O conteúdo da mensagem pode variar entre 0 e 8 bytes (data field) sendo previamente identificado no campo data length (DLC). O campo CRC Field contém 15 bits de verificação que são usados para deteção de erros nas mensagens, ao passo que o Acknowledgement Field indica ao módulo transmissor se algum nó recebeu ou não a mensagem transmitida.

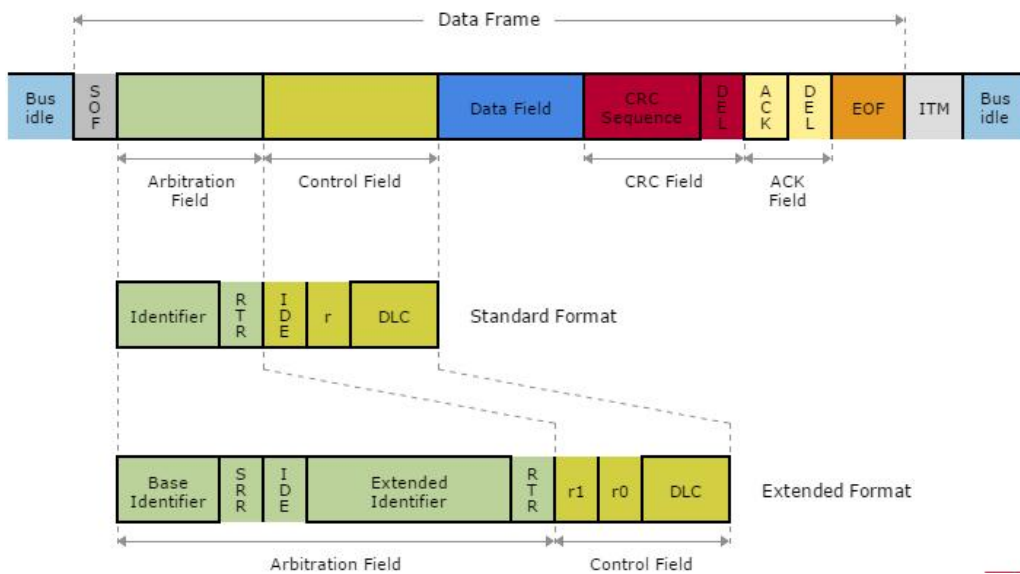


Figura 2.16 – Constituição de uma mensagem CAN.

O protocolo disponibiliza quatro tipos de mensagens (frames) que são o Data Frame, Remote Frame, Error Frame e Overload Frame. A Data Frame trata-se do tipo de mensagem mais comum na transmissão de dados CAN e é enviada sempre que determinado módulo quer comunicar de forma normal, sendo constituída pelo ID, pelo DLC e pelo número de bytes de informação.

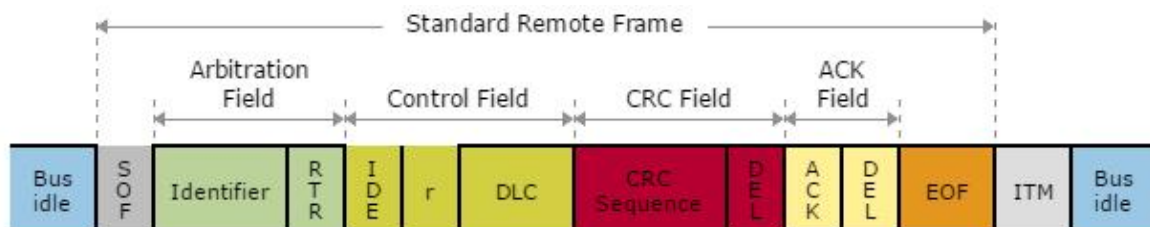


Figura 2.17 – Data Frame com identificador de 11 bits.

A remote frame não possui data field, e apresenta o bit RTR no estado recessivo. Este tipo de mensagem existe quando um determinado módulo quer pedir informação a outro sem para isso ocupar largura de banda da mensagem típica. O módulo que recebe a remote frame vai responder com o mesmo ID e respetivo data field.

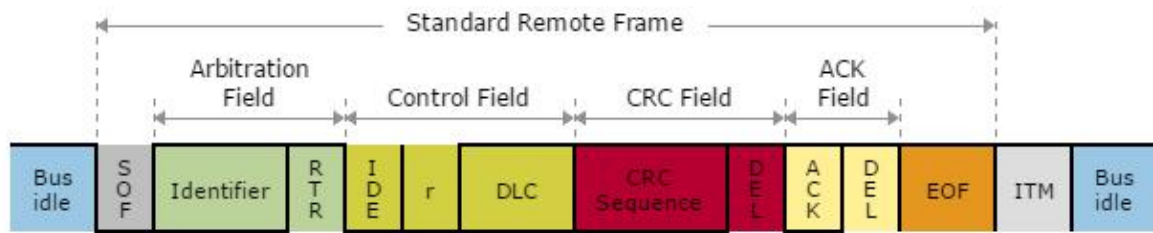


Figura 2.18 – Remote Frame do tipo CAN 2.0A.

Este tipo de mensagem é enviado por um nó quando é detetado um erro no barramento, e é constituído pelo Error Flag (12 bits) e Error Delimiter (8 bits recessivos consecutivos). Quando um módulo deteta uma mensagem errónea (independentemente do motivo) envia a Error Frame para o barramento com a respetiva flag de erro, podendo este ser ativo (primary error) ou passivo (secondary error).



Figura 2.19 – Error Frame.

3. Arquitetura

Neste capítulo apresenta-se a proposta da arquitetura que servirá de gestão eletrónica de motores. Serão abordados os diferentes módulos constituintes da mesma, qual o seu princípio de funcionamento, *hardware* implementado, *firmware* desenvolvido assim como as principais variáveis de controlo.

3.1. Tipologia da Arquitetura

Como se pode ver pela figura abaixo, abaixo apresentada, desenvolveu-se um sistema de gestão eletrónica (EMS) para um motor de combustão interna ciclo Otto (MCI), recorrendo ao conceito de descentralização tanto de *software* como *hardware*. Esta abordagem permitiu o desenvolvimento de uma arquitetura constituída por vários módulos (*multi-node*) de complexidade inferior, interligados entre si por um barramento CAN.

Cada um dos módulos possui um conjunto de tarefas específicas, tal como aquisição de um sensor, controlo de um atuador, ou mesmo processamento/cálculo de valores de combustível. Toda esta informação está disponível no barramento CAN sendo utilizada por qualquer um dos módulos no sentido de executarem, localmente, a sua função na gestão do motor.

A arquitetura desenvolvida possui quatro tipos de módulos diferentes, sendo estes os módulos de aquisição de sensores, controlo de atuadores, processamento/cálculo e o de sincronização do motor. O módulo de aquisição de sensores fica encarregue de adquirir o valor de um determinado sensor e disponibilizar o mesmo no barramento CAN. O módulo de atuadores fica responsável pelo controlo de um determinado atuador com base em informação partilhada no barramento. O módulo de processamento efetua os mais variados cálculos essenciais na gestão do motor, sendo que recebe informação dos módulos de sensores, e envia informações para os módulos responsáveis pelo controlo dos diversos atuadores. Paralelamente este é o módulo que permite a calibração/afinação em tempo real de todo o sistema. Por sua vez, o módulo do motor, é o único que possui tanto sensores como atuadores. Este possui esta configuração devido ao facto de haver a necessidade de

sincronizar, com elevada precisão e baixa latência, o controlo das bobinas e injetores com os sinais proveniente dos sensores de referencia e sincronismo.

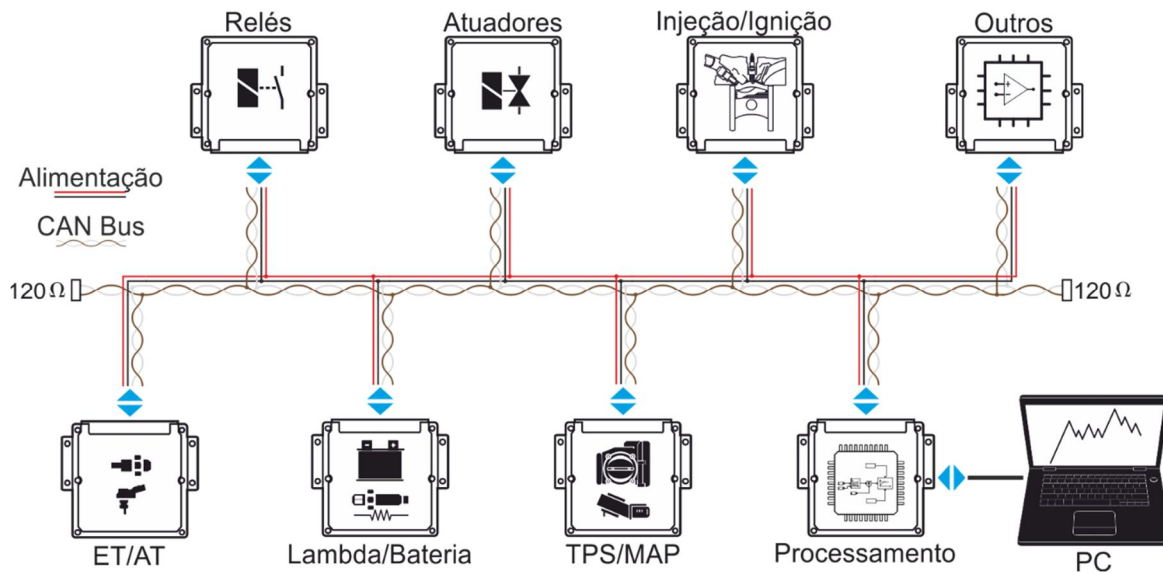


Figura 3.1 - Esquema gráfico do sistema de gestão eletrônica de motor desenvolvido.

3.2. Módulo Sensores

3.2.1. Princípio de Funcionamento

Este tipo de módulo (figura abaixo) tem como função a aquisição dos valores de dois sensores presentes no motor, do seu condicionamento e conversão analógica para digital. Esta informação é posteriormente disponibilizada no barramento CAN, sendo depois utilizada pelos diferentes módulos que tenham influência na gestão do motor através do algoritmo de controlo.

Este módulo está preparado para a aquisição dos mais diversos tipos de sensores analógicos presentes no motor tais como posição da borboleta, temperatura, motor, pressão coletor, dependendo apenas da sua configuração.

É possível efetuar a caracterização da curva de sinal de cada sensor em tempo real, assim como a alterar a frequência de aquisição dos mesmos, o que permite uma grande flexibilidade na escolha do tipo de sensor. Está ainda habilitado a efetuar diagnóstico aos

sensores e respetivas conexões, assim como definir condições de alerta, no sentido de uma possível falha não interferir com a funcionalidade do sistema.

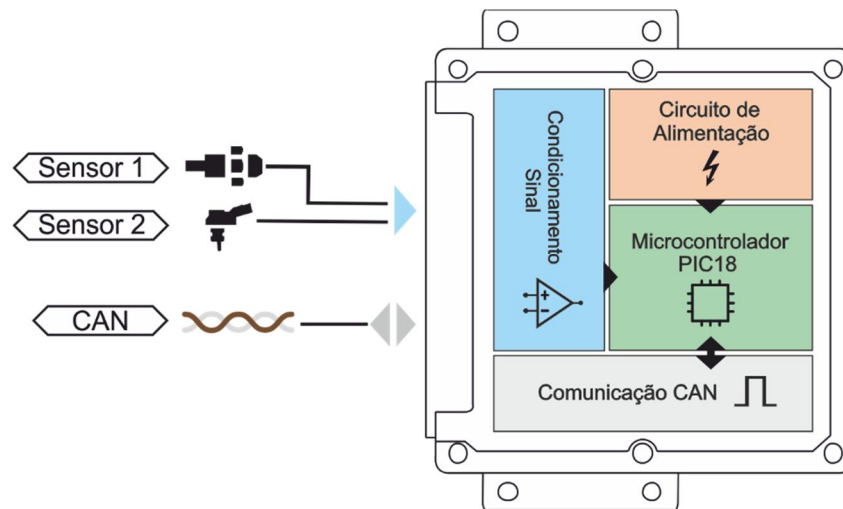


Figura 3.2 - Esquema gráfico do módulo de aquisição de sensores.

3.2.2. Hardware

Na figura cima podemos ver o diagrama de blocos constituinte do respetivo módulo, e que de resto é idêntica aos restantes módulos na organização e simplicidade.

Funcionalmente este módulo organiza-se em quatro partes distintas, sendo elas o circuito de alimentação, o hardware responsável pela aquisição dos diversos tipos de sensores, o conversor (transceiver) CAN e o microcontrolador.

A parte responsável pela alimentação de todo o hardware é constituída essencialmente por um regulador de tensão (LM2940) assim como de condensadores para filtragem de ruído e estabilização da tensão de alimentação. Possui inclusive a capacidade para proteger toda a eletrónica contra inversões de polaridade da tensão alimentação, curto-circuito, e

picos de tensão provenientes do alternador e de todas as fontes de ruído e EMC (cargas elétricas).

Ao nível do condicionamento do sinal, cada entrada analógica possui um filtro ativo passa baixo, que permite aplicar a frequência de corte desejada para determinado tipo de sensor. O facto de utilizar um amplificador operacional (amp-op MCP6442) introduz ao mesmo tempo uma baixa impedância do sinal, não interferindo com a conversão analógica para digital especialmente em sensores tipicamente resistivos. Possui ainda uma resistência pull-up e pull-down, essencial tanto para caracterização e linearização dos sensores de temperatura (NTC) assim como no diagnóstico das ligações dos sensores.

Para permitir integração e comunicação CAN este módulo possui um transceiver CAN (MCP2551) cuja função é converter os sinais digitais, proveniente do microcontrolador, para níveis CAN.

Toda a gestão eletrónica associada a este módulo é gerida internamente pelo microcontrolador, sendo este o elemento mais complexo e importante. Este foi programado recorrendo à linguagem C, tendo sido utilizando o IDE da microchip, MplabX. Este firmware é responsável pela interligação das diferentes subpartes acima descritas.

Trata-se de um microcontrolador de baixo custo desenvolvido pela Microchip, para funções embebidas de baixo consumo energético.

O modelo utilizado para este projeto é o PIC18F26k80. Este modelo é um microcontrolador PIC de 8-bit a operar com uma frequência de relógio de 64 MHz, possuindo 3,6KB de memória RAM e 64KB de memória Flash. Este microcontrolador pode funcionar de 1.8V até 5V, dentro de uma gama de temperaturas entre -40° e 125°.

Ao nível dos periféricos, possui 28 Pinos I/O, ADC de 12-bit, módulo CCP e 5 timers, os protocolos de comunicação UART, SPI, I2C e SPI, assim como um módulo ECAN.

Este microcontrolador possui um conjunto de características essenciais para o desenvolvimento deste tipo de módulo e que foram tidas em contas aquando da sua escolha.

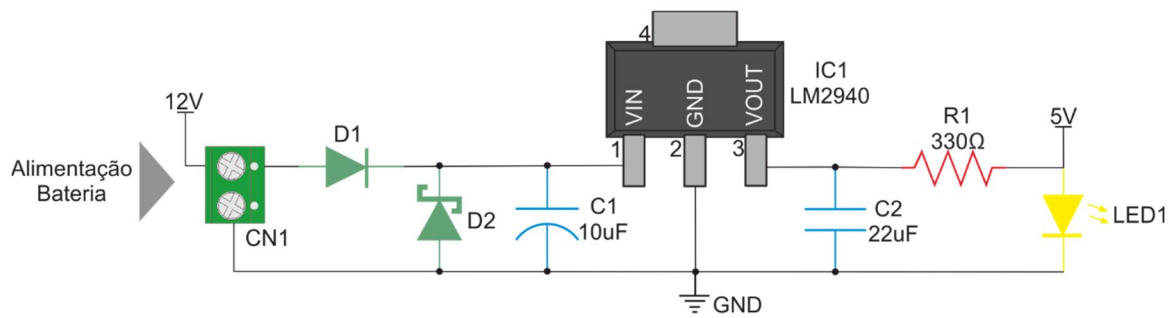


Figura XX – Esquemático do circuito de alimentação/regulação e proteção dos módulos desenvolvidos.

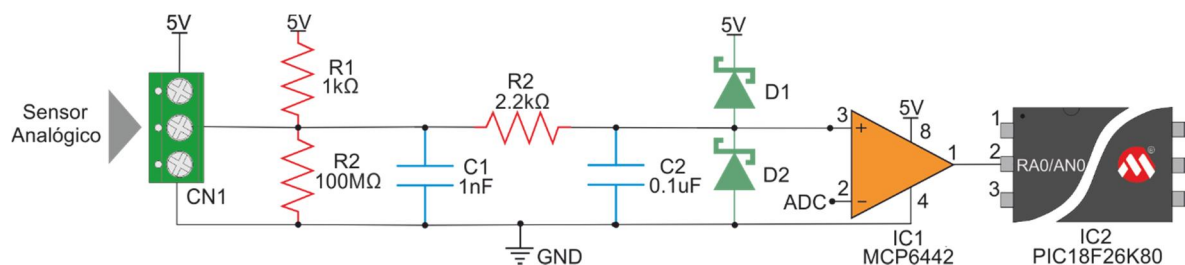


Figura XX – Esquemático do circuito condicionamento de sinal dos sensores adquiridos.

Desenvolvimento de placa de circuito impresso

Na figura abaixo é possível ver a o layout final da placa de circuito impresso, sendo este constituído por dois layers, o top e o bottom layer. Esta característica (dois layers) é de resto comum a todos os módulos eletrónicos desenvolvidos e apresentados posteriormente.

O conceito de arquitetura distribuída possibilitou uma maior simplicidade de hardware e como tal os módulos possuem menor complexidade, dimensões, um menor número de componentes e ligações.

No top layer encontram-se situados o circuito de alimentação (lado esquerdo), o microcontrolador e respetivos componentes (lado direito), sendo que todo o circuito de condicionamento de sinal (lado esquerdo) assim como o transceiver CAN (lado direito) se encontram no bottom layer.

As ligações com o exterior são efetuados por um conector molex. Este possui pinos para alimentação do módulo (12V), assim como alimentação regulada (5V) para conexão com os sensores que necessitem da mesma. Os dois terminais CAN assim como duas entradas analógicas (AN0 e AN1) também estão disponíveis. Também se encontra presente o conector utilizado para programação e depuração do microcontrolador.

Todos os circuitos integrados foram ligados conforme as indicações dos respetivos datasheets, sendo que se teve especial atenção à proximidade dos condensadores de filtragem dos respetivos componentes, e a proximidade do cristal externo do microcontrolador. Houve preocupação separar os circuitos digitais dos analógicos tal como as suas massas.

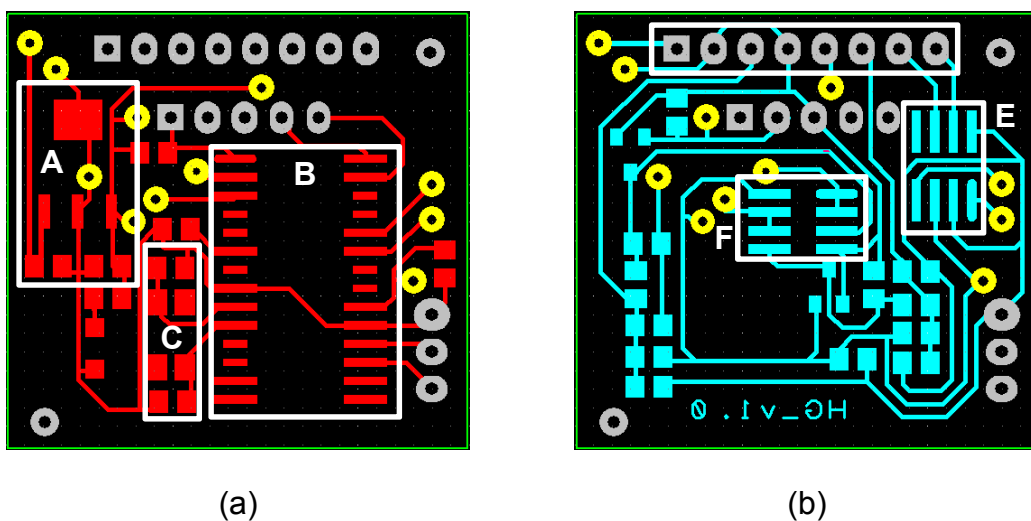


Figura 3.3 - PCB do módulo de aquisição de sensores: (a) top layer e (b) bottom layer.

3.2.3. Firmware

Uma das vantagens deste tipo de arquitetura, e que já foi referida anteriormente, prende-se com o facto do firmware desenvolvido para execução do seu algoritmo interno possuir uma complexidade inferior e por consequência uma probabilidade de erros muito inferior.

Como é possível analisar pelo diagrama de fluxo abaixo apresentado, este módulo executa um conjunto de funções básicas que permitem desde a aquisição do sinal de cada sensor, até à partilha do seu valor no barramento CAN, passando pela calibração e configuração das suas curvas características.

Apos ser alimentado, o microcontrolador executa as configurações internas iniciais, tais como definição da frequência de funcionamento, ajuste do valor dos timers para executar leituras analógicas num intervalo de tempo específico, configuração do ADC, assim como inicialização do módulo ECAN.

Posteriormente, vai ler os valores presentes na EEPROM, para carregar internamente as curvas de caracterização dos sensores, assim como a frequência de leitura dos sensores e o valor dos filtros por software.

Realizada a inicialização e leitura das configurações do algoritmo, o microcontrolador possui um timer que, através de uma interrupção interna, irá provocar a leitura dos sensores a cada intervalo de tempo predefinido. Este converte o seu valor para uma grandeza física associada. Seguidamente envia os valores calculados via CAN a um baud rate de 1Mb/s, tanto em nível de tensão (equivalente ao nível analógico calculado) como da grandeza física associada.

Paralelamente, e durante o *main loop*, é possível que o módulo receba uns comandos via CAN (através de uma flag gerada internamente pelo *buffer CAN*) que permitam alterar qualquer uma destas configurações internas, visando um funcionamento mais apropriado do módulo.

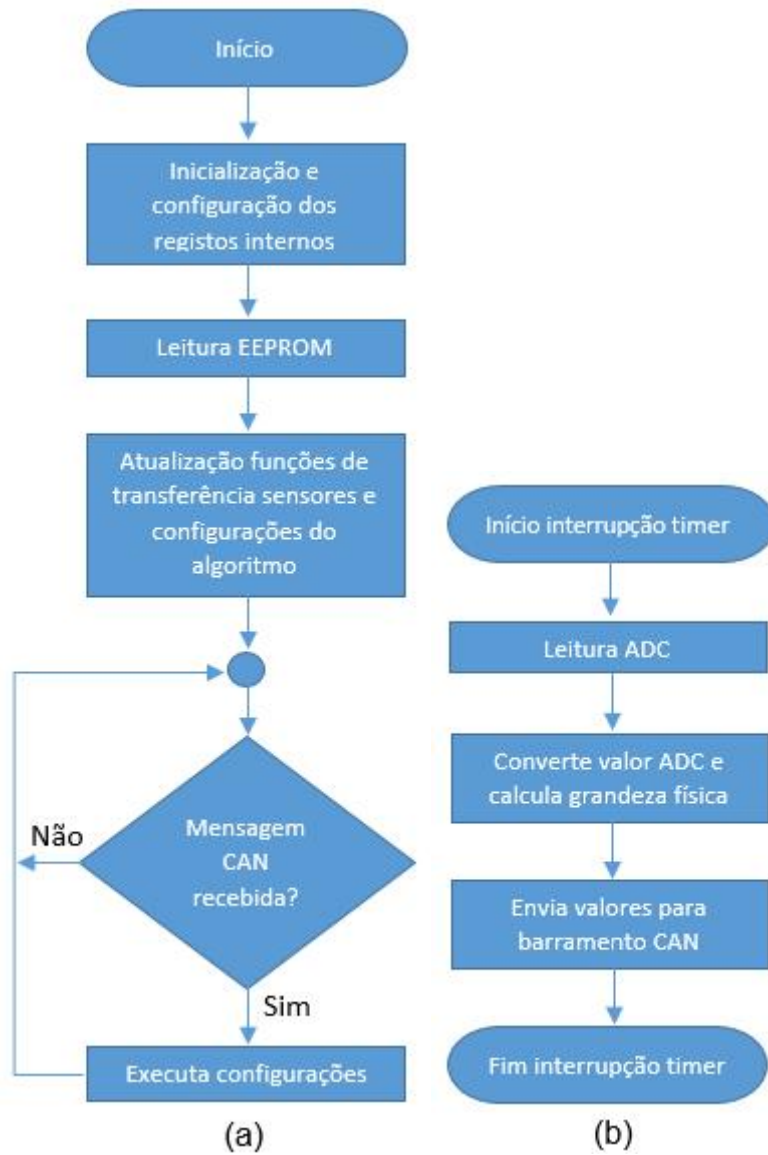


Figura 3.4 - Fluxograma organizacional do módulo de aquisição sensores.

3.3. Módulo Atuadores

3.3.1. Princípio de Funcionamento

Este tipo de módulo (figura abaixo) tem como função o controlo dos atuadores eléctricos presentes no motor, sendo que para tal recebe através do barramento CAN o valor pretendido para o mesmo.

O valor pretendido para determinado atuador pode ser enviado directamente para este módulo via CAN ou pode ser calculado internamente em função de outras variáveis presentes no barramento e que possuam influência na gestão do motor através do algoritmo de controlo.

Este módulo está preparado para o controlo de atuadores do tipo ON-OFF tais como relés, ou então do tipo electroválvula tal como o atuador de ralenti.

É possível definir uma curva de funcionamento para cada atuador em tempo real, possibilitando assim uma grande flexibilidade na estratégia de controlo. Valores como frequência de funcionamento ou duty-cycle desejado, para uma determinada temperatura podem ser configurados.

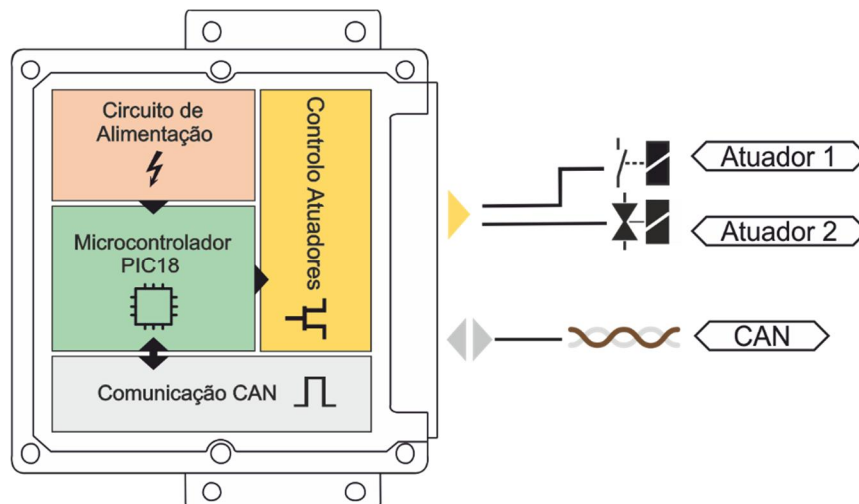


Figura 3.5 - Esquema gráfico do módulo controlo atuadores.

3.3.2. Hardware

Na figura cima podemos ver o diagrama de blocos constituente do respetivo módulo.

Este módulo encontra-se dividido em quatro subpartes, sendo elas o circuito de alimentação, microcontrolador, transceiver CAN e o circuito de controlo de atuadores.

É de referir que a organização deste módulo é idêntica ao módulo de sensores descrito anteriormente, à exceção de que não possui uma subparte de condicionamento de sinais mas sim uma subparte responsável pelo controlo digital de atuadores.

Tanto o circuito de alimentação, o transceiver CAN e o microcontrolador tem uma constituição e funcionamento idêntico ao módulo anterior e por isso já descrito, sendo que no caso do microcontrolador não possui entradas analógica ativas mas si saídas digitais ativas e responsáveis pelo controlo dos atuadores.

Ao nível do controlo circuito de controlo de atuadores, este possui saídas configuradas como digitais responsáveis pela ativação dos atuadores através da sua ligação com a massa, ou seja trata-se de um controlo low-side.

Este circuito low-side é constituído por um optocoupler (ACPL227) juntamente com um mosfet do tipo N (NVD6824). Esta configuração foi escolhida pois permite um controlo dos diferentes atuadores e ao mesmo tempo um isolamento ótico entre a parte digital e de potência do módulo.

A gestão eletrónica associada a este módulo é gerida internamente pelo microcontrolador, descrito anteriormente, sendo este o elemento mais complexo e importante.

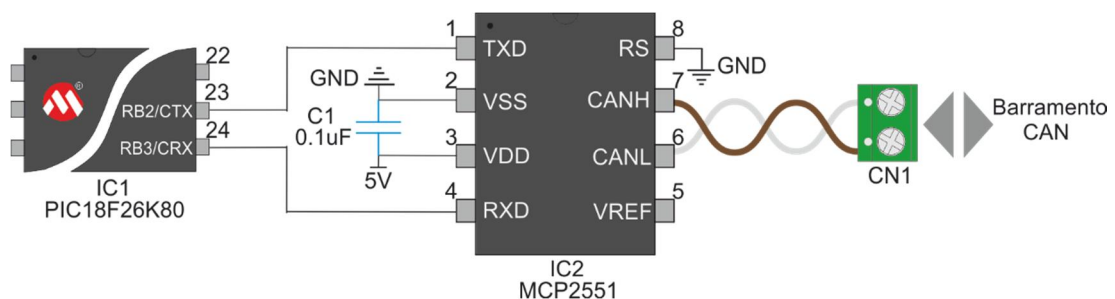


Figura 3.6 - Esquemático das ligações do transceiver CAN aplicado nos módulos desenvolvidos que utilizam o PIC18F.

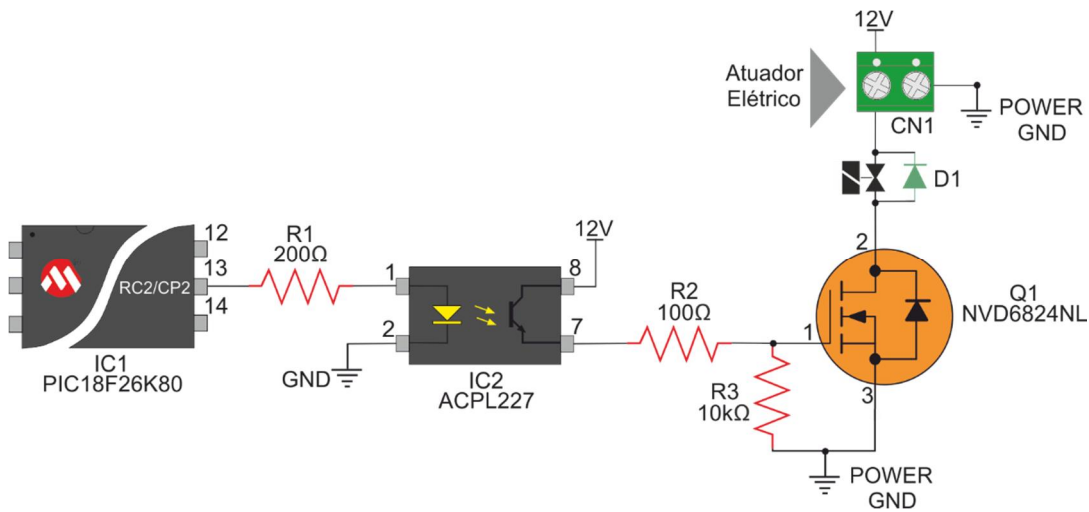


Figura 3.7 - Esquemático do hardware desenvolvido para o controlo dos diferentes atuadores conectados ao módulo de atuadores.

Desenvolvimento de placa de circuito impresso

Na figura abaixo é possível ver a o layout final da placa de circuito impresso do módulo de atuadores, sendo esta também constituída por dois layers.

O conceito de modularidade permitiu aproveitar o top layer e parte do bottom layer do módulo de sensores, tendo sido substituído o circuito de condicionamento por um circuito de controlo de atuadores.

Tal como no modulo anterior, situam-se no top layer o circuito de alimentação (lado esquerdo), o microcontrolador e respetivos componentes (lado direito), sendo que todo o circuito de controlo (lado esquerdo) assim como o transceiver CAN (lado direito) se encontram no bottom layer.

Também as ligações com o exterior são efetuados por um conector molex. Este possui pinos para alimentação do módulo (12V). Os dois terminais CAN assim como duas entradas de potência para os atuadores (CCP1 e CCP2) também estão disponíveis.

Além das mesmas considerações técnicas relacionadas com posicionamento e organização, neste caso houve a necessidade de aumentar as pistas por onde circulam as correntes mais elevadas associadas aos atuadores.

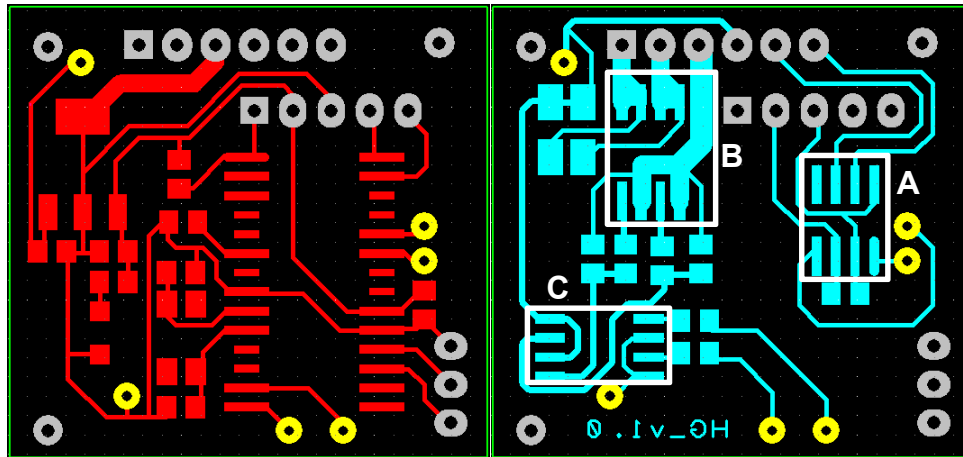


Figura 3.8 - Top layer (esquerda) e bottom layer (direita) da PCB do módulo controle de atuadores.

3.3.3. Firmware

O firmware desenvolvido para este módulo encontra-se apresentado no fluxograma abaixo. Este módulo executa um conjunto de funções básicas, que permitem desde a recepção do valor desejado para cada atuador, controle dos mesmos, passando pela calibração e configuração das suas curvas de funcionamento.

Tal como no módulo de sensores, acima descrito, o microcontrolador executa um conjunto de configurações internas iniciais. Configurações tais como definição da frequência de funcionamento, ajuste do valor dos timers para executar intervalos de tempo específicos, configuração do módulo CCP assim como iniciar o módulo ECAN.

Posteriormente, vai ler os valores presente na EEPROM, para carregar internamente as diferentes curvas de controle dos atuadores, frequências de controle dos mesmos, ou o seu estado inicial. Realizada a inicialização e leitura das configurações do algoritmo, um timer irá provocar o controle dos atuadores a cada intervalo de tempo predefinido, com base nos valores recebidos via CAN. Também envia um conjunto de informação via CAN a um baud rate de 1Mb/s que serve essencialmente como um acknowledge da recepção de mensagens permitindo também algum tipo de diagnóstico por software.

Ao mesmo tempo é possível durante o funcionamento do módulo que este receba um comando via CAN que permitam alterar qualquer uma destas configurações internas, visando um funcionamento mais apropriado do módulo.

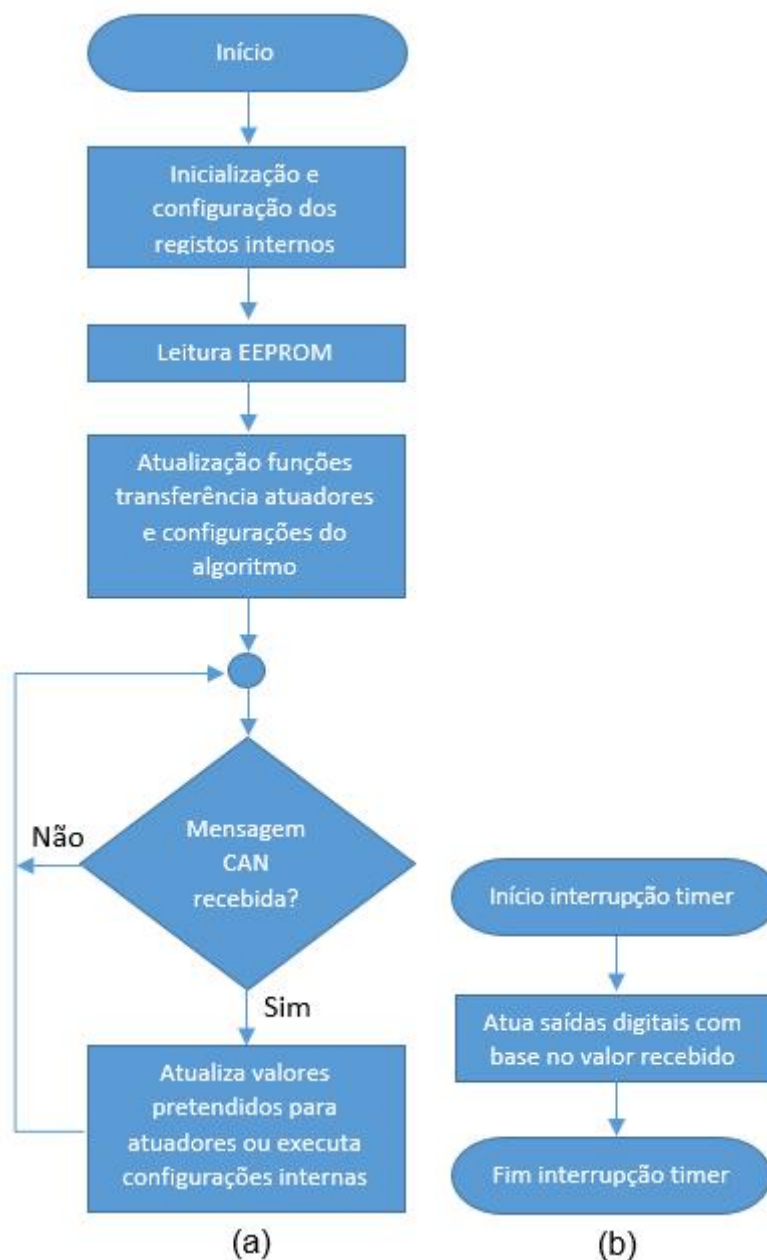


Figura 3.9 - Fluxograma organizacional do módulo de controlo de atuadores.

3.4. Módulo Cálculo

3.4.1. Princípio de Funcionamento

Este módulo é o principal responsável pela gestão do algoritmo de controlo da arquitetura desenvolvida. Recebe os diferentes valores provenientes dos sensores tais como carga, rotação ou temperatura do motor e calcula qual o valor necessário de combustível e ignição essenciais para o funcionamento do motor.

Os valores dos diferentes sensores são recebidos via CAN e são utilizados nas diferentes tabelas de controlo/calibração no sentido de calcular a quantidade de combustível a ser injetado assim como o valor de avanço de ignição. Esses valores são posteriormente enviados por CAN e serão utilizados pelo módulo responsável pelo controlo dos injetores e bobines de ignição.

Serve também como interlocutor entre o computador e o programador do sistema através de uma ligação USB.

As diferentes tabelas de calibração do motor estão gravadas na memória não volátil (EEPROM 25AA512) deste módulo e podem ser alteradas em tempo real, através do software presente no computador. Esta característica oferece grande flexibilidade de configurações do sistema, permitindo alterar entre diferentes calibração do motor, assim como visualizar os diferentes valores de sensores, atuadores e cálculos internos.

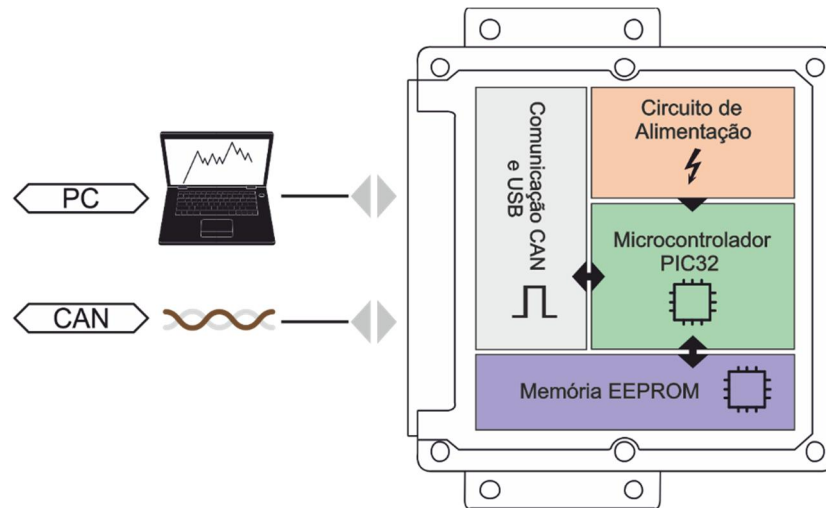


Figura 3.10 - Esquema gráfico do módulo de cálculo.

3.4.2. Hardware

Como é possível verificar pelo diagrama acima descrito, este módulo é do mais simples do ponto de vista do hardware.

Tal como os restantes módulos, este organiza-se em quatro partes distintas, sendo elas o circuito de alimentação, o armazenamento de dados, o conversor CAN e o microcontrolador.

Ao nível de hardware este módulo baseia-se na placa de desenvolvimento Chipkit Max32 criada pela Digilent. Aliada a esta foi desenvolvido um shield com a restante eletrónica necessária para a execução das funções pretendidas.

Apesar de a placa possuir um circuito de regulação de tensão bastante flexível foi adicionado um conjunto de hardware necessário para que esta fosse capaz de atuar num ambiente eletricamente ruidoso.

Foram adicionados condensadores para filtrar o ruído e garantir uma estabilização da tensão de alimentação, assim como díodos com o intuito de proteger a eletrónica contra inversões de polaridade da alimentação, curto-circuito ou picos de tensão.

Tal como nos módulos anteriores, a comunicação CAN é realizada através da inclusão de um transceiver para a interação com os restantes módulos. A comunicação série é

efetuada por um conversor FTDI incorporado na placa, que converte o protocolo UART em USB.

É utilizada uma EEPROM de 256KByte de memória que tem como objetivo armazenar os diversos mapas e configuração de todo o sistema de gestão eletrónica do motor.

O microcontrolador utilizado pertence á família de microcontroladores de baixo custo da Microchip, ideais para o desenvolvimento de sistema embebidos que necessitem de elevado poder de computação

O modelo utilizado para este projeto é o PIC32MX795F512L. Este modelo é um microcontrolador PIC de 32-bit a operar com uma frequência de relógio de 80 MHz, possuindo 128KB de memória RAM e 512KB de memória Flash. Este microcontrolador pode funcionar de 2.3V até 3.6V, dentro de uma gama de temperaturas entre -40° e 105°. Sendo um microcontrolador de elevada performance possui um conjunto elevado de periféricos dos quais se realçam o ADC de 10-bit, módulo CCP, cinco timers, assim como os protocolos de comunicação UART, SPI, I2C e SPI. Possui ainda dois controladores CAN e oito canais DMA.

Este microcontrolador possui um conjunto de características essenciais para o desenvolvimento do módulo e que foram tidas em conta aquando da sua escolha, assim como o facto de estar incluído numa placa de desenvolvimento que acelera bastante o design/desenvolvimento.

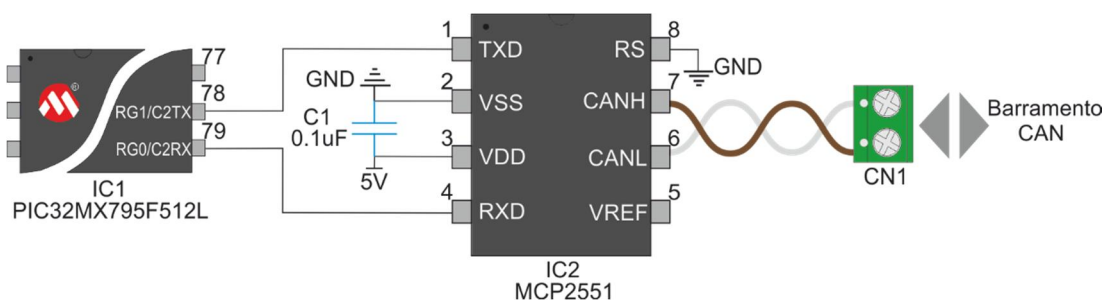


Figura 3.11 - Esquémático das ligações do transceiver CAN aplicado nos módulos desenvolvidos que utilizam o PIC32MX.

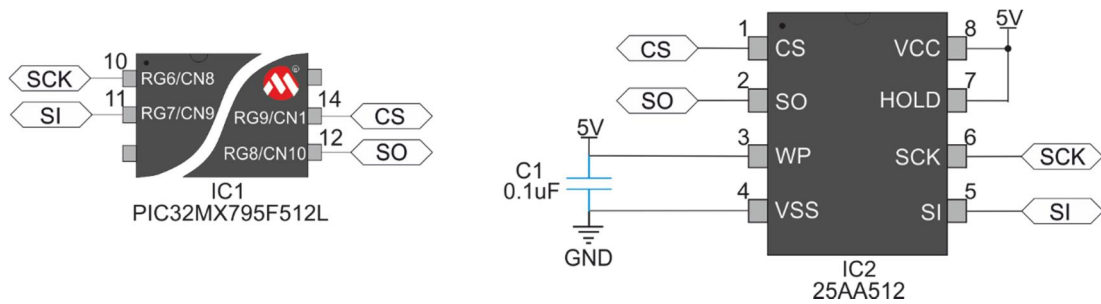


Figura 3.12 - Esquemático das ligações da EEPROM 25AA512, utilizada no módulo de cálculo como *backup* de todos os dados do sistema.

Desenvolvimento de placa de circuito impresso

Como se pode ver pela figura abaixo, este módulo possui grande simplicidade de hardware. Foi apenas desenvolvido um shield que encaixa diretamente no microcontrolador PIC32, utilizado na plataforma de desenvolvimento Chipkit Max32. Este shield possui headers que encaixam nos headers do chipkit, que por sua vez estão conectados ao microcontrolador.

Na figura XX é possível ver a o layout final da placa de circuito impresso do módulo de cálculo. Neste caso os componentes, EEPROM e transceiver CAN, foram posicionados no top layer tendo sido o bottom utilizado apenas para conexões. Estes conectam às portas SPI2A e CAN2 do microcontrolador respectivamente.

O conector molex de 4 pinos permite a alimentação do módulo assim como a comunicação CAN. A comunicação USB é efetuado pelo conector mini-usb intrínseco ao Chipkit Max32 (UART0).



Figura 3.13 - Placa de desenvolvimento Chipkit Max32.

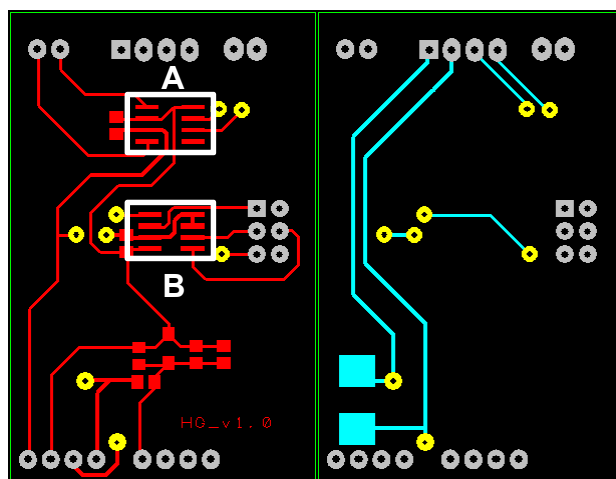


Figura 3.14 - Top layer (esquerda) e bottom layer (direita) da PCB do módulo de cálculo.

3.4.1. Firmware

Como é possível analisar pelo diagrama de fluxo abaixo apresentado, este módulo executa um conjunto de funções, tais como a recepção dos valores dos diferentes sensores, execução de todo o algoritmo de controlo, cálculo de valores para os diferentes atuadores, até à partilha dos seu valores no barramento CAN. Ao mesmo tempo permite a configuração e calibração do sistema via USB. Tal como nos módulos, acima apresentados, o microcontrolador executa um conjunto de configurações internas iniciais. Configurações tais como definição da frequência de funcionamento, ajuste do valor dos timers para executar intervalos de tempo específicos, UART e SPI, assim como iniciar o módulo ECAN.

Posteriormente, vai ler os valores presente na EEPROM, carregando as diversas tabelas 1D e 2D totalmente programáveis. Realizada a inicialização e leitura das configurações do algoritmo, um timer irá permitir o cálculo dos algoritmos a cada intervalo de tempo predefinido (compensações), com base nos valores recebidos via CAN. Outro timer ficará responsável pela frequência de atualização da informação enviada via CAN a um baud rate de 1Mb/s e que define as condições de funcionamento de todo o sistema. O valor de combustível a injetar assim como o avanço de ignição necessário são computados a uma determinada frequência, de forma dessincronizada com a posição do motor. A atualização dos cálculos depende da frequência de recepção das variáveis que constituem o próprio cálculo. Por exemplo tanto a velocidade e carga do motor são computadas com maior frequência que o valor da temperatura do motor.

Durante a execução do main loop principal este módulo também envia e recebe informação via USB. A recepção de caracteres via USB é realizada através de uma interrupção interna, sendo que envio acontece de forma assíncrona no mesmo intervalo de tempo do timer que controla o envio via CAN. A informação enviada ou recebida via USB permite a interação entre o programador e o sistema, através do software desenvolvido em Labview.

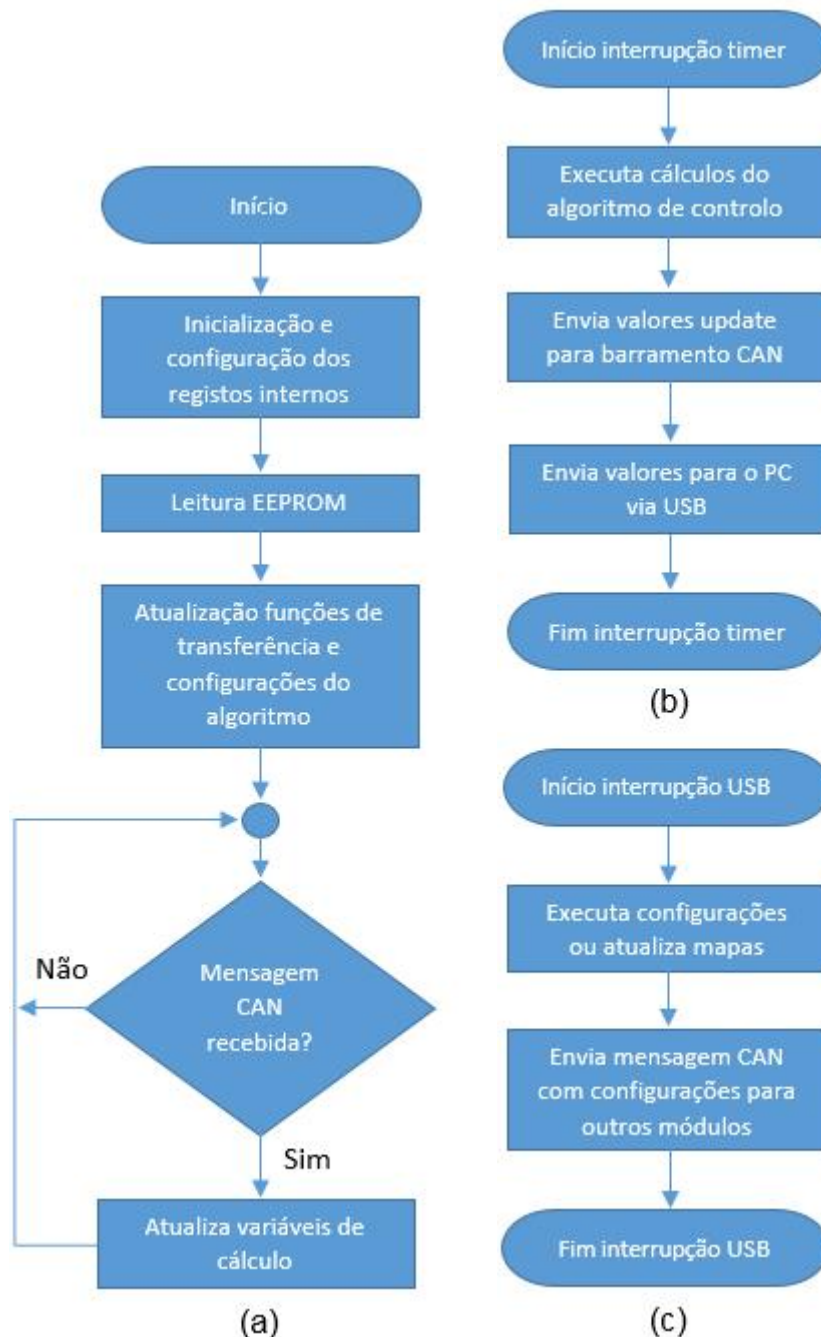


Figura 3.15 - Fluxograma organizacional do módulo de cálculo

3.5. Módulo Motor

3.5.1. Princípio de Funcionamento

Este tipo de módulo tem como função a aquisição dos sinais dos sensores de referência e sincronismo, essências no controlo do motor, do seu condicionamento e conversão analógica para digital. Estes dois sensores permitem calcular a rotação do motor assim como a posição do mesmo, possibilitando a sincronização mecânica do motor com o controlado dos injetores e bobinas, através da menor latência possível. Por sua vez também está encarregue de controlar os injetores e bobinas de ignição.

Esta informação é posteriormente disponibilizada no barramento CAN, sendo depois utilizada pelo módulo de cálculo na computação dos valores de combustível e avanço de ignição (dependentes do valor da RPM), assim como na restante gestão do motor.

Este módulo está preparado para a aquisição dos mais diversos tipos de sensores presentes em motores tais como de efeito de hall, ótico e indutivo, dependendo apenas da sua configuração. É possível efetuar a caracterização dos filtros antirruído em tempo real possibilitando adaptar o tipo sensor e roda dentada, assim como realizar diagnóstico. Esta característica aumenta a robustez no sincronismo e controlo do motor.

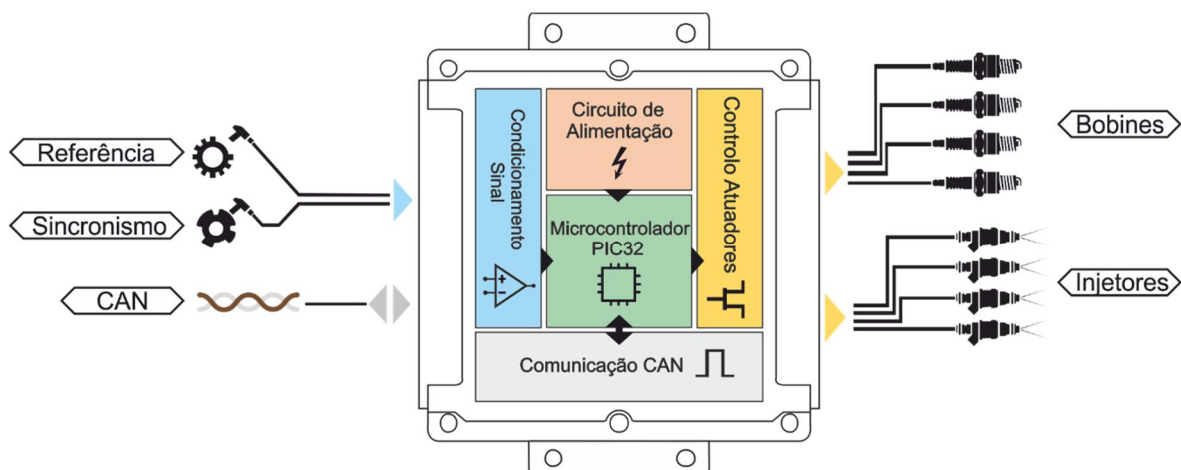


Figura 3.16 - Esquema gráfico do módulo do motor.

3.5.2. Hardware

É possível verificar pela figura acima que este módulo é o único que possui tanto sensores como atuadores, devido à necessidade de sincronizar os atuadores e motor com a menor latência possível. É de referir que também este módulo assenta na placa de desenvolvimento Chipkit Max32 para o qual foi desenvolvido um shield com o restante hardware necessário para a execução das funções pretendidas.

Este módulo encontra-se dividido em cinco subpartes, sendo elas o circuito de alimentação, circuito de condicionamento de sinais, circuito de controlo de atuadores, microcontrolador e transceiver CAN.

Tal como no módulo de cálculo foi adicionado ao circuito de alimentação um conjunto de condensadores para garantir uma estabilização da tensão de alimentação, assim como díodos com o intuito de proteger a eletrónica contra inversões de polaridade da alimentação, curto-circuito ou picos de tensão.

O condicionamento do sinal deste módulo baseia-se num circuito integrado, LM1815, desenvolvido especificamente para aquisição de sensores indutivos, convertendo o tipo de onda típica deste sensores num sinal digital. Possui inclusive uma resistência pull-up que pode ser configurada no caso de ser necessário a utilização de sensores do tipo coletor aberto (efeito de hall). As entradas associadas à aquisição deste sensor estão configuradas como digital possuindo ainda um filtro passivo passa baixo, que permite aplicar a frequência de corte desejada para determinado tipo de sensor.

Ao nível do controlo circuito de controlo de atuadores, este possui saídas configuradas como digitais responsáveis pelo controlo dos atuadores através da sua ligação com a massa, ou seja, controlo *low-side*

Este circuito low-side é constituído por um optocoupler (ACPL227) juntamente com um mosfet do tipo N (injetores), ou IGBT (NGD8201) no caso das bobines de ignição. Esta configuração foi escolhida pois permite um controlo dos diferentes atuadores e ao mesmo tempo um isolamento ótico entre a parte digital e de potência do módulo. No caso do driver do injetor foi adicionado um diodo flyback para proteção picos de tensão formados aquando da súbita interrupção do circuito de alimentação do mesmo.

Tal como nos módulos anteriores, a comunicação CAN é realizada através da inclusão de um transceiver para a interação com os restantes módulos.

A seleção deste microcontrolador deve-se essencialmente devido à performance que este módulo requer, ao mesmo tempo que permitiu reaproveitar código e hardware.

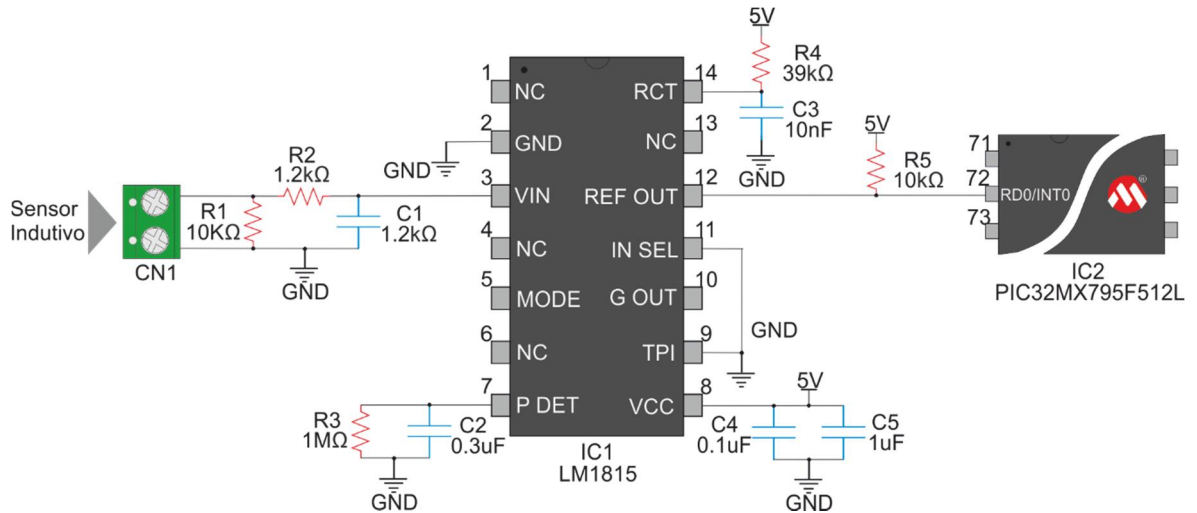


Figura 3.17 - Esquemático do hardware desenvolvido para condicionamento, conversão e filtragem dos sensores de referência e sincronismo.

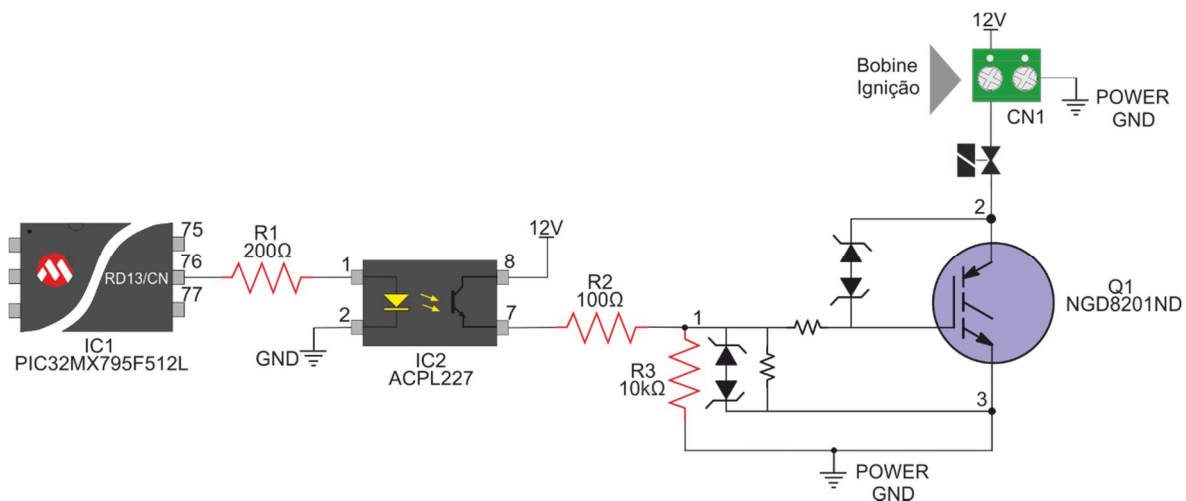


Figura 3.18 - Esquemático do hardware desenvolvido para o controlo das bobines de ignição.

Desenvolvimento de placa de circuito impresso

Na figura abaixo é possível ver a o layout final da placa de circuito impresso do módulo do motor. Este módulo possui maior complexidade pois possui ambos, aquisição de sensores e controlo de atuadores. Neste caso os diversos componentes foram posicionados no top layer tendo sido o bottom layer utilizado apenas para conexões.

No top layer do lado esquerdo encontram-se o circuito integrado, responsável pelo condicionamento do sinal do sensor indutivo e hall, conectado posteriormente aos pinos

INT0 e INT1. Também o transceiver CAN se encontra no lado esquerdo (CAN2). Do lado direito encontram-se os drivers de controlo dos injetores e bobines, 4 mosfets e 2 IGBT respectivamente.

Os circuitos potência foram separados dos circuitos digitais tal como as suas massas, graças ao uso do optocoupler. Tanto os mosfet mas especialmente os IGBT foram escolhidos no package D2PAK para melhor dissipação de calor, além de possuírem uma largura de pista superior.

Foram utilizados conetores do tipo parafuso nas duas extremidades tanto para tentar diminuir a interferência eletromagnética entre sensores e cargas, além de possuírem uma capacidade de corrente superior. Do lado esquerdo ficam os pinos para alimentação do módulo (12V), comunicação CAN e entradas de sensores e alimentação (5V). Do lado esquerdo ficam as conexões para os injetores e bobines.

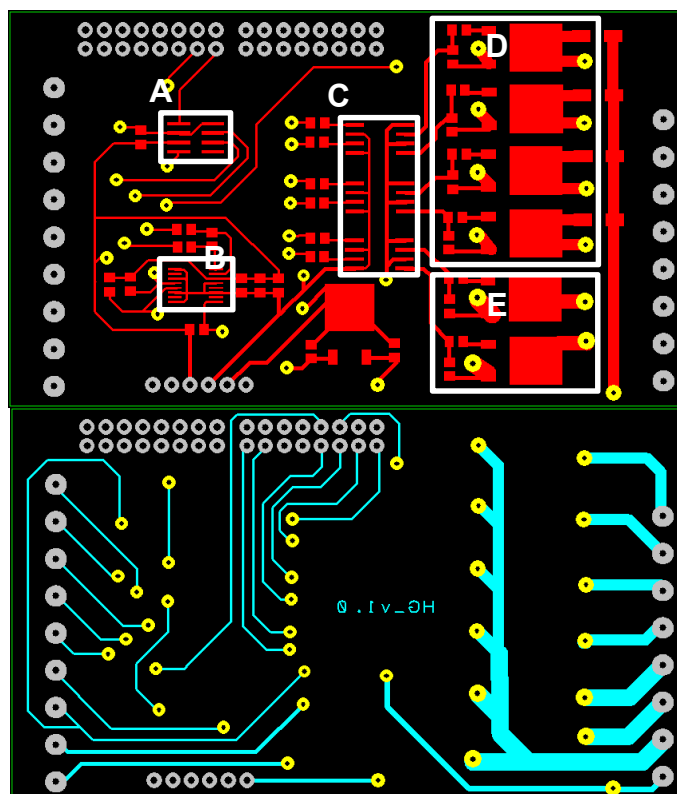


Figura 3.19 - Top layer (cima) e bottom layer (baixo) da PCB do módulo controlo do motor.

3.5.3. Firmware

Abaixo é possível analisar o fluxograma do software deste módulo. Este módulo permite tanto a aquisição de sensores tal como o controlo de atuadores. Após a aquisição dos mesmos permite sincronizar o motor e enviar informações (tal como RPM) via CAN assim como receber os valores de controlo para cada atuador.

Tal como no módulo de atuadores, acima descrito, o microcontrolador executa um conjunto de configurações internas iniciais. Configurações tais como definição da frequência de funcionamento, ajuste do valor dos timers para executar intervalos de tempo específicos, configuração do módulo CCP, interrupções externas, assim como inicialização do módulo ECAN. Com não possui EEPROM este módulo recebe um conjunto de informações necessárias a cada inicialização por parte do módulo de cálculo.

Realizada a inicialização e leitura das configurações do algoritmo, o microcontrolador vai, através das interrupções geradas pelos sinais de referência e sincronismo (em caso de movimento), detetar se existe rotação. Depois de detetado o sinal de sincronismo (INT1) o microcontrolador vai tentar encontrar a falha na roda dentada gerada pelo sensor de referência (INT0), sendo que em caso de sucesso vai permitir sincronizar o motor.

A partir do sincronismo do motor, a cada pulso proveniente de cada dente, presente na roda dentada, é calculado o valor de tempo entre dentes (cálculo do valor do timer associado), permitindo assim calcular a RPM. Também é possível incrementar o número de graus por dentes sabendo assim exatamente qual a posição do motor em graus até que este volte a iniciar o ciclo. Se não existir rotação o microcontrolador vai permanecer num estado de espera, ficando constantemente a verificar se existem interrupções geradas pelo sensor de referência ou de sincronismo. Sabendo o valor de RPM, a posição do motor e o tempo de abertura do injetor assim como o avanço é possível controlar a sua abertura e fecho com a precisão necessária. O controlo da ignição e dos injetores é feito através de um timer individual.

Paralelamente recebe informação via CAN que permite saber qual o valor de combustível a injetar ou de avanço de ignição. Estas mensagens CAN são transferidas para a RAM através de DMA (sem intervenção do processador). Outro timer ficará responsável pela frequência de atualização da informação enviada via CAN a um baud rate de 1Mb/s e que define as condições de funcionamento de todo o sistema.

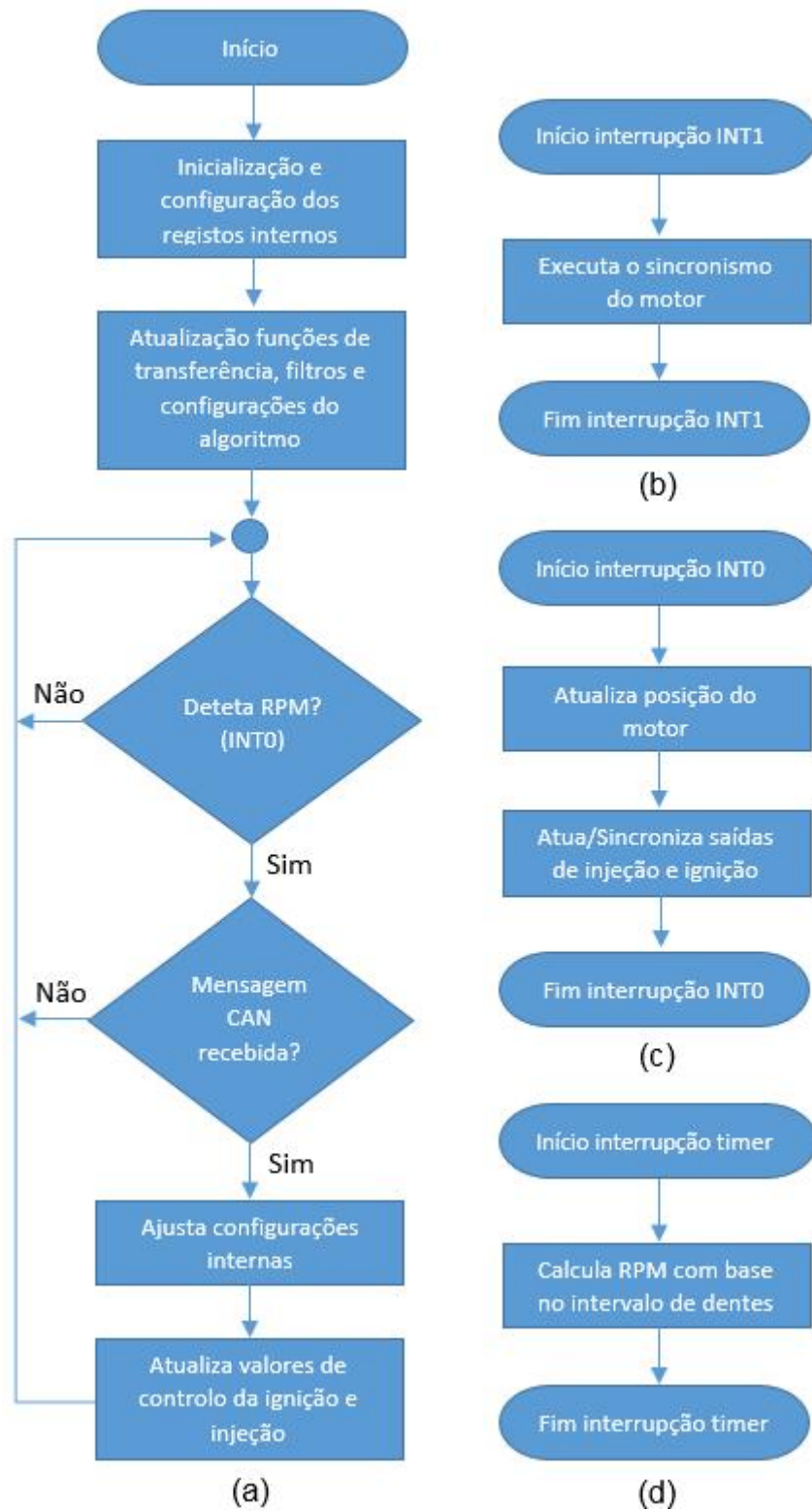


Figura 3.20 - Fluxograma organizacional do módulo de controlo do motor.

3.6. Outros (Módulos Expansíveis)

3.6.1. Princípio de Funcionamento

No caso de haver a necessidade de controlar determinado tipo de atuador ou adquirir determinado tipo de sensor com alguma especificidade e se esse controlador já existir é possível e fácil a integração do controlador na arquitetura. Isto coloca a descoberto uma das vantagens existente neste tipo de arquitetura e que se prende com o facto de ser possível incorporar no sistema diferentes módulos auxiliares (de funcionamento independente), desenvolvidos por outras entidades a partir do momento que tenham a capacidade de fazer a aquisição ou controlo local de um sensor ou atuador e que possuam comunicação CAN.

Neste caso o módulo adicionado trata-se de um PLM, essencial na monitorização e controlo do sensor lambda. Este módulo trata do condicionamento e aquisição do valor do sensor lambda e do valor de tensão de bateria, e posterior disponibilização do seu valor no barramento CAN.

Não tendo sido de um módulo desenvolvido de raiz, a sua inclusão foi de grande facilidade e utilidade. Trata-se de um PLM (professional lambda meter) desenvolvido pela empresa MOTEC, uma referência no mundo do desporto automóvel, no que a equipamento de gestão eletrónica diz respeito.

3.6.2. Hardware

Este módulo possui dois conetores DB9 sendo o conector macho responsável pela alimentação e conexão aos sensores e o fêmea responsável pela comunicação com o barramento CAN e com o PC (RS232). Possui também display físico para amostragem de valores. Por se tratar de um produto profissional todo o hardware utilizado não está acessível para consulta, apesar da fiabilidade e flexibilidade de configurações, tais como capacidade para vários tipos de sensores lambda, estarem garantidas.

3.6.3. Firmware

Ao nível de software tem um funcionamento idêntico ao módulo de sensores do ponto de vista da integração na arquitetura do sistema, ainda que a maneira de execução do algoritmo seja desconhecida. No entanto este adquire os sensores a um determinado intervalo de tempo definido, disponibilizando posteriormente os seus valores via CAN.

A sua configuração pode ser calibrada pelo próprio software via RS232 onde é possível alterar a frequência de aquisição, amostragem das duas variáveis que trata assim como os tipos de sensores e respetivas calibrações. Possui ainda capacidade de diagnosticar o sensor lambda.

Os valores adquiridos serão utilizados em determinada compensação necessárias para o correto funcionamento do motor, tais como tempo morto dos injetores ou permitir analisar o estado da mistura e sua afinação.



Figura 3.21 - Imagem representativa do PLM utilizado no sistema.

4. Software de Visualização e Calibração

Neste capítulo vai ser abordado o software desenvolvido para visualizar os diferentes valores de sensores e de cálculo assim como calibrar os diferentes tabelas/mapas e variáveis de controlo da arquitetura desenvolvida. Irão ser abordados temas tais como qual o ambiente de programação escolhido, a metodologia de implementação do mesmo, assim como as principais funções e diferentes implementações.

Vai ser apresentado o método de comunicação e respetivo protocolo assim como as mensagens trocadas entre o a “EMS” (gestão eletrónica do motor), mais precisamente o módulo de cálculo e o software presente no computador.

Relativamente ao software vão ser apresentadas as principais partes constituintes do mesmo, do ponto de vista do utilizador, assim os diferentes mapas ou parâmetros de configuração essenciais na calibração do motor.

4.1. Plataforma de Programação

O programa escolhido para plataforma de desenvolvimento foi o Labview 2014, uma ferramenta de programação gráfica desenvolvida pela National Instruments, cuja linguagem de programação é vulgarmente denominada por linguagem “G”.

Os programas desenvolvidos em Labview são chamados de instrumentos virtuais ou, simplesmente, “VI’s” e são constituídos por 3 componentes básicos denominados de painel principal, diagrama de blocos e conector.

O painel frontal contém os objetos tais como indicadores, gráficos, tabelas e botões, responsáveis pela interface gráfica com o utilizador. É no diagrama de blocos que se encontra o código (gráfico ou escrito) do programa a executar e que define o “VI”, tais como as estruturas base de programação (“while loop”, sequências e decisões). Já o conector é o responsável por identificar o instrumento virtual de modo a que este seja tratado como uma função e possa ser utilizado num outro “VI”. Esta capacidade de um “VI” poder ser implantado num outro “VI”, denominando-se de “subVI”, facilita imenso na organização, flexibilidade, reaproveitamento e estruturação um programa final.

Em contraste com as linguagens de programação baseadas em texto, onde as instruções determinam execução de programa, o Labview usa programação onde o fluxo de dados (“dataflow”) determina a forma da execução da mesmo. As conceções entre os diferentes blocos (funções específicas e predefinidas) é feita através de ligações individuais em que um determinado bloco recebe e manipula os dados à entrada, executa a sua função intrínseca para a sua aplicação/programação, apresentando o resultado da operação na sua saída. Este dados já manipulados por determinado bloco seguem para o seguinte, influenciado do fluxo dos dados, definindo assim a organização do programa.

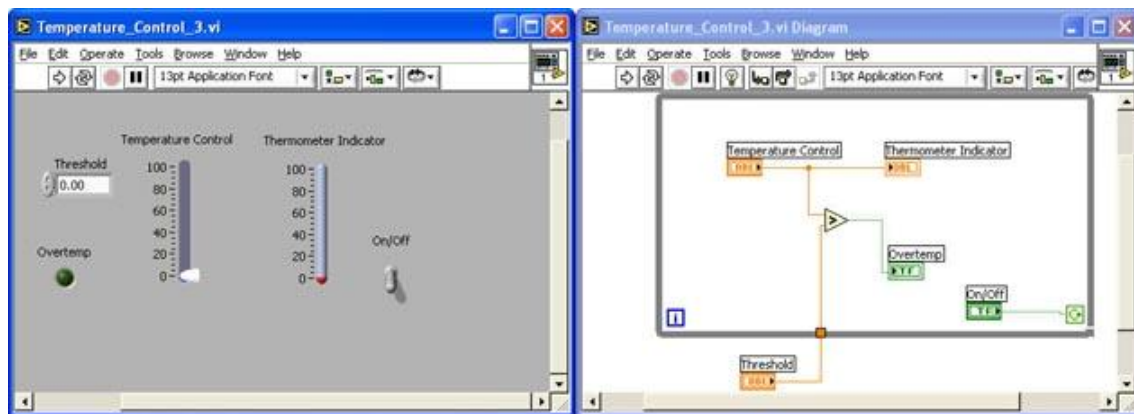


Figura 4.1 - Painel frontal e diagrama de blocos do Labview.

4.2. Organização Funcional

Como foi dito anteriormente escolheu-se Labview 2014 como plataforma de desenvolvimento de um software que permita a interação entre o utilizador o hardware desenvolvido para a gestão e controlo do motor. Na figura XX abaixo apresentada é possível ver o diagrama de fluxo e organização do software desenvolvido, cuja comunicação acontece via porta série, e denomina-se de EMS Software Manager.

Após o inicio do programa este vai inicializar e configurar a porta serie. Durante esta fase dá-se início a um “handshake” (explicado abaixo), no sentido de verificar se existe algum hardware conectado e se este é de facto o EMS desenvolvido assim como sincronizar ambos e dar inicio à comunicação livre e total e transferência. Concluído o “handshake” com sucesso processa-se a transferência dos dados da EMS para o Labview ficando assim disponíveis para o utilizador e possível alteração.

Seguidamente e como é possível verificar pela sequencia de código na figura XX, o software entra numa fase na qual dá início a uma fase na qual passa a executar dois “loop’s” em paralelo e cuja interação entre ambos é possível. O primeiro “loop” é o responsável pela receção, descodificação e mostragem em tempo real dos valores relacionados com sensores, combustível, ignição assim como gravação dos mesmos para futura análise. Paralelamente, o segundo “loop” possibilita a modificação e deteção dos diferentes parâmetros de configuração e calibração do sistema, assim como o respetivo envio e atualização na EEPROM do módulo de cálculo.



Figura 4.2 - Esquema gráfico da organização do software desenvolvido em Labview.

4.2.1. Comunicação

Como o hardware desenvolvido se trata de um sistema que realiza o controlo de um motor de combustão interna, este necessita de possuir alguma flexibilidade no que diz respeito às diferentes estratégias de controlo. Como tal é necessário efetuar uma calibração por partes na qual é necessária a constante modificação dos mapas de controlo no sentido de procurar encontrar a melhor calibração possível e obter um bom funcionamento do motor.

Com base nisto existe a necessidade do desenvolvimento de um software que sirva com uma plataforma de comunicação entre o utilizador e o sistema implementado, sendo necessária a implementação de um protocolo de comunicação. Neste caso optou-se por usar o protocolo de comunicação série tendo sido implementada através de um conversor FTDI que serve de conversor entre a porta UART do microcontrolador do módulo de cálculo (PIC32) possui e uma porta USB do computador. A comunicação realiza-se nos dois sentidos, sendo que a EMS envia mensagens, como por exemplo o valor dos sensores,

mas também recebe informação proveniente do PC, tal como pedidos de alteração de valores.

Na figura abaixo encontra-se o digrama de blocos do Labview com o qual é possível realizar a comunicação série. Inicialmente (à esquerda) configura-se a velocidade de comunicação (neste caso “baudrate” de 115200), seleciona-se a porta USB à qual se pretende conectar, e efetuam-se outras inerentes ao protocolo das quais se destacam o número de bits da transferência (8), bits de início ou paragem (1), ou se se pretende ter controlo de fluxo ou paridade (neste caso não). Seguidamente o “buffer” da porta é limpo, e chagando-se assim ao “loop” onde se executa todo o programa principal. Nesta fase é possível enviar assim como receber caracteres, tanto em paralelo como em série, dependendo da necessidade, sendo que mais à frente serão apresentados os principais exemplos. Quando se para o programa este fecha a porta série para que esta possa ser utilizada de imediato para outra tarefa ou para um novo início do programa. O último bloco serve para que durante programa e em situações que existem falhas ou bugs na comunicação, estas sejam possíveis de detetar e com base nisso efetuar determinada tarefa tal como um aviso ou paragem do programa.

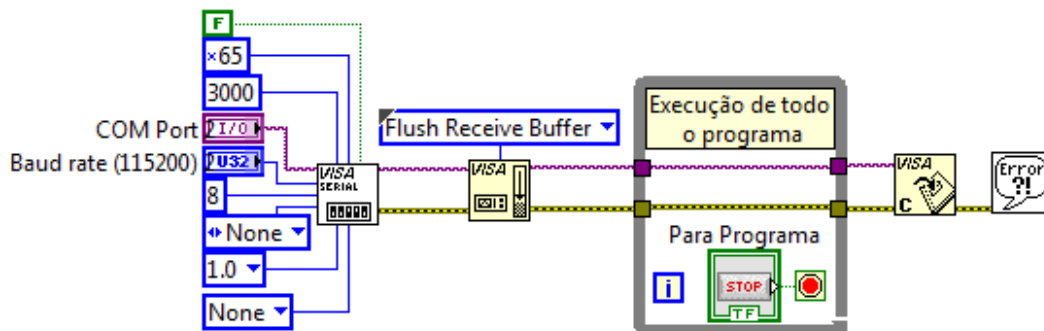


Figura 4.3 - Excerto do diagrama de blocos em referente à comunicação serie.

4.2.2. Detecção da EMS e Handshake

Como foi referido anteriormente a comunicação desempenha um papel importante entre os dois sistemas (EMS e o PC) e como tal esta necessita de ser fiável e tem de ser iniciada de maneira correta para que seja possível sincronizar os dados. Para tal foi implementado um “handshake” simples. Na figura XX, abaixo apresentada, é possível ver as quatro mensagens que são trocadas entre os dois sistemas e que compõem o “handshake” que depois de efetuado permite que os sistemas estejam completamente operacionais. Depois

de inicializado, o software fica num “loop” à procura de algum hardware na porta série, enviando a mensagem “sALGUEMe” para a qual se espera que a que a resposta seja “sSIMXXXe”. Efetuados o primeiro e segundo passo o software volta a enviar a mensagem “sQUEMXXe” para o qual a EMS terá de responder “sEMSXXXe”, sendo de seguida apresentada no painel frontal uma mensagem sinalizada a verde a dizer “EMS conectada”

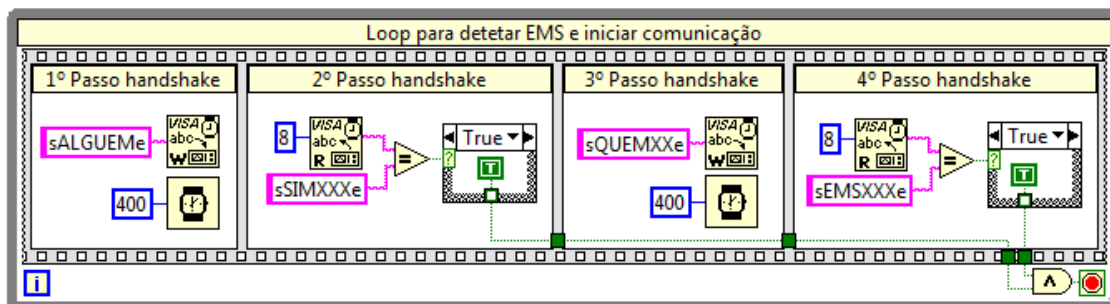


Figura 4.4 - Excerto do diagrama de blocos referente ao “handshake”.

4.2.3. Receção de Dados da EEPROM

Efetuosos estes quatro passos aparece no painel frontal uma mensagem sinalizada a verde a dizer “EMS conectada” ficando então pronto para receber os diversos mapas 1D e 2D de controlo provenientes da EMS. Esta fase do programa dá-se automaticamente realizados os quatro passos do “handshake”, sendo que a “string” de dados que contem a informação é recebida e descodifica de forma a preencher os mapas com os valores corretos. Na figura abaixo é possível ver um excerto da sequência no qual se preenchem e organizam os mapas no software.

Após ser recebida, a “string” de dados, é dividida e organizada em vários tamanhos já predefinidos e correspondentes ao tamanho das tabelas, sendo que cada uma das suas células será preenchida pela concatenação dois bytes e enviada para o seu respetivo lugar na tabela. A esta concatenação é subtraído o “offset”, assim como efetuada uma divisão que depende do número de casas pretendidas para variável.

Por exemplo abaixo apresenta-se a tabela de combustível durante aceleração cuja posição na “string” completa proveniente da EMS ocupa os primeiros 98 bytes. Isto deve-se facto de se tratar de uma tabela 2D com 7x7 de tamanho perfazendo um tamanho de 49 células, em que cada célula é composta pela concatenação de dois bytes, ou seja um tamanho total de 98 bytes.

Posteriormente estas “sub-string” já perfeitamente organizadas são associados a uma variável local com nome da tabela que constituem ficando esta completamente legível e organizado no painel frontal.

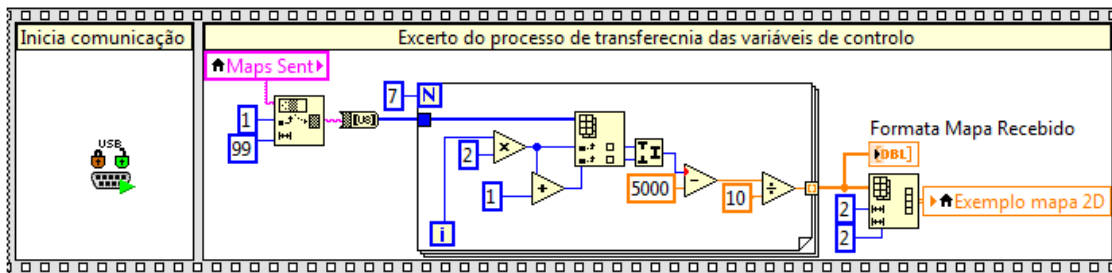


Figura 4.5 - Excerto do diagrama de blocos em referente à comunicação serie.

4.2.4. Pedido e Receção de Informação

Passada a fase de receção dos mapas e correta organização dos mesmos o programa entra então nos “loop’s” principais. Como foi referido anteriormente nesta fase executam-se dois “loop’s” em paralelo sendo um para receção, decodificação e gravação dos valores proveniente do motor e o outro referente ao processo de modificação e deteção dos mapas e envio para a EMS. Para receber a informação em tempo real, o software envia, a uma frequência de cem “hertz”, uma mensagem “sM1XXXXe” para a EMS que envia de volta a “string” de dados referentes ao pedido. Este processo é realizado para os diferentes grupos de dados no sentido de diminuir o tamanho da “string” de receção, sendo que cada resposta varia com a mensagem de pedido. Por exemplo na imagem abaixo apresentada, é possível verificar que após o envio da mensagem “sM1XXXXe” este recebe uma “string” com o tamanho de dez bytes.

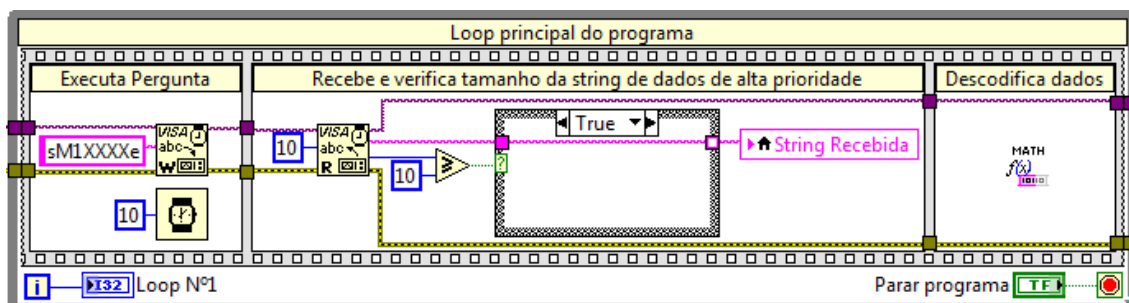


Figura 4.6 - Excerto do diagrama de blocos do pedido de valores em tempo real.

4.2.5. Descodificação e Visualização

Na figura acima foi possível verificar que o tamanho da “string” recebida era de dez bytes. Isto deve-se ao facto de após o software fazer o pedido a EMS envia o valor de cinco variáveis em que cada uma possui um tamanho de dois bytes. Na figura abaixo é possível verificar um excerto da função na qual a “string” recebida é dividida e onde os dez bytes são concatenados em cinco variáveis sendo de seguida retirado o “offset” e realizada uma divisão dependendo da resolução da mesma.

Por exemplo, o valor do sensor TPS que vem no terceiro e quarto bytes é concatenado sendo depois subtraído o “offset” e efetuada uma divisão por 10 por apenas possuir uma casa decimal de zero a cem por cento. Este valor final é posteriormente associado a uma variável local de modo a estar disponível na execução do programa.

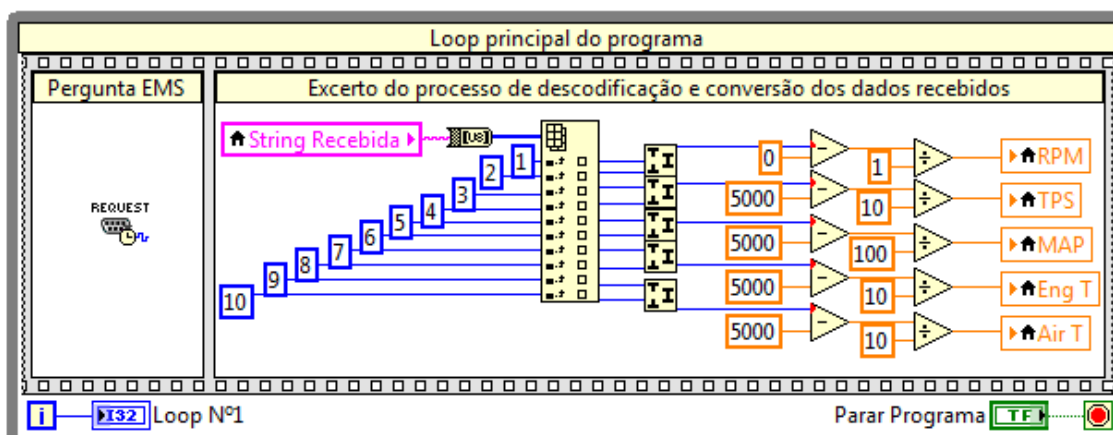


Figura 4.7 - Excerto do diagrama de blocos em referente à composição das variáveis.

Como é possível verificar pela figura abaixo, os valores das variáveis já tratadas são posteriormente mostrados nos diferentes tipos de indicadores que o Labview possui já pré-configurados. Este tipo de visualização de dados é uma grande vantagem do Labview tendo sido um dos fatores de relevo na decisão de utilização do mesmo. Podem ser mostrados em vários tipos de indicadores mais adequados para cada variável assim como em gráficos com diversos número de variáveis, referenciais e escalas.

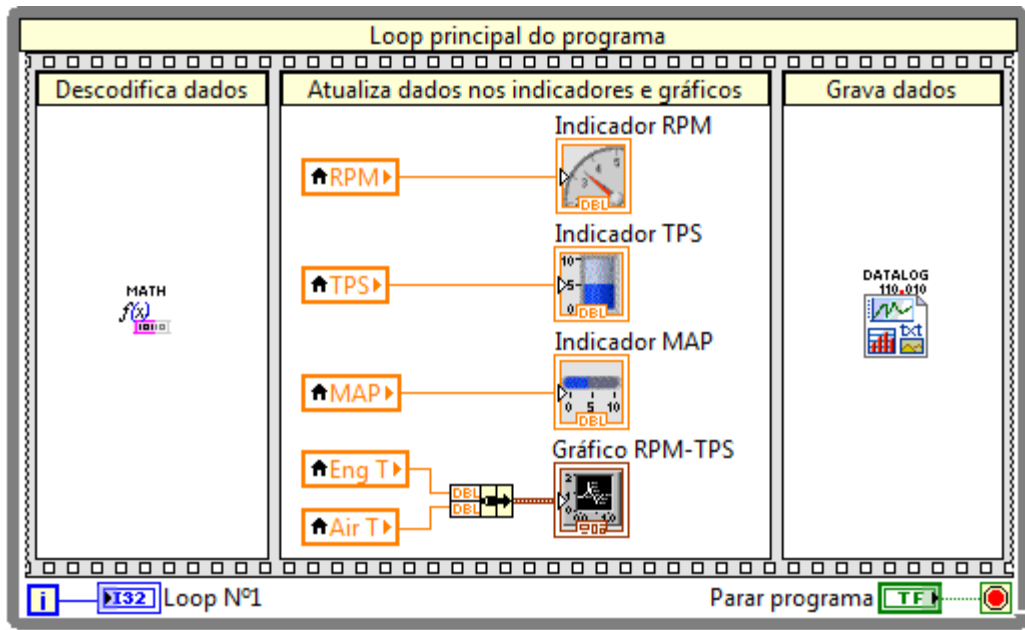


Figura 4.8 - Excerto do diagrama de blocos referente à mostragem da informação.

4.2.6. Gravação de dados

Da mesma forma que os dados já estão tratados e prontos a mostrar, podem ser facilmente guardados num ficheiro, neste caso ".txt" para futura análise. Na figura abaixo é possível verificar o processo de gravação dos mesmos, em que uma variável local com o valor de determinada sensor é associado ao bloco que efetua a gravação no ficheiro, neste caso uma "string" de cinco variáveis apenas com uma casa decimal.

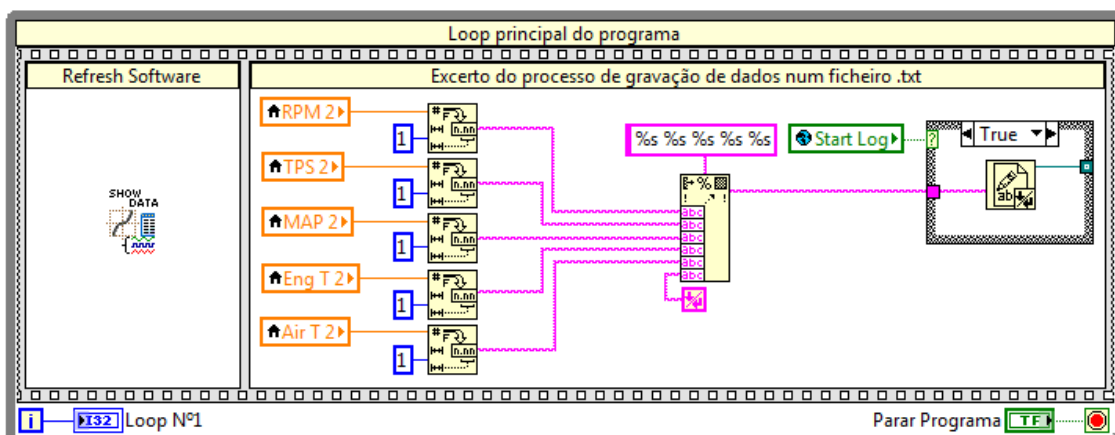


Figura 4.9 - Excerto do diagrama de blocos referente à gravação de um ficheiro de dados.

4.2.7. Alteração de Parâmetros na EMS

Na figura XX, abaixo apresentada é possível ver os dois “loop’s” principais do programa, uma simplificação gráfica do primeiro “loop”, explicado nos subcapítulos acima, e um excerto do “loop” responsável pela deteção e modificação dos mapas que irá ser agora discriminado. Tal como foi apresentado no capítulo da metodologia, este é também composto por diferentes fases.

Primeiramente utilizador modifica um determinado mapa ou parâmetro no painel frontal (apresentado no subcapítulo abaixo), que devido ao facto de o “loop” estar a correr e constantemente a verificar os mapas atuais e a procurar por modificações, vai iniciar a comparação do mapa atual com aquela que ficou em memória no ciclo anterior. Se por ventura encontrar alguma diferença numa determinada célula (através de um “loop” numérico para cada eixo) e sabendo qual o seu índice, ou seja a posição na qual detetou a diferença, fica a saber imediatamente a posição no eixo dos “XX” e “YY” no qual essa diferença ocorreu.

Seguidamente o software envia uma mensagem para a EMS com o comando “smXXXXXe” no qual o primeiro “X” é o número do mapa em questão, o segundo e terceiro o número da posição em “XX” e “YY” em que a mudança ocorreu e os últimos dois bytes são o novo valor para a célula modificada. Esta mensagem é depois recebida pela EMS que procede à alteração desta célula na EEPROM e envia de volta uma mensagem na qual confirma que efetuou a modificação pretendida.

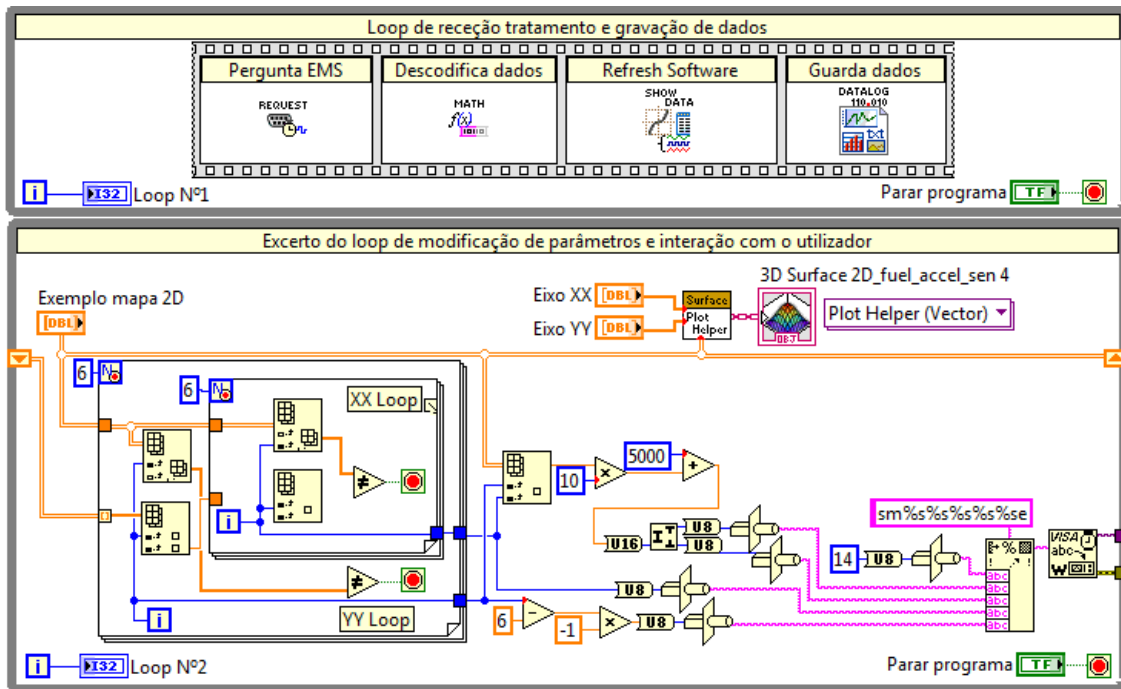


Figura 4.10 - Excerto do diagrama de blocos referente à deteção e alteração de parâmetros na EMS.

4.3. Interface Gráfico

Neste subcapítulo vai ser apresentado o interface gráfico do ponto de vista do utilizador, visando as suas principais funções, resumo das principais funcionalidades assim como uma descrição dos parâmetros passíveis de modificação.

3.4.1 Apresentação do interface

O software desenvolvido, EMS Software Manager, encontra-se dividido em diferentes subpartes no sentido de organizar a visualização dos dados assim como facilitar a integração com o utilizador. Na figura XX é possível verificar as diferentes cores e respetivas letras a sinalizar as mesmas. A vermelho (F) encontra-se a janela principal onde aparecem os diferentes mapas, e a verde (E) o painel fixo onde se encontram os principais indicadores das variáveis e gráficos do motor. O menu principal que permite procurar por todos os mapas encontra-se a azul (A) assim como os botões que dão acesso aos principais mapas e configurações do motor que se encontra a laranja (D). Para iniciar/parar

o software assim como escolher a porta USB e ver se a EMS foi detetada temos o amarelo (B) sendo que o botão para iniciar a gravação de dados e escolher o diretório do ficheiro se encontra a roxo (C).

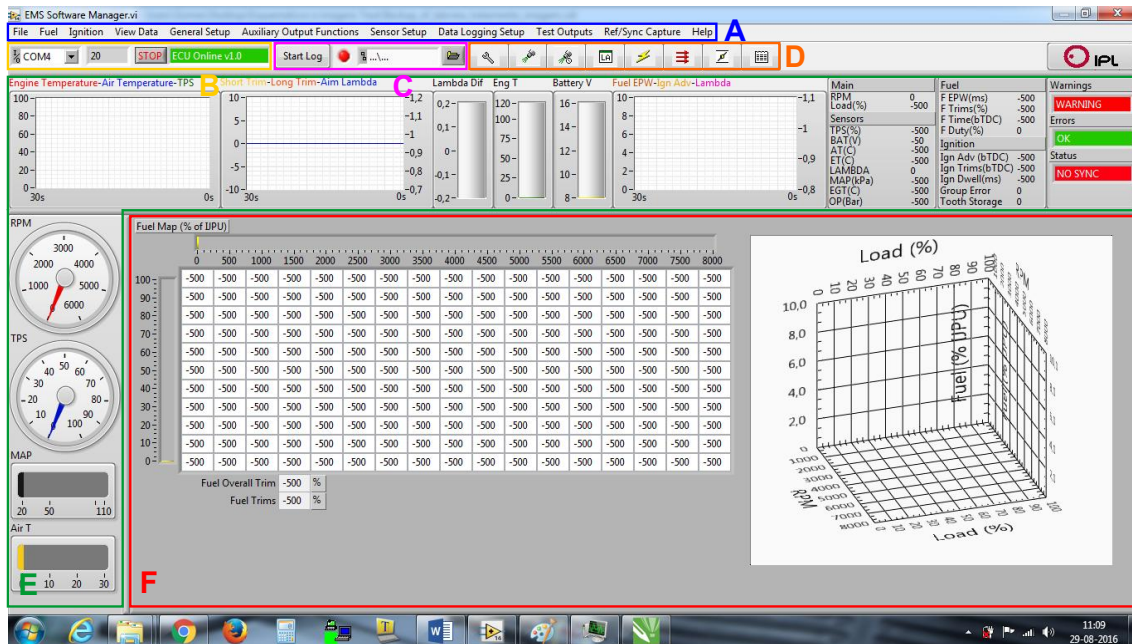


Figura 4.11 - Interface gráfico desenvolvido: A) Menu Principal; B) Comunicação; C) Gravação de dados; D) Botões; E) Painel fixo; F) Janela principal.

4.3.1. Configuração Inicial da Comunicação

Como se pode verificar pelo indicador amarelo (B) é aqui que se pode escolher a porta serie para comunicar com a EMS, iniciar/parar o programa, e onde permite verificar o tempo de execução do ciclo principal assim como detetar se a EMS foi detetada pelo software. Este indicador fica a verde e mostra a mensagem “EMS Connected v1.0” quando o “handshake” ocorre com sucesso e a vermelho, “EMS Not Connected”, quando não encontra o hardware ou existe uma falha na comunicação.

imagens ilustrativas, que permitem aceder aos mapas mais importantes de forma rápida aquando da afinação. Tanto um método como o outro irão fazer com que o software passe a apresentar na janela principal o mapa e respetivos dados referentes ao valor selecionado, neste caso ao combustível durante aceleração.

4.3.4. Painéis

Painel fixo

Este painel fixo apresenta os indicadores e gráficos assim como as variáveis discretas mais importantes do ponto de vista de monitorização e diagnóstico do algoritmo de controlo do motor, sendo portanto o principal “comunicador” com o utilizador, independentemente do tipo de mapa selecionado na janela principal (abaixo apresentada).

As variáveis apresentadas estão relacionadas com combustível, ignição, sensores, atuadores assim como com parâmetros gerais do algoritmo. É composto por indicadores do tipo tanque, barra vertical, barra horizontal assim como gráficos com várias grandezas de medição, como temperaturas, velocidade, pressões entre outras. Tanto num caso como no outro é possível ter escalas adaptáveis, configurar valores máximos e mínimos, assim como alarmes.

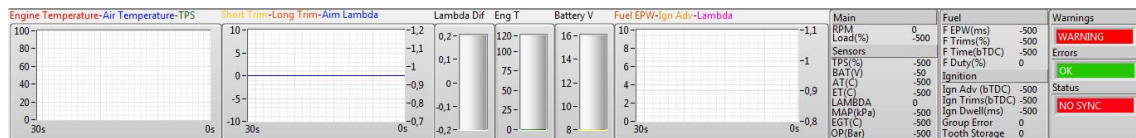


Figura 4.13 - Painel frontal com os diferentes tipos de indicadores.

Janela central

Dependendo do tipo de ação a ser realizada é nesta janela que a funcionalidade requerida aparece. Por exemplo se no menu principal ou em algum botão for selecionado determinado mapa, esta janela vai apresenta-lo para serem efetuadas as modificações pretendidas.

Método de visualização

Paralelamente ao painel fixo ou aos gráficos associados a determinada tabela existe um menu (figura XX) em que estão todas as variáveis associadas à gestão do motor. Este menu é útil caso queiramos ver em tempo real todos os parâmetros do motor com grande descrição facilitando assim na calibração e deteção de possíveis problemas.

Resume Variables													
Main	Fuel Trims	Ignition Trims	Errors	Warnings	General	Idle Control Function							
RPM	0	Fuel Overall Trim %	-500	Ign Overall Trim °	-500	Engine Sync	ERROR	Oil Pressure	OK	Run Time	0	Aim RPM	-500
Load (%)	-500	Fuel First Injection	0	Ign AT Trim °	-500	Missing Tooth	OK	Eng Temp	OK	Tooth Storage	0	Actual RPM	0
Sensors		Fuel Crank Trim %	-500	Ign ET Trim °	-500	Ref Signal	OK	High RPM	OK	TPS RoC Inst	-500	RPM Error	-500
TPS (%)	-500	Fuel Post-Start %	-500	Ign Accel °	-500	Sync Signal	OK	Battery V	WARN	Ref Time Filter	0	Idle Fuel Trim	-500
BAT (V)	-50	Fuel Battery Trim ms	-500	Ign Accel Inst °	-500	TPS Sensor	OK	Status		Sync Time Filter	0	Idle Ign Trim	-500
AT (C)	-500	Fuel AT Trim %	0	Ign Accel	-500	ET Sensor	OK	Max Ign Adv	0	On Teeth Ign	0	Normal Comp	-500
ET (C)	-500	Fuel MAP Trim %	-500	Ign Idle Trim	-500	MAP Sensor	OK	Max Dwell	0	TPS RoC	-500	PID Comp	-500
LAMBDA	0	Fuel Accel ms	-500	Ignition Totals		AT Sensor	OK	Min Ign Adv	0	Output Duty	-500		
MAP (kPa)	-500	Fuel Acc Inst ms	-500	Ign Base °	-500	LAMBDA Sensor	OK	Min Dwell	0	Lambda Control Function			
MAF	-500	Fuel Acc Decay %	-500	Ign Trims °	-500	Modules		Max Inj Adv	0	Aim Lambda	0	Actual Lambda	0
OP (Bar)	-500	Fuel Lambda ST %	0	Ign Effective °	-500	TPS-MAP Module	OK	Max Inj Duration	0	Lambda Error	-5	Lambda Error	-5
EGT	0	Fuel Lambda LT %	0	Ignition Dwell		AT-ET Module	OK	Min Inj Duration	0	Lambda ST	-500	Lambda ST	-500
Sensors Voltage		Fuel Idle Trim	-5	Ign Dwell ms	-500	Inj-Ign Module	OK	Max Duty Cycle	0	Idle Valve Duty	-500	Lambda LT	-500
AT (V)	-5	Fuel Totals				AUX Module	OK	Min Inj Duration	0	Tacho Freq	-500	Sensor RUN	0
ET (V)	-5	Fuel Base ms	-500			RELAY Module	OK	Fuel Accel Func	0	Fuel Pump Relay	-50	Sensor FOLD	0
TPS (V)	-5	Fuel Trims ms	-500					Ign Accel Func	0	Thermo Fan Relay	-50	Sensor FAULT	0
MAP (%)	-5	Fuel Effective ms	-500					Wasted Spark	0	Idle Function	0	Sensor WARM UP	0
		Fuel Duty %	0					Lambda Function	0	ADC Ref FAULT	0		
		Fuel Timing											
		Fuel Timing °	-500										

Figura 4.14 - Menu de visualização e resumo de todas as variáveis do motor.

Existem no entanto determinadas mapas que possuem gráficos ou resumo de variáveis independentes associados. Esta organização prende-se com o facto de existir necessidade de possuir um determinado agregado de informação durante a calibração do próprio mapa dada a sua complexidade. Um exemplo desta configuração é o mapa da sensibilidade referente à aceleração de combustível durante a aceleração, como se pode ver pela figura abaixo.

4.3.5. Parâmetros de Configuração

As tabelas são os principais parâmetros de afinação e calibração do motor. Estas permitem a modificação dos seus valores internos, sendo que para tal apenas é necessário clicar em determinada célula das mesma e inserir o novo valor pretendido. Esta inserção de um novo valor é então detetado pelo software que envia imediatamente para a EMS que atualiza essa mesma célula na tabela de funcionamento provocando de a alteração pretendida no funcionamento do motor. O valor máximo e mínimos permitidos em todos os mapas criados é de 500 e -500.

Cada uma das tabelas de configuração foi inicialmente criada já com a dimensão e funcionalidade pretendida, no sentido de possuírem resolução suficiente assim uma interligação e impacto na estratégia de controlo, permitindo à EMS um funcionamento

adequado do motor. As tabelas podem ser 1D ou 2D cujos referenciais são variáveis de controlo previamente seleccionados. Cada eixo (por exemplo TPS ou RPM) apresenta um indicador vertical ou horizontal onde indicam qual a valor da variável associada a esse eixo e que servirá como referencia/ponto indicador para a interpolação dos valores apresentados na tabela. Cada tabela possui também um gráfico 2D ou 3D no qual é possível analisar de uma forma mais sucinta e rápida o estado dimensional da tabela preenchido.

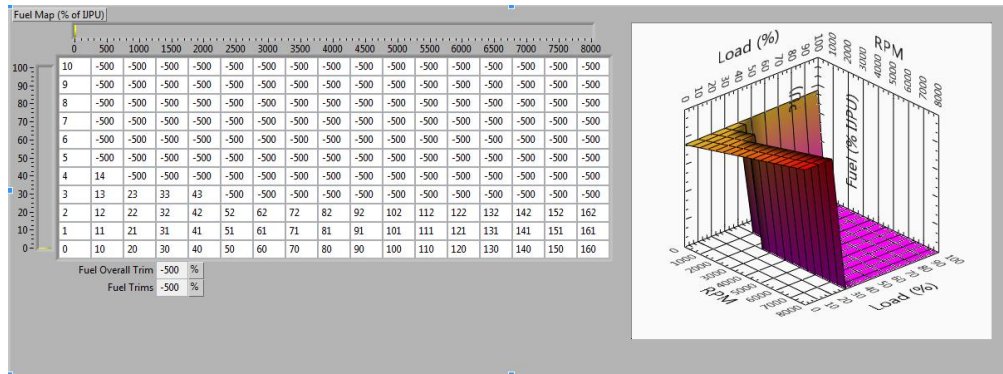


Figura 4.15 - Tabela 2D do mapa de avanço de ignição e respetivo gráfico 3D.

Interpolação das tabelas

Como foi referido no subcapítulo acima os valores das tabelas são interpolados nos intervalos dos eixos em que a variável de entrada se encontra permitindo que o valor resultando de saída para aquele parâmetro resultante seja calculado com exatidão.

Isto deve-se ao facto da EMS (neste caso o modulo de calculo) possuir a capacidade de durante a execução dos cálculos intrínsecos ao algoritmo de controlo cada ponto intermédio entre dois valores fixos de determinado eixo poderem ser interpolados, sendo o resultando final proporcional à grandeza física do eixo que interpola. Este método de interpolação foi aplicado em todos as tabelas sendo o método aplicado tanto verticalmente como horizontalmente.

Principais tabelas

Relativamente ao combustível existem um conjunto de tabelas/mapas que se consideraram essenciais para o funcionamento do motor. Estes são, o mapa principal, mapa do lambda, mapa de avanço de injeção, mapa de combustível durante aceleração, mapas de compensação, tal como compensação para arranque a frio, temperatura do ar admitido,

tensão da bateria, entre outros com menor importância ou influência na gestão do motor. No caso da ignição existem, o mapa principal, o mapa do tempo de carregamento das bobinas de ignição (dwell), ignição durante aceleração, assim como compensações como a compensação em função da temperatura do motor.

Do ponto de vista dos sensores existem tabelas de caracterização e configuração dos mesmos, tal como a do sensor da posição da borboleta (TPS), pressão do coletor de admissão (MAP), temperatura do ar admitido (AT) e temperatura do motor (ET). No caso dos sensores de referência e sincronismo não possuem curvas de caracterização mas sim de filtro ao ruído.

Para os atuadores utilizados, excetuando os injetores ou bobinas por possuírem um funcionamento síncrono com o controlo do motor, tanto os relés como as electroválvulas possuem diversos parâmetros singulares de configuração tal como frequência de controlo, condições de atuação, valor máximos e mínimos assim como tabelas 1D ou 2D no caso do atuador do “ralenti”.

Parâmetros singulares

Existem no entanto determinadas variáveis de controlo cuja confirmação se baseia num parâmetro singulares ou seja não existe nenhuma tabela mas sim apenas um valor que define determinada operação. Por exemplo o IJPU é um desses exemplos, em que ao contrário de uma tabela é composto apenas por uma célula, sendo no entanto o método de deteção de modificação idêntico às tabelas.

Destes parâmetros é possível destacar o parâmetro principal de injeção, valor da primeira injeção, avanço de ignição durante arranque ou por exemplo os diversos ganhos adimensionais que permitem aumentar determinado valor numa percentagem pretendida (tal como combustível) de maneira a ver o efeito deste aumento sem para tal ter a necessidade de efetuar modificação em mapas já parcialmente afinados ou os de opções genéricas como ligar ou desligar determinada função.

5. Implementação

Neste capítulo vão ser descritos as diferentes etapas que constituíram a implementação prática do projeto desenvolvido. Irá ser feita uma abordagem ao motor utilizado e respetivos sensores e atuadores incorporados, assim como uma breve descrição da instalação elétrica aplicada. Seguidamente vai ser descrita a arquitetura desenvolvida, quais as decisões técnicas referentes ao algoritmo e estratégia de controlo do sistema, assim como os principais mapas de calibração e afinação do motor.

5.1. Motor Ford 2.0i

O motor utilizado para implementação prática do projeto é proveniente de uma Ford Galaxy comercializada entre 1995 e 2000 com o código de motor NSE. Trata-se de um motor a gasolina de quatro cilindros com 2000cm³, relação de compressão de 9.8:1 e dupla árvore de cames à cabeça. Produz 85 KW às 5500 e 171Nm às 4000 rpm.

Vem equipado com um sistema de injeção indireta sequencial Ford EDC-V e ignição agrupada Ford Map-DIS com a ordem 1-3-4-2. O motor encontrava-se instalado em simulador e foi posteriormente montado num veículo de testes existente no laboratório de engenharia automóvel.

5.2. Instalação Elétrica

Para a implementação prática do projeto houve a necessidade de desenvolvimento de uma cablagem elétrica no sentido de conseguir aplicar o sistema de gestão eletrónica desenvolvido na cablagem original do motor.

A cablagem encontra-se dividida em dois segmentos, sendo o primeiro correspondente ao sistema original, e o segundo à interligação com a EMS. O conetor principal que dá acesso aos diferentes sensores atuadores do motor, já se encontrava previamente instalado,

sendo que foi acrescentada a cablagem necessária para interligação entre este e a placa do protótipo. Aqui optou-se por colocar conectores adicionais referentes a cada módulo para permitir a integração com o sistema de alimentação e rede CAN assim como oferecer flexibilidade de movimentos. Por sua vez cada módulo possui ainda conectores de PCB, que foram implementados aquando do desenvolvimento genérico de cada módulo.

Relativamente aos módulos, optou-se por distribuir os mesmos numa placa protótipo feita em madeira, que possui internamente instalados tanto o barramento CAN como o circuito de alimentação. Isto permite ter uma perspetiva da ligação entre os diferentes módulos e ao mesmo tempo oferecer mobilidade na realização de testes.

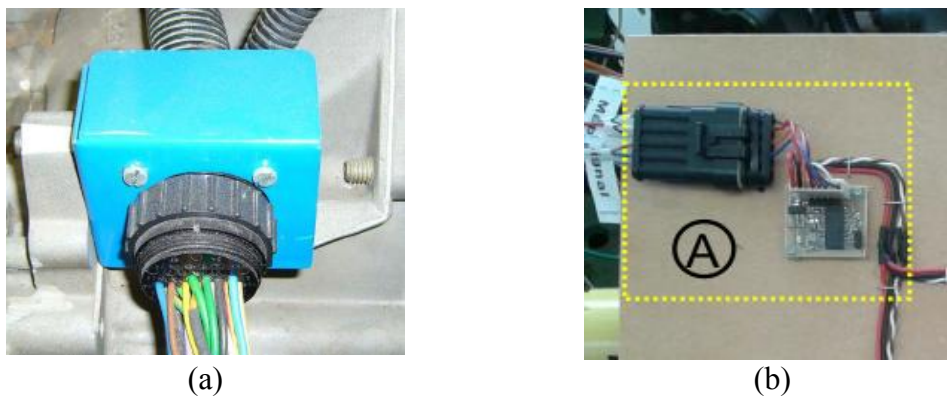


Figura 5.1 - Conectores: (a) ligação ao motor e (b) ligação aos módulos.

5.2.1. Circuito de Potência

Na figura abaixo é possível observar o esquemático das ligações elétricas efetuados do circuito principal de potência. Neste circuito também se encontram associados os principais interruptores, relés, ligações de massa, alternador e motor de arranque.

Foram instalados quatro relés principais, um para a EMS, sistema de ignição e combustível, ventilador do motor e motor de arranque, sendo que cada um possui um relé para proteção.

O interruptor de ignição é o responsável pelo controlo da alimentação de todo o circuito, sendo que que em caso de este estar aberto, todos os sistemas ficam desabilitados.

Após a ativação do interruptor de ignição a EMS1 será alimentada com 12V provenientes da bateria sendo que neste caso o módulo de relés poderá ativar o relé responsável pela

alimentação do sistema de injeção e ignição (durante um tempo predefinido) ou a ventoinha do motor.

Do ponto de vista da alimentação, esta encontra-se dividida entre divisão entre a alimentação dos diferentes atuadores, nomeadamente bobines e injetor, ventilador e bomba de combustível, e a alimentação dos diferentes módulos que constituem a EMS1.

A ligação das diferentes massas fez-se segundo o método estrela, ou seja consiste na ligação dos diferentes pontos de massa a um ponto comum associado ao chassis. Procedeu-se à ligação da massa da bateria diretamente ao chassis (ligação o mais curta possível), ligação do motor ao próprio chassis, assim como as diferentes cargas elétricas.

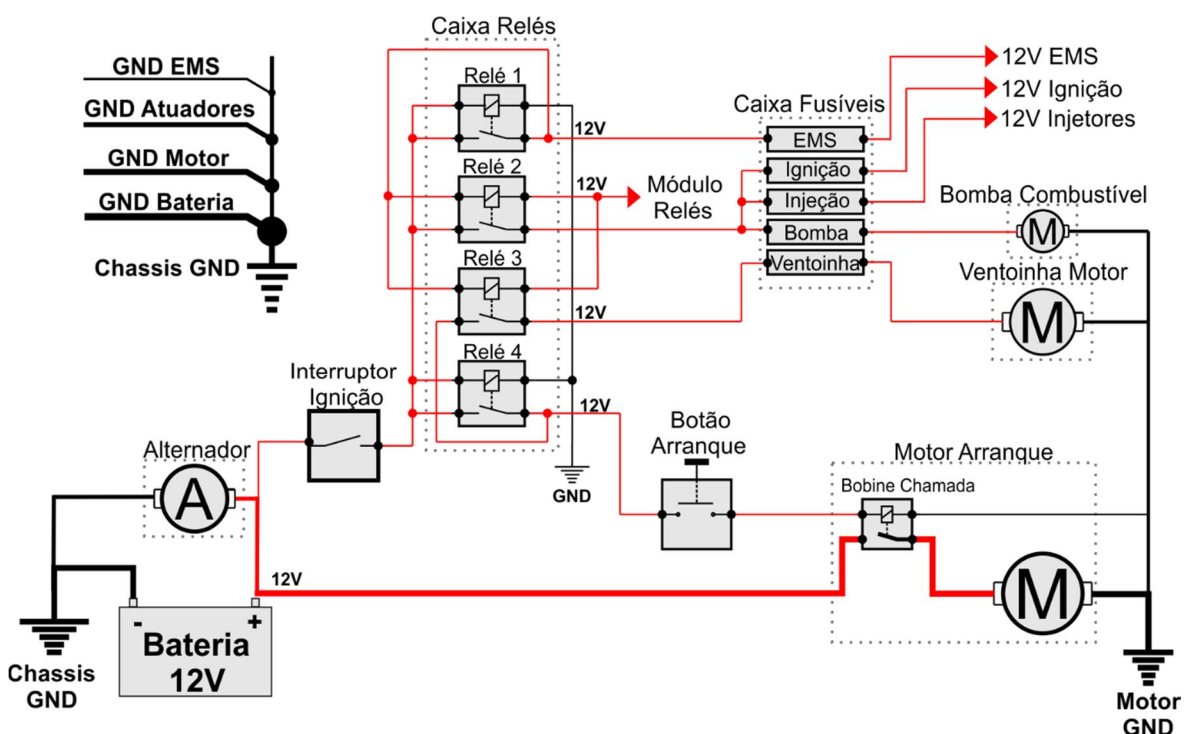


Figura 5.2 - Esquema gráfico do circuito elétrico de potência.

5.2.2. Circuito de Sinal

Na figura abaixo é possível observar o circuito correspondente à parte elétrica de sinal referente aos sensores e atuadores utilizados.

Cada módulo recebe 12V proveniente do relé EMS1 e encontram-se protegidos por um fusível de 1A, sendo que posteriormente cada módulo tem a capacidade alimentar

individualmente cada um os sensores. A massa dos diferentes módulos eletrônicos encontra-se ligada a um ponto comum (ligação estrela) que por sua vez liga à massa da bateria, visando essencialmente a redução do ruído elétrico. Tanto o sensor de referência como o de sincronismo possuem fios com isolamento elétrico visto serem sinais muito importantes no controlo do motor e suscetíveis a ruído.

A alimentação dos atuadores é feita pelo respetivo relé (controlado diretamente pela EMS1), em que apesar do controlo ser feito pela massa do módulo, o fato possuírem isolador ótico permite estarem completamente isolados da massa de sinal do respetivo módulo, não interferindo no sinal analógico dos sensores.

Do ponto de vista interferência eletromagnéticas este tipo de arranjo de cablagem, inevitavelmente proveniente da configuração modular, permite um menor exposição ao ruído por parte dos sensores tanto por organização espacial das cargas, como pelo menor comprimento dos fios.

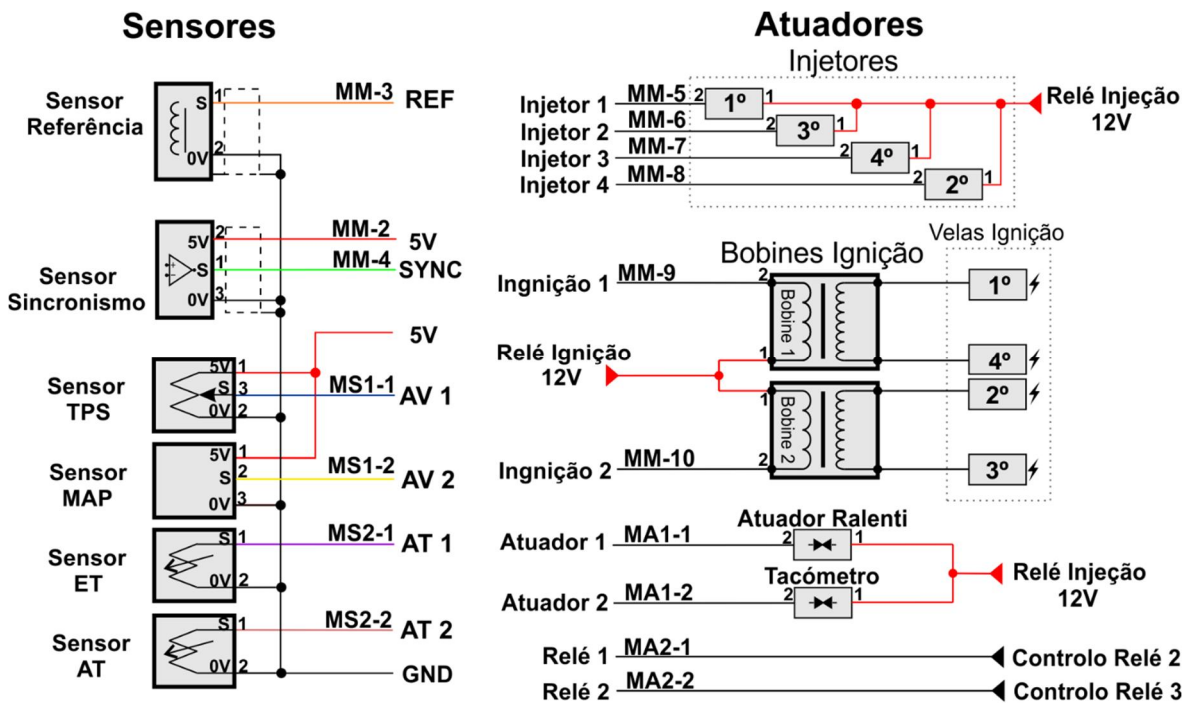


Figura 5.3 - Esquema gráfico do circuito elétrico de sinal.

5.3. Arquitetura Implementada

A arquitetura desenvolvida foi implementada, no sentido de validar o conceito de gestão eletrónica de motor descentralizado assim como provar a capacidade da mesma em efetuar a gestão eletrónica de um motor específico, acima apresentado. Para tal optou-se por aplicar um conjunto de módulos, cada um deles repetido de forma a preencher os requisitos base do sistema. Isto teve como configuração final um total de sete módulos, dos quais dois de sensores, dois de atuadores, um de calculo, um de motor, e um modulo de sensores previamente existente no mercado.

Na figura abaixo é possível observar a placa protótipo na qual se encontram os diferentes módulos e que se denomina de EMS. Do lado esquerdo da placa, nomeadamente letras A e B é possível observar os dois módulos de sensores, do lado direito, letras C e D encontram-se os módulos de atuadores. Com a letra E encontra-se o módulo do motor e com a letra F o módulo de cálculo. É ainda possível verificar o barramento conjunto que une os diferentes módulos (G) com os condutores do barramento CAN, assim como os da alimentação.

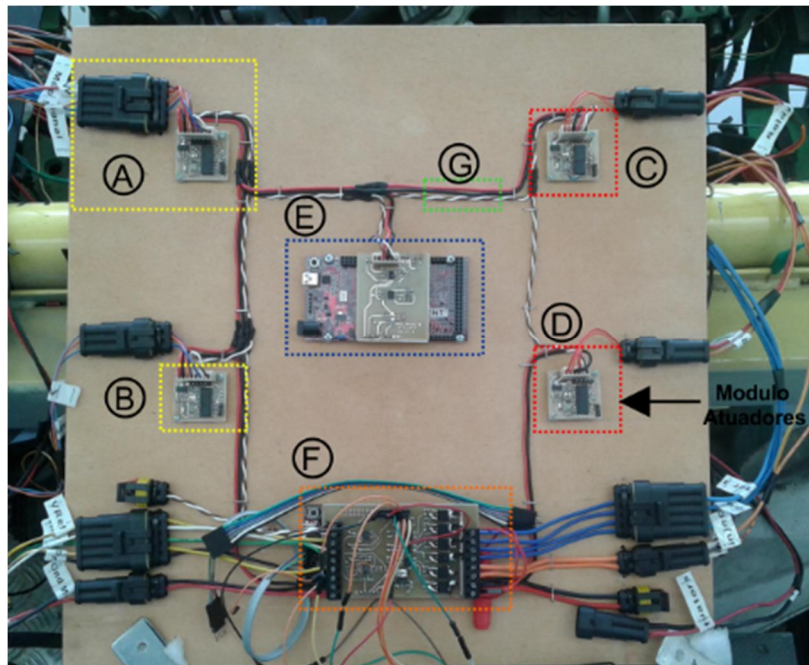


Figura 5.4 - Protótipo com a EMS implementada.

5.3.1. Módulo Sensores (A e B)

Para aquisição dos sinais provenientes dos sensores utilizaram-se dois módulos de sensores. O primeiro módulo (modulo sensores 1) encontra-se responsável por aquisição dos sensores diretamente relacionados com o método de cálculo da carga do motor, sendo eles o sensor TPS e sensor MAP.

O outro módulo (modulo sensores 2) ficou responsável pela aquisição dos sensores responsáveis pelas medições de temperaturas, nomeadamente o sensor ET e AT.

Para aquisição da tensão da bateria assim como aquisição e tratamento do valor lambda foi utilizado um terceiro módulo, denominada de PLM (modulo sensores 3), tratando-se este de um produto comercial já existente no mercado.

Excetuando o sensor lambda, que neste motor se encontrava retirado, todos os restantes sensores utilizados estavam previamente instalados no motor, tendo sido desenvolvida a cablagem (conectores e fios condutores) de interligação entre o motor e a placa protótipo, consoante o número de pinos de cada conjunto de sensores.

Nesta fase, o filtro por *hardware* (passa baixo) foi adaptado para cada um dos módulos conforme a gama de leitura indicada/necessária para cada sensor. A frequência de corte aplicada para o módulo de sensores 1 foi de 700Hz, tanto para o sensor TPS como o MAP, sendo que no módulo de sensores 2 o filtro aplicado foi na ordem dos 10Hz.

Posteriormente a esta fase é aplicado um filtro por software (média e filtro FIR) sendo cada um dos valores dos respetivos sensores enviado a uma frequência necessária para a execução do algoritmo. O módulo de sensores 1 envia os respetivos valores a 300Hz, o módulo de sensores envia a 5 Hz e o módulo PLM a 10 Hz.

Nas figuras abaixo é apresentam-se as respetivas mensagens CAN de cada um dos módulos de sensores. O módulo de sensores 1 envia uma mensagem principal de oito bytes, sendo que cada variável possui uma dimensão de dois bytes. Envia nos primeiros quatro bytes o valor de cada um dos sensores, nomeadamente TPS e MAP, divididos nos oito bits mais significativos, assim como os respetivos valores e tensão de 0V a 5V (também divididos em dois bytes).

A mensagem do módulo de sensores 2 é constituída da mesma forma que o modulo acima descritos sendo que neste caso o valor dos sensores enviados é do ET e AT respetivamente.

Por sua vez o modulo PLM efetua aquisição dos valores BAT e Lambda, sendo que a sua mensagem possui 4 bytes de tamanhos nos quais os dois primeiros bytes são para o valor de BAT e os 3e 4 para o valor de lambda, ambos divididos em dois bytes para cada variável. No bytes 4 e 5 envia parâmetros de diagnostico que permite verificar qual o estado de sensores, se esta frio ou em temperatura de funcionamento assim como situações de erro do sensor.

Como vai ser discriminado abaixo cada um dos valores de sensores vai possuir uma função no algoritmo de controlo (processado pelo módulo de calculo), nomeadamente compensações de combustível e ignição.

0x30	8	TPS_H (%)	TPS_L (%)	MAP_H (KPa)	MAP_L (KPa)	TPS_H (V)	TPS_L (V)	MAP_H (V)	MAP_L (V)
ID	Len	Byte 0	Byte 1	Byte 2	Byte 3	Byte 4	Byte 5	Byte 6	Byte 7

Tabela 1 – Mensagem CAN do módulo de sensores A.

0x40	8	ET_H (°C)	ET_L (°C)	AT_H (°C)	AT_L (°C)	ET_H (V)	ET_L (V)	AT_H (V)	AT_L (V)
ID	Len	Byte 0	Byte 1	Byte 2	Byte 3	Byte 4	Byte 5	Byte 6	Byte 7

Tabela 2 - Mensagem CAN do módulo de sensores B.

0x30	6	LAM_H (lamb)	LAM_L (lamb)	BAT_H (V)	BAT_L (V)	DIAG_H (dec)	DIAG_L (dec)	N/A (-)	N/A (-)
ID	Len	Byte 0	Byte 1	Byte 2	Byte 3	Byte 4	Byte 5	Byte 6	Byte 7

Tabela 3 – Mensagem CAN do PLM.

Sensores

Neste subcapítulo vão ser apresentados os diferentes sensores instalados no motor acima apresentado, assim como as principais características e método de funcionamento. De referir que os sensores utilizados vinham originalmente instalados no motor, à exceção daqueles que tiveram de ser acrescentados.

Sensor TPS

Trata-se de um sensor da marca Ford e referência 95BF 9B989 DA, possui três terminais de acesso (alimentação, massa e sinal) e apresenta uma resistência entre os pinos de alimentação de 3770 Ohm, cujo valor máximo (borboleta aberta) é de 3600 Ohm e mínimo (borboleta fechada) de 820 Ohm.

Este sensor tem como principal função determinar a posição da borboleta de admissão servindo assim como principal método de medição de carga do motor. Trata-se de um sensor do tipo resistivo com um princípio de funcionamento idêntico a um potenciômetro. Recebe a alimentação por parte da EMS1 (5V), efetua a divisão de tensão entre o pino de resistência fixa e resistência variável, encontrando-se o resultado lido pela EMS1 numa gama entre 0V a 5V (equivalente à posição da borboleta).



Figura 5.5 - Sensor TPS utilizado.

Sensor MAP

Trata-se de um sensor da marca Bosch e referência 0 281 002 119, possui três terminais de acesso (alimentação, massa e sinal) cujo método de medição funciona por intermédio de um princípio de transdução piezoresistivo, proporcional ao valor da pressão medida. Este sensor tem como principais características, medição de pressão absoluta até 250KPa, um tempo de resposta inferior a 10ms, funcionamento numa gama de temperaturas de -40° e 120°, sendo alimentado a 5V.

Possui um diafragma interno que é deformado pela depressão sentida no coletor de admissão. Consoante essa deformação haverá uma alteração do elemento piezoresistivo que por intermedio do circuito electrónico interno (ponte "wheatstone") irá fazer variar a tensão de saída. Apresenta como principal função determinar a pressão no coletor de

admissão servindo assim como principal método de compensações nas variações de carga. Recebe a alimentação por parte da EMS (5V), que com base no valor de pressão medido, apresenta um valor de saída numa gama entre 0V a 5V.



Figura 5.6 - Sensor MAP utilizado

Sensor de temperatura do motor

Trata-se de um sensor da marca Ford e referência 91AB 10884 AA, possui dois terminais de acesso (acesso à resistência interna) e apresenta uma resistência entre os pinos de aproximadamente 750 Ohm à temperatura ambiente de 20°.

Apresenta uma curva de resposta não linear sendo vulgarmente denominado de NTC dado a sua resistência interna diminuir com o aumento da temperatura.

Este sensor tem como principal função a medição da temperatura do líquido de refrigeração do motor sendo esse valor posteriormente utilizado como fator de compensação nos diversos mapas de injeção de combustível e avanço de ignição.

Por exemplo este sensor permite compensar a menor eficiência e maior atrito do motor para temperaturas menores, permitindo acelerar o seu processo de aquecimento para a temperatura normal de funcionamento. 90°.



Figura 5.7 - Sensor ET utilizado

Sensor de temperatura do ar admitido

Trata-se de um sensor da marca Bosch e referência 0 280 130 085, possui dois terminais de acesso (acesso à resistência interna) e apresenta uma resistência entre os pinos de aproximadamente 2500 Ohm à temperatura ambiente de 20°.

Tal como o sensor de temperatura também este possui uma curva característica não linear e se trata de um sensor do tipo NTC, sendo que neste caso a sua curva característica é conhecida.

Este sensor tem como principal função a medição da temperatura do ar admitido no motor sendo esse valor posteriormente utilizado como fator de compensação nos diversos mapas de injeção de combustível e avanço de ignição.

Tal como o sensor de temperatura este também possui uma curva característica não linear e se trata de um sensor do tipo NTC.

Por exemplo este sensor permite compensar a quantidade de combustível (retira combustível) a injetar nas situações em que a temperatura do ar admitido é superior, ou seja apresenta uma menor densidade.

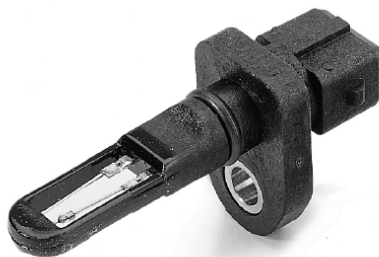


Figura 5.8 – Sensor AT utilizado

Sensor Lambda

Trata-se de um sensor da marca Bosch e referência LSU 4.2 vulgarmente denominado de sensor lambda “wideband”, por ter a capacidade de medir este valor numa zona mais ampla do que a estequiométrica.

Este sensor tem como função medir a concentração de oxigénio presente nos gases de escape de forma a ser possível monitorizar o estado da mistura, permitindo uma afinação

ideal do motor, ao mesmo tempo que permite tirar conclusões quanto ao estado do sistema de injeção, ignição entre outros.

Este sensor encontra-se ligado diretamente ao PLM sendo que tanto a alimentação, gestão do elemento resistivo e todo o condicionamento de sinal são realizados internamente. Posteriormente o valor lambda pode ser lido numa gama de tensão de 0V a 5V ou via barramento CAN.



Figura 5.9 – Sensor lambda Bosch LSU 4.2

4.6.1 Tabelas de caracterização dos sensores

Como referido anteriormente existem sete principais sensores que são essenciais para permitir um controlo suave e eficiente do motor, que são o TPS, MAP, ET, AT, lambda, referência a sincronismo. Cada sensor possui uma curva característica de calibração do mesmo e que tem como função permitir associar um determinado valor analógico (lido pelo ADC dos módulos de sensores) com uma grandeza física.

Um exemplo disto é a associação de uma determinada tensão (0V a 5V) a uma percentagem de abertura do sensor TPS (0% a 100%).

Estas tabelas podem possuir um tamanho de colunas/células variável, que depende da resolução pretendida para cada sensor assim como da importância do mesmo na estratégia de controlo, sendo compostas por duas linhas em que uma delas é o valor da grandeza digital e a outra o valor da grandeza física real. Neste caso optou-se por atribuir um tamanho de dezassete células possíveis de preenchimento para todos os sensores utilizados.

Por exemplo no caso de um sensor MAP este possui um “datasheet”, no qual apresenta uma equação que relaciona a curva da pressão em KPa e a tensão medida, sendo que após o cálculo de alguns pontos da curva de medição estes podem ser posteriormente preenchidos na tabela.

O módulo dos sensores responsável por determinado sensor irá medir uma determinada tensão, interpolar o valor da mesma no sentido de perceber, por exemplo qual a pressão medida no coletor de admissão, e enviar o valor da mesma via CAN.

Ainda que existem outros métodos de caracterização de sensores utilizados por diferentes unidades OEM ou de competição este método permite grande flexibilidade e simplicidade de configuração, no tipo de curva a calcular/medir, assim como no tipo de sensor disponível para utilização.

Calibração do TPS

Na imagem XX encontra-se a janela principal referente à calibração do sensor TPS na qual é possível verificar os botões de calibração (elipse azul) do mesmo assim como a sua tabela de caracterização e o gráfico 2D correspondente.

Devido ao facto dos sensores de TPS normalmente apresentarem uma de medição linear e dada a importância deste sensor nos cálculos de combustível (método de cálculo da carga do motor), este possui um método de calibração adicional que difere dos demais sensores.

Este consiste na calibração prática do sensor e no qual colocamos o sensor na posição máxima e carregamos no botão “Calibration 100%” permitindo ao módulo de sensores ler o valor em tensão referente àquela posição da borboleta. O mesmo é feito para a borboleta fechada sendo que aí se carrega no botão “Calibration 0%”. Ambos os valores são guardados na EEPROM da EMS, e permitem que esta calcule internamente uma curva proporcional para os restantes valores de abertura da borboleta.

Apesar de este método ser fácil e rápido de aplicar neste sensor que necessita de frequentes calibrações, é ainda possível utilizar o método de preenchimento manual dos valores de forma idêntica aos restantes sensores, para as situações em que a sua curva não seja linear.

5.3.2. Módulo Atuadores (C e D)

Para o controlo dos atuadores do motor utilizaram-se dois módulos de atuadores. O primeiro módulo (módulo atuadores 1) encontra-se responsável pelo controlo dos dois relés do sistema, nomeadamente o relé da bomba de combustível e o relé da ventoinha do motor. O outro módulo (módulo atuadores 2) ficou responsável pelo controlo da electroválvula de ralenti assim como pelo controlo do tacómetro.

Como foi apresentado no subcapítulo acima, estes dois reles são alimentados quando se liga a ignição sendo que o seu controlo é realizado através de ligação à massa através do driver do tipo low-side, que de resto foi utilizado para o controlo de todos os módulos de atuadores.

Excetuando o tacómetro, que foi adiciona à parte, tanto os relés como a electroválvula de ralenti, foram incorporado na cablagem de interligação entre o motor e a placa protótipo, consoante o número de pinos necessário para o conjunto de atuadores.

Nas figuras abaixo é apresentam-se as respetivas mensagens CAN de cada um dos módulos de atuadores.

O módulo de atuadores 1 envia uma mensagem principal de quatro bytes cujos dois primeiros bytes constituem o estado (on-off) do primeiro relé e os bytes 3 e 4 o estado do segundo relé.

O módulo de atuadores 2 envia uma mensagem principal de quatro bytes cujos dois primeiros bytes constituem o duty-cycle (%) de controlo da electroválvula de ralenti e os 3º e 4º bytes o valor da frequência de controlo aplicada ao tacómetro. Devido ao facto de a frequência ser fixa para o primeiro atuador e o duty-cycle fixo para o segundo.

Este efetua constantes leitura ao barramento CAN nomeadamente a uma frequência ade 200Hz na qual deteta o estado o valor de sensores e com base nesse valor e na interpolação internas das tabelas efetua o controlo dos mesmos.

O valor pretendido para determinado atuador pode ser enviado diretamente para este módulo via CAN (de forma esporádica) ou pode ser calculado internamente a uma frequência de 200Hz em função de outras variáveis presentes no barramento (tal como temperatura do motor ou RPM).

É possível definir uma curva de funcionamento para cada atuador em tempo real, possibilitando assim uma grande flexibilidade na estratégia de controlo. Valores como frequência de funcionamento ou duty-cycle desejado, para uma determinada temperatura podem ser configurados.

0x51	4	AUX0D_H (%)	AUX0D_L (%)	AUX1F_H (Hz)	AUX1F_L (Hz)	N/A (-)	N/A (-)	N/A (-)	N/A (-)
ID	Len	Byte 0	Byte 1	Byte 2	Byte 3	Byte 4	Byte 5	Byte 6	Byte 7

Tabela 4 – Mensagem CAN do módulo C.

0x61	4	AUX0S_H (s)	AUX0S_L (s)	AUX1S_H (s)	AUX1S_L (s)	N/A (-)	N/A (-)	N/A (-)	N/A (-)
ID	Len	Byte 0	Byte 1	Byte 2	Byte 3	Byte 4	Byte 5	Byte 6	Byte 7

Tabela 5 – Mensagem CAN do módulo D.

Atuador de controlo de ralenti

Na figura abaixo é possível observar a electroválvula de controlo do ralenti e respetiva instalação no motor. Esta é original da Ford com a referência 95WF-9F715-AC, possui dois terminais de acesso (alimentação e massa) e uma resistência interna de 9.6 ohms.

Esta tem como principal tarefa regular a quantidade de ar admitida no motor quando a borboleta está fechada. Este ar admitido de forma paralela à borboleta permite, juntamente com uma quantidade de combustível e avanço de ignição, manter uma determinada velocidade do motor.

Esta é controlada por largura de pulso modulada (PWM), a uma frequência constante, cujo ciclo de trabalho (duty-cycle) permite definir a percentagem de abertura. Tal como para os injetores, o driver implementado permitindo fechar o circuito à massa

Este juntamente com as diferentes tabelas de compensação permitiu estabilizar o ralenti para as diferentes condições de carga, oscilações da tensão da bateria, aumento da temperatura do motor, ventilador, etc.

Durante a calibração do atuador foi possível recorrer ao parafuso presente no corpo da borboleta (impedindo de a fechar totalmente) para permitir manter o motor estável ao ralenti. Esta ajuda no entanto não permite compensar temperatura do motor entre outras.



Figura 5.10 – Atuador *ralenti*

Configuração dos atuadores

No arquitetura implementada existem quatro atuadores elétricos, dois relés, mais precisamente o relé da ventoinha de arrefecimento do motor e o relé da bomba de combustível. Os outros dois são a electroválvula do controlo de ralenti e o tacómetro responsável por mostrar a RPM do motor.

No caso dos relés com o seu controlo ON-OFF “existem” uns parâmetros de configuração singulares. No caso do relé da bomba é possível configurar o tempo que a bomba permanece ativa após ser ligado o interruptor de ignição sendo que após esse tempo irá desligar caso a EMS não detete RPM do motor. Para o relé da ventoinha do motor, este possui a configuração da temperatura em que fica ativo assim como a temperatura em que ele volta a ser desativado, acrescentando-se a este o tempo que ele pode ficar ligado mesmo que se pare o motor (objetivo de arrefecer o motor em situação de paragem com temperaturas elevadas e prejudiciais).

Para o caso do atuador do ralenti existem parâmetros de configuração singulares como a frequência de controlo, RPM ou TPS a partir do qual o atuador é ativo/desativo assim como o “duty-cycle” máximo e mínimo de funcionamento. Para além disto existe uma tabela de controlo para a posição base do mesmo, tendo esta a dimensão de 6x6 em que o eixo horizontal é o valor da temperatura do motor e o eixo vertical o da RPM. Relativamente ao tacómetro é possível configurar o “duty-cycle” de controlo assim como um multiplicador da frequência da RPM.

Controlo do ralenti

Intrinsecamente ao atuador de ralenti encontra-se a própria estratégia de controlo e que desempenha um papel importante no bom funcionamento do motor. Para isto foram implementadas duas tabelas 1D com onze células cada e cujo eixo horizontal de

interpolação é a percentagem de “duty-cycle”. Uma das tabelas preenche-se com o valor de combustível injetado enquanto a outra com o avanço de ignição, compensando assim pequenos ajustes essenciais na variação da passagem de ar ao ralenti. Devido ao facto de ter sido implementado um controlo PID também os valores de configuração associados se encontram junto a estas tabelas. Estes são nada mais que o ganho P, I, D, frequência de execução do próprio PID, valores máximo e mínimo de integração, que juntamente com a tabela 2D do atuador (acima apresentada) e os valores de injeção e ignição permitem um controlo mais adequado do ralenti.

5.3.3. Módulo Motor (F)

Para controlo deste motor, apenas foi necessário a incorporação de um módulo de motor devido ao facto de este ter a capacidade de controlar quatro injetores de forma independente (injeção sequencial) e duas bobinas de ignição (ignição agrupada). Efetua a aquisição e condicionamento do valor do sensor de referência e sincronismo, sendo eles do tipo indutivo e de efeito Hall respetivamente.

Relativamente aos sensores e atuadores, ambos encontravam-se previamente instalados no motor tendo sido desenvolvida a cablagem de potência (atuadores) e de sinal (sensores) de forma separada. Neste caso cada sensor possui o seu próprio conector assim como cada tipo de atuador, estando estes posicionalmente afastados de forma intencional.

Em ambos os sensores o filtro por hardware (passa baixo) foi adaptado conforme a gama de leitura indicada/necessária para os mesmos. A frequência de corte aplicada para ao sensor de sincronismo foi de 200Hz, ao passo que para o sensor de referência foi de 10000Hz. Isto deveu-se à gama de rotação do motor e respetivo número de dentes associados a cada sensor.

Na figura abaixo é possível verificar a respetiva mensagem CAN enviada pelo módulo do motor. Este envia a mensagem principal a uma frequência de 1000Hz com um tamanho de oito bytes, sendo cada uma das variáveis constituída por dois bytes, tal como módulos acima apresentados.

Nos primeiros dois bytes, é enviado o valor de PRM do motor, essencial na atualização dos valores de combustível e ignição, e nos 2º e 3º bytes é enviada a posição do motor de 0º a 720º. Por sua vez no 4º e 5º byte é enviado o tempo de cada dente, em microssegundos,

para cada instante ficando os últimos dois bytes referentes às variáveis de diagnóstico associado ao sincronismo do motor. Esta mensagem de diagnóstico é composta por dezasseis bits em que cada um está associados a cada erro, estando a zero para erro ativo ou a um em caso de erros não detetado.

Por exemplo informações como motor corretamente sincronizado ou não, valores máximos de tempo de injeção ou avanço de ignição atingido, erros nos diferentes sensores entre outros.

0x30	8	RPM_H (%)	RPM_L (%)	PMo_H (KPa)	PMo_L (KPa)	TD_H (V)	TD_L (V)	GE_H (V)	GE_L (V)
ID	Len	Byte 0	Byte 1	Byte 2	Byte 3	Byte 4	Byte 5	Byte 6	Byte 7

Tabela 6 – Mensagem CAN do módulo F.

Sensor de sincronismo

Trata-se de um sensor da marca Honeywell e referência 1GT101DC, possui três terminais de acesso (alimentação, massa e sinal), assim como capacidade de medição até 10KHz, gama de funcionamento entre -40° e 150° e flexibilidade na tensão de alimentação utilizada (4.5V e 20V). Trata-se de um sensor de efeito de Hall com saída em coletor aberto e é alimentado a 5V por parte da EMS1. Durante a passagem do dente da árvore de cames, o sinal digital vai a zero (durante o tempo de passagem do dente) retornado posteriormente a cinco, sinalizando a passagem do dente.

Este sensor, juntamente com o dente instalado na árvore de cames, tem objetivo determinar o momento em que o 1º cilindro está na fase de PMS de ignição. O sinal proveniente do dente d árvore de cames acontece 120° antes do PMS. Isto permite à EMS saber qual posição absoluta do motor, sincronizando assim o controlo eletrónico com a mecânica do motor.



Figura 5.11 - Sensor de sincronismo utilizado.

Sensor de referência

Na figura abaixo é possível observar o sensor de referência utilizado (a) e respectiva instalação no motor (b). Trata-se de um sensor da marca Ford e referência 95BF-12K073AB, possui dois terminais de acesso (massa e sinal) e uma resistência interna de 450 Ohm. Este tem como função, juntamente com uma roda dentada de 60 dentes e duas falhas, indicar (ao detetar a falha) que par de cilindros se encontra no ponto morto superior.

O sinal proveniente deste sensor juntamente com o sinal do sensor de sincronismo (acima apresentado) permite à EMS saber qual posição exata do motor, realizando assim o processo de sincronização do motor. A falha da roda dentada utilizada encontra-se 84° antes do PMS.



Figura 5.12 - Sensor de referência utilizado.

Um dente por cada ciclo de motor, ou seja duas voltas do motor. Dente aproximadamente 120 ° antes do PMS A falha ocorre 84° antes do PMS

Esta configuração de roda dentada de 60 dentes com 2 falhas na cambota e 1 dente na árvore de cames, vai permitir aos sensores de referência e sincronismo efetuarem o controlo deste motor de forma sequencial, ou seja saberem exatamente a posição de cada cilindro ao longo dos respetivos ciclos. Isto possibilitará a sincronização mecânica do motor com o controlo eletrónico dos injetores e bobines, através da menor latência possível, traduzindo-se num controlo mais suave e eficiente do motor.

Filtro dos sensores de referência e sincronismo

No caso dos sensores de referência e sincronismo, estes não possuem curvas de caracterização porque o seu tipo é digital em que a sua frequência depende do número de dentes e do tipo de roda dentada sendo este sinal proporcional à velocidade de rotação do próprio motor em si.

Apesar disso existem, duas curvas de configuração que servem para filtrar o ruído proveniente de outras fontes de emissão eletromagnética e que provocam dentes fantasmas de forma esporádica induzindo com isso erros no sincronismo do motor (medição da posição), erros na leitura da RPM e déficit no controlo do mesmo.

As tabelas possuem em ambos os casos seis células sendo que o valor preenchido é o tempo em microssegundos e a grandeza física de interpolação a RPM das 0 às 10000.

O preenchimento destas curvas permitem que a EMS saiba que naquela determina RPM um determinado pulso digital proveniente do sensor (passagem de um dente) só poderá ocorrer determinado tempo depois da ocorrência do anterior, descartando por isso todos os pulsos antes de esse tempo acabar.

Injetores

Os injetores utilizados são da marca Ford com a referência O95WF-9F593-AC e podem ser observados nas figuras abaixo. Possuem dois terminais de acesso, sendo eles a alimentação e a massa. Os injetores são os atuadores responsáveis pela injeção do combustível no coletor de admissão para, juntamente com o ar admitido, serem utilizados no processo de combustão.

A simplicidade do driver de injetores usado (low-side) deveu-se ao fato de estes serem de alta impedância, nomeadamente cerca de 14.3 ohms, sendo que um controlo em corrente ou o uso de resistências externas de potência não foi necessário.

Do ponto de vista da ligação mecânica, nomeadamente linha de combustível, bomba de baixa pressão, assim como regulador de pressão foram mantidos como de origem, sendo que a pressão da régua de injeção é calibrada pelo regulador a um máximo 300 KPa e compensada pelo vácuo do sistema de admissão do motor.

O sistema de ignição utilizado é o original do motor e denomina-se por injeção sequencial em que cada injetor possui um driver individual, cuja ordem de injeção é de 1-3-4-2.

Bobines de ignição

Na figura abaixo é possível observar as bobines de ignição utilizada e respetiva instalação no motor. Estas são produzida pela Motorcraft com a referência 95WF-12029-BA, possuem dois terminais de acesso (alimentação e massa), uma resistência do primário de 0.8 ohms e do secundário de 13.30 ohms, também eles controlados por um driver do tipo *low-side*

As bobines de ignição tem como função criar a energia necessária para, que através da vela, se produza uma faísca essencial para iniciar o processo de combustão da mistura de ar/combustível. O sistema de ignição utilizado é o original do motor e trata-se de um sistema denominado por faísca perdida em que existe duas bobines para quatro cilindros, ou seja cada bobine liga diretamente a duas velas nomeadamente ao conjunto dos cilindros 1-4 2-3. A ordem de ignição é de 1-3-4-2.



Figura 5.13 - Bobines de ignição utilizadas.

5.3.4. Módulo Cálculo (E)

Neste tipo de arquitetura existe apenas a necessidade de utilização de um módulo de cálculo. Este módulo é o principal responsável pela gestão do algoritmo de controlo da arquitetura desenvolvida. Recebe os diferentes valores provenientes dos sensores tais como carga, rotação ou temperatura do motor (proveniente dos módulos de sensores), calcula qual o valor necessário de combustível e ignição essenciais para o funcionamento do motor, enviando posteriormente (para o modulo do motor) os valores via CAN bus. Serve também como interlocutor entre o computador e o programador do sistema através de uma ligação USB, armazenando todos as tabelas/mapas de calibração/confirmação do sistema. Por não possuir nem sensores nem atuadores ligados diretamente, apenas necessita de

um conector para acesso aos condutores de alimentação e ao barramento CAN, assim como um cabo de comunicação USB.

Nas figuras abaixo apresentam-se as respectivas mensagens CAN referentes ao módulo do motor. Este envia três mensagens principais duas das quais a uma frequência contante de 1000Hz e outra durante o processo de inicialização do sistema. Todas as variáveis enviadas possuem dois bytes de tamanho estando divididas em mais e menos significativos, tal como nos módulos acima apresentados. As diferentes mensagens principais são utilizadas pelo módulo de motor.

A primeira mensagem enviada possui um tamanho de quatro bytes, dos quais os primeiros dois são referentes ao valor do filtro de ruído associado ao sensor de referência (REFT) e os últimos dois referentes ao sensor de sincronismo (SYNCT) em microssegundos. É na segunda mensagem (tamanho de oito bytes) que se encontram os valores de combustível a injetar em microssegundos (TINJ), o avanço de injeção em graus (AINJ), assim como o avanço de ignição em graus (AIGN) e o dwell em milissegundos (DIGN). Durante a inicialização do módulo este envia diretamente para o módulo do motor, o valor do avanço de ignição durante o arranque (IGNA), o valor da primeira injeção (PINJ) assim como o limite de rpm a ser utilizado (RPML).

0x30	4	REFT_H (us)	REFT_L (us)	SYNCT_H (us)	SYNCT_L (us)	N/A (-)	N/A (-)	N/A (-)	N/A (-)
ID	Len	Byte 0	Byte 1	Byte 2	Byte 3	Byte 4	Byte 5	Byte 6	Byte 7

Tabela 7 – Mensagem CAN 1 do módulo F.

0x30	8	TINJ_H (us)	TINJ_L (us)	AINJ_H (°)	AINJ_L (°)	AIGN_H (°)	AIGN_L (°)	DIGN_H (us)	DIGN_L (us)
ID	Len	Byte 0	Byte 1	Byte 2	Byte 3	Byte 4	Byte 5	Byte 6	Byte 7

Tabela 8 - Mensagem CAN 2 do módulo F.

0x30	6	IGNA_H (°)	IGNA_L (°)	PINJ_H (us)	PINJ_L (us)	RPML_H (rpm)	RPML_L (rpm)	N/A (-)	N/A (-)
ID	Len	Byte 0	Byte 1	Byte 2	Byte 3	Byte 4	Byte 5	Byte 6	Byte 7

Tabela 9 - Mensagem CAN 3 do módulo F.

Mapas de injeção de combustível

Derivado das diversas e correlações entre parâmetros e condicionantes de afinação existentes quando se desenvolve um sistema de gestão eletrónica de um motor de combustão interna, optou-se por aplicar um controlo de combustível idêntico ao de diversas unidades de competição automóvel. Este apresenta grande flexibilidade e facilidade de configuração e denomina-se ALPHA-N, sendo que os variados mapas que o constituem se apresentam neste subcapítulo.

Na equação abaixo é possível observar as principais equações relacionada com o cálculo de combustível a injetar (CI) em milissegundos, cujas parcelas da equação serão apresentados ao longo da descrição dos diferentes mapas.

Este é essencialmente composto pela multiplicação do pulso base de injeção (PB) com o somatório da percentagem do valor do mapa principal com as diferentes compensações (CT). A este valor é somado o valor da compensação da bateria (CBAT) em milissegundos juntamente com a compensação de aceleração (FACE) e desaceleração (FDES). Por sua vez as compensações genéricas que também são em percentagem do valor do pulso base (PB) são compostas pela compensação do sensor AT, compensação do sensor ET, compensação do sensor MAP juntamente com as compensações de arranque e pós-arranque. Relativamente ao valor de avanço este é composto pelo valo de avanço de injeção base (AIB) mais o somatório da compensação em função do sensor ET (AIET). Em graus antes do PMS.

Este computação do valor de combustível a injetar é realizada a 2000Hz sendo que para o motor em questão e admitindo um valor máximo de 7500 RPM para o motor em questão temos 250 ciclos de motor por segundo, ou seja mas que necessário.

$$\text{Equação (1) } CI \text{ (ms)} = PB * (MP + CT) + CBAT + CACE + CDES$$

$$\text{Equação (2) } TRIMC \text{ (\%)} = CG + CA + CP + CET + CAT + CMAP$$

$$\text{Equação (3) } CACE \text{ (ms)} = CAC * CAS * CAD + CACT$$

$$\text{Equação (4) } CDES \text{ (ms)} = CDC * CDS * CDD$$

$$\text{Equação (5) } AI \text{ (}^\circ\text{)} = AIB + AIET$$

Pulso de injeção Base

Criou-se um parâmetro singular denominado de pulso de injeção base (IJPU) que serve como valor base de injeção (em milissegundos) referente a cada motor, e a partir do qual todos os valores existentes nos mapas são uma percentagem de combustível posteriormente multiplicada por este IJPU.

Mapa principal de combustível

Este mapa é o principal no que diz respeito à afinação do combustível, pois permite injetar uma determinada quantidade de combustível proporcional ao ar admitido no motor para as diferentes cargas e velocidades em que este se encontre.

Relativamente ao mapa principal de injeção este possui uma dimensão de onze linhas por dezassete colunas sendo que a variável de interpolação do eixo vertical é o valor de TPS e o do eixo horizontal o valor de RPM do motor. O valor combustível injetado para cada rpm assim como carga do motor encontra-se em percentagem sendo os valores intermédios calculados por interpolação. Como se pode verificar pela figura abaixo a resolução o mapa implementado possui uma resolução em que vai de 0% a 100% de TPS em intervalos de 10% e a RPM de 0 a 8000 com intervalos de 500 RPM.

Mapa de avanço de injeção

Este mapa tem como objetivo definir o avanço de injeção, neste caso o fim de injeção relativamente ao ponto morto superior do motor, permitindo definir um melhor processo atomização da mistura ar/combustível com base na velocidade do motor. É composto tal como o mapa principal de dezassete células em que o eixo horizontal de interpolação é a RPM das 0 às 8000 em intervalos de 500 RPM.

Compensações de combustível injetado com base nos sensores

Existem mapas de compensação de combustível injetado em função da temperatura do motor, temperatura do ar e pressão de admissão. Estas compensações visam ajustar o valor de combustível injetado em função de cada um dos sensores referidos anteriormente permitindo assim um melhor funcionamento do motor. Para o sensor AT o mapa possui um tamanho de cinco células e vai dos -20° aos 60°, para o ET possui oito células e vai

dos -20° aos 120° , sendo que para ambos os casos em intervalos de 20° . Para o sensor MAP este possui quatro células indo dos 0KPa aos 300 KPa.

Por exemplo no caso do sensor de temperatura do motor, a compensação é de elevada importância pois em caso de o motor estar frio (exemplo a 20°) é possível adicionar na respectiva célula um valor de combustível em percentagem mais elevado que na células dos 80° e assim permitir ao motor um arranque a frio mais estável e suave.

Compensações de combustível injetado com base na tensão da bateria

Esta compensação serve como um acréscimo ao valor base de injeção e que tem como objetivo compensar o tempo morto dos injetores, que é o tempo que o injetor demora a iniciar a injeção após receber o impulso elétrico proveniente da EMS. Este tempo está relacionado com a construção mecânica do próprio injetor e é indiretamente proporcional à tensão da bateria.

Ou seja, iniciado o sinal da EMS para o injetor, a injeção só irá ocorrer determinado tempo (milissegundos) após esse sinal, tempo esse que tende a aumentar quanto mais baixa for a tensão da bateria.

Este mapa possui dezassete células sendo o eixo horizontal a tensão da bateria dos 8V aos 16V em intervalos de 0.5V. O valor preenchido encontrasse em milissegundos e é somado (não uma percentagem) ao valor do cálculo de combustível.

Compensações de combustível injetado durante o arranque

Durante o arranque e no momento imediatamente a seguir é necessário injetar um determinado valor de combustível a mais na tentativa de evitar que o motor fique demasiado tempo nessa condição de funcionamento instável, devido à menor eficiência e maiores atritos.

Para colmatar essa situação foram criados a mapa de compensação durante arranque e o de compensação após arranque, sendo ambos 2D e com uma dimensão de 6x6, como se pode verificar pela figura abaixo. Ambos possuem no eixo vertical a temperatura do motor do 0° ao 100° em intervalos de 20° e no eixo horizontal o tempo em segundos dos 0s aos 20s em intervalos de 2s.

A principal diferença entre os mapas reside no facto de um começar quando o outro acaba, sendo que a condição de início/paragem dos mesmos é a RPM, neste caso 600 RPM, a partir da qual se considera que o motor está ao “ralenti” ou ainda no arranque. Também o valor da primeira injeção pode ser definido para que no primeiro ciclo do motor este possua mais facilidade de arranque.

Combustível durante Aceleração

Esta compensação existe tanto para situações de aceleração como desaceleração do motor, sendo que os mapas constituintes são equivalente para ambas as situações. Esta compensação é extremamente importante essencialmente durante aceleração pois durante esta fase e aquando de uma rápida abertura da borboleta existe uma elevada tendência do motor para admitir uma maior quantidade.

Este excesso de ar não instantâneo não é compensado pelos mapas principais pois estão afinados para condições de carga e velocidade estacionárias, provocando assim uma mistura no pobre no interior do cilindro e uma instabilidade e perda de binário por parte do motor.

Para tal foram criados um conjunto de mapas relacionados entre si em que a integração dos mesmos irá permitir a compensação desta fase de funcionamento do motor, sendo eles o mapa de compensação de acréscimo máximo (“CAC”), o mapa de ajuste da sensibilidade (“CAS”), o mapa de decréscimo (“CAD”), e o mapa de acréscimo em função da temperatura (CACT).

O “CAC” é um mapa 1D composto por sete células cujo eixo horizontal é o valor da variação do TPS num determinado intervalo de tempo e que vai de 0% a 12.5% em intervalos de 1.25%. O “FAS” é um mapa 2D de dimensão 7x7 cujo eixo vertical de interpolação é o TPS de 0% a 60% em intervalos de 10% e o eixo horizontal a RPM de 0 a 6000, em intervalos de 1000 RPM.

Por sua vez o “CAD” e “CACT” são ambos mapas 1D compostos por sete células cujos eixos horizontais são o valor da RPM de 0 a 6000 assim como o valor do ET de 0° a 100° respetivamente.

Inicialmente uma variação brusca da borboleta irá provocar uma percentagem de variação do TPS sendo este valor posteriormente usado como valor de entrada na tabela “CAC” e que resultará na computação de um valor máximo de combustível a injetar para aquela aceleração.

A este valor em milissegundos será somado o valor do “CACT” no sentido de compensar para o facto de ser necessário ainda mais combustível para compensar a aceleração quando o motor está frio.

A soma do valor “CAC” com o “CACT” é seguidamente usado como valor de entrada na tabela de sensibilidade que ajustará este valor percentualmente em função da carga e rotação a que se encontra o motor.

Este valor final da aceleração será então introduzido no cálculo total do combustível a injetar nos próximos ciclos de combustão sendo depois retirado gradualmente com base na rotação do motor e em função do mapa de decréscimo.

Existem no entanto situações em que não se pretende que uma variação da borboleta provoque uma reação destes mapas sendo que para tal existe um valor de comutação abaixo do qual a compensação durante aceleração não ativará.

Mapas de avanço de ignição

Paralelamente ao combustível injetado, o avanço de ignição é o parâmetro de afinação mais importante num motor de combustão interna. Como o próprio nome indica este permite definir qual o ponto, relativamente ao ponto morto superior (TDC) do motor (normalmente antes) em que se deve dar a faísca para que a mistura de ar/combustível inicie o processo de combustão e produza um pico de pressão numa posição ótima do ciclo do motor (MBT), traduzindo-se assim num maior binário produzido. No subcapítulo que se segue serão apresentados os principais mapas de afinação do sistema de ignição.

$$\text{Equação (1) } AI^\circ = MP + CT + IACE + IDES$$

$$\text{Equação (2) } CT^\circ = CG + CET + CAT$$

$$\text{Equação (3) } IACEms = IAC * IAS * IAD + IACT$$

$$\text{Equação (4) } IDESms = IDC * IDS * IDD$$

$$\text{Equação (7) } TCms = TCB$$

Mapa principal de avanço de ignição

Este mapa é o principal no que diz respeito à afinação avanço de ignição, pois permite definir um determinado angulo em que se deve dar a faísca no interior do cilindro para as

diferentes condições de carga e velocidade em que este se encontra o motor. O valor avanço encontra-se em graus relativamente ao TDC sendo os valores intermédios calculados por interpolação.

Tal como o mapa de injeção principal este possui uma dimensão de onze linhas por dezassete colunas sendo que a variável de interpolação do eixo vertical é o valor de TPS e o do eixo horizontal o valor de RPM do motor.

Como se pode verificar pela figura abaixo a resolução o mapa implementado possui uma resolução em que vai de 0% a 100% de TPS em intervalos de 10% e a RPM de 0 a 8000 com intervalos de 500 RPM.

Tempo de carregamento das bobines

Na figura abaixo é possível observar o mapa responsável pelo tempo de carregamento das bobines de ignição, vulgarmente denominado por “dwell”. Este tempo de carregamento é importante pois permite definir a energia com a qual a faísca se propaga e inicia o processo de combustão, sendo que determinada bobine precisa de um tempo de carregamento específico tanto maior quanto menor a tensão da bateria.

O mapa de “dwell” é um mapa 1D composto por dezassete células cujo eixo horizontal é o valor da tensão da bateria de 8V a 16V em intervalos de 0.5V.

Compensações da ignição

Tal como para o combustível estes mapas de compensação de avanço têm como função ajustar o valor de avanço de ignição em função de determinados valores de sensores tal como o AT e o ET. Estas tabelas têm a mesma dimensão que as usadas pelos sensores referentes às compensações do combustível, sendo que em vez somarem uma percentagem de combustível somam o valor de graus presente nas mesmas ao valor total de ignição calculado. Durante o arranque do motor o valor de ignição é definido por um parâmetro específico (“ignição durante arranque”) ignorando assim qualquer valor proveniente dos mapas de ignição.

Ignição durante aceleração

A configuração implementada para compensar a ignição durante aceleração foi a mesma usada na injeção de combustível, sendo que neste caso o valor proveniente deste mapa se encontra em graus antes do PMS. Do ponto de vista de afinação do motor esta compensação possui menor importância, pelo menos para uma calibração base do motor.

6. Testes e Resultados

Neste capítulo vão ser apresentados e descritos os diversos testes realizados durante todo o processo de implementação da arquitetura desenvolvida. Primeiramente estes consistiram na validação do *hardware* desenvolvido tal como o circuito de alimentação, condicionamento de sinais, drivers de potência assim como o correto funcionamento dos conversores CAN.

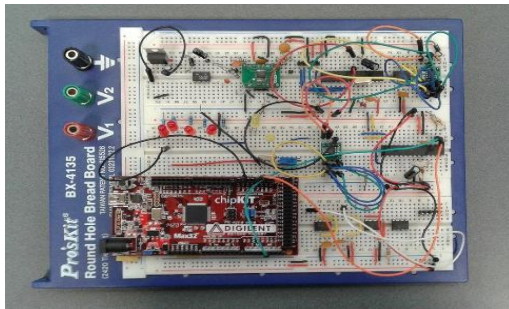
Posteriormente foi testado o firmware desenvolvido para os diferentes módulos, juntamente com os principais sinais de controlo, o processo de sincronismo do motor, a monitorização das mensagens CAN, respetivos cálculos efetuados pelo algoritmos e respetivos valores de injeção e ignição. Paralelamente foi-se procedendo à validação do *software* desenvolvido em Labview.

Por fim, e realizada a calibração do motor em banco de potência, realizaram-se testes dinâmicos ao mesmo, assim como medição das curvas de binário e potência com diferentes afinações dos mapas principais.

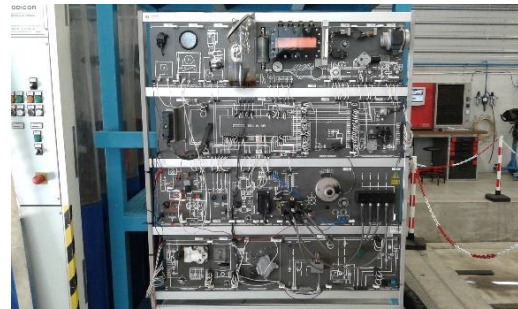
6.1. Metodologia de Desenvolvimento

O desenvolvimento deste trabalho passou por um conjunto de fases distintas desde a conceção teórica do projeto até às diferentes etapas de implementação prática. Isto teve como objetivo garantir níveis de fiabilidade, tanto de *hardware* e *software*, assim como níveis de confiança essenciais para o sucesso na implementação prática.

Inicialmente foi utilizado o simulador Ford VI no sentido de testar de forma individual os diferentes sistemas de gestão eletrónica a serem implementados, tal como aquisição de sensores, controlo de atuadores, interface gráfico implementado, evitando ao mesmo tempo recorrer à complexidade de um motor de combustão real.



(a)



(b)

Figura 6.1 - Desenvolvimento aos sistemas: (a) em bancada e (b) simulador Ford VI.

Feito isto passou-se para os testes no motor de combustão interna instalado num simulador. Esta fase de implementação foi crítica pois com a introdução do fator bateria, cargas elétricas, instalação elétrica, existe um grande aumento na quantidade de ruído eletromagnético no sistema desenvolvido, assim como o aumento da complexidade proveniente da junção total dos diferentes sistemas. Esta permitiu realizar a primeira calibração ao motor, tendo sido realizados testes iniciais de caracterização de sensores, atuadores, arranque do motor, estabilização do ralenti e afinações bases aos mapas de combustível e ignição.

Finalmente instalou-se o motor num veículo, permitindo assim uma afinação total em banco de potência e nas diversas condições dinâmicas do exterior. De realçar que num projeto deste tipo por vezes é impossível distinguir as diferentes etapas, sendo por vezes necessário voltar à fase de desenvolvimento no sentido de conseguir resolver determinados problemas detetados durante a implementação prática.



(a)



(b)

Figura 6.2 - Testes ao motor: (a) no simulador e (b) no veículo.

6.2. Equipamento Utilizados

6.2.1. Banco de ensaios

Como ferramenta principal de testes foi utilizado um banco de rolos Maha LPS 3000 – R100. Este possui dois dinamômetros elétricos que permitem testar até 260KW por eixo, em ensaio contínuo ou discreto com velocidades e cargas programáveis. Recorrendo ao auxílio de *software* específico este permite ensaiar/testar o motor em diferentes cargas e velocidades, utilizando assim toda a gama de funcionamento do motor. O banco conta com um ventilador direcionado para a frente do veículo que ventila ar a uma velocidade de 98Km/h.



Figura 6.3 - Maha LPS 3000 - R100.

6.2.2. Validação e Calibração do motor

O equipamento utilizado na medição das concentrações de CO, HC, CO₂, NO_x e O₂ foi o Bosch BEA 250. Este efetua a medição por análise não dispersiva de infravermelhos. Para além disto este equipamento tem a capacidade de medir o valor Lambda, recorrendo à mostragem dos valores através de um display. Por outro lado a Bosch FSA 720 é um sistema completo com diferentes módulos de medição e um *software* flexível. Este vem equipado com um osciloscópio e um conjunto de pontas de medição que permite um diagnóstico/teste profundo aos sistemas de gestão eletrónico

presentes no mercado. Neste caso permite detetar o sincronismo do motor e ver os sinais das bobinas de injeção e ignição durante todo o ciclo do motor. Isto permite verificar inicialmente se o sistema de controlo desenvolvido é capaz de funcionar sem falhas e depois iniciar a calibração do motor.

Também foi utilizada uma pistola estroboscopia digital com o intuito de verificar o avanço de ignição durante arranque assim como medição da rotação do motor. Foi utilizado um equipamento de medição com sondas de elevada exatidão Pt100 e termopar tipo K, com possibilidade de ver os valores simultaneamente visor assim no PC via USB para futuras análises. Este foi inserido no sistema de arrefecimento do motor a fim de calibrar o sensor de temperatura presente no motor.



Figura 6.4 - Equipamentos Bosch BEA 250 (esquerda) e Bosch FSA 720 (direita).



Figura 6.5 - Pistola estroboscopia Facom X.730B (esquerda) e medidor de temperatura Testo 735-2 (direita).

6.2.3. Medição de Sinais digitais e Analógicos

Durante toda a fase de desenvolvimento foi essencial uma ferramenta capaz de testar e validar os diferentes protocolos de comunicação utilizados, os diferentes pinos I/O, sinais de sensores, leituras analógicas, estratégias de controlo entre outros. Para tal utilizou-se o PicoScope 2205 MSO da Pico Technology que possui 2 canais analógicos mais 16 digitais com uma resolução de 8-bit, largura de banda de 25 MHz e 200MS/s de amostragem conjunta. Vem equipado ainda com comunicação USB, um interface gráfico multifacetado que oferece elevada flexibilidade de amostragem e tratamento de dados, essencial para este tipo de projeto.

Para a realização de determinados teste práticos tais como a medição do tempo morto injetores assim como o tempo de carregamento bobines utilizou-se um osciloscópio com pinça amperimétrica. Juntamente a uma pinça amperimétrica LEM PR30 com capacidade de medir 30A e resolução de 1mA.

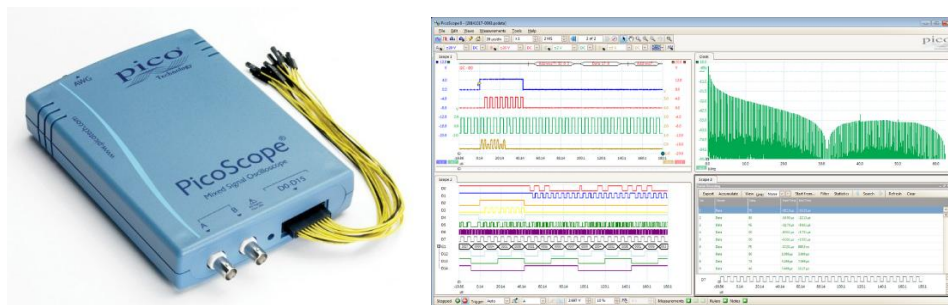


Figura XX – Osciloscópio digital PicoScope 2205 MSO e respetivo interface gráfico.

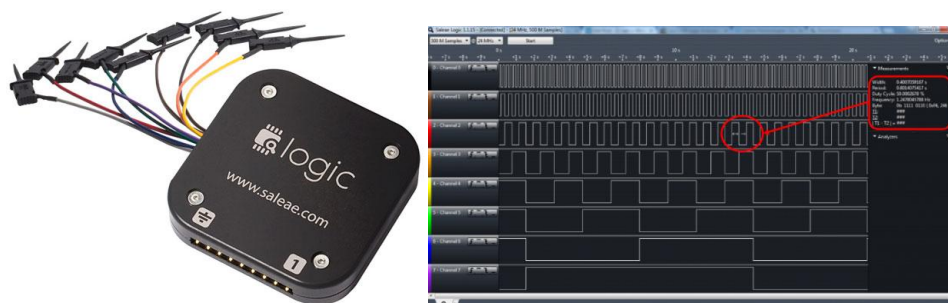


Figura XX – Osciloscópio digital Saleae Logic-8 e respetivo interface gráfico.

6.2.4. Análise Mensagens CAN

A fim de poder verificar as mensagens CAN tanto durante o processo de desenvolvimento, teste e calibração foi essencial a utilização de ferramenta de análise do barramento CAN. A ferramenta CAN BUS Analyzer Tool da Microchip é uma simples ferramenta de baixo custo capaz de monitorizar e depurar o barramento CAN, suportando CAN 2.0B (29-bit) ISO11898-2 (até 1Mb/s). O interface gráfico possui uma ampla gama de funções, tal como capacidade de injetar mensagens customizadas e *datalogging* através de comunicação USB.



Figura XX – Conversor Microchip CAN BUS Analyzer e respetivo interface gráfico.

6.3. Validação de Hardware

Estes testes foram efetuados no sentido de validar os diferentes circuitos desenvolvidos/implementados tal como o circuito de alimentação, condicionamento de sinais de sensores, drivers de potência e conversores de comunicação. Alguns deste foram efetuados em bancada sendo que outros já foram testados no simulador.

6.3.1. Circuito de Alimentação

O circuito de alimentação foi testado em bancada assim como num ambiente real de funcionamento (bateria) no qual foi medido tanto o valor de tensão de entrada como o de

saída. Na figura abaixo apresentado é possível verificar a amarelo a tensão de entrada (desde um valor de 6V até um de 16V) e a amarelo o valor de saída estabilizado, nomeadamente 5V.

6.3.2. Condicionamento de Sinal

Os diferentes métodos de condicionamento de sinais analógicos foram testado com um gerador de funções no qual foi medido o sinal produzido comparativamente ao sinal lido de entrada do microcontrolador e respetiva conversão e envio para o Labview. No inclusive testado o circuito integrado utilizado na conversão dos sinais produzidos pelo sensor de referência e sincronismo.

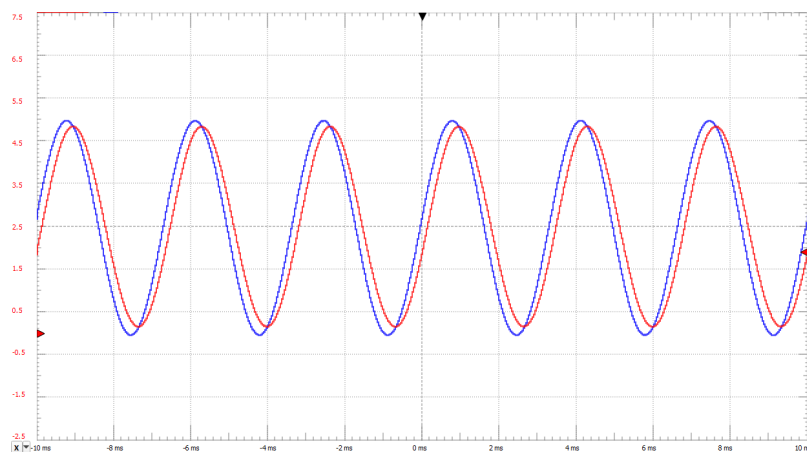


Figura 6.6 - Condicionamento de sinal dos sensores analógicos

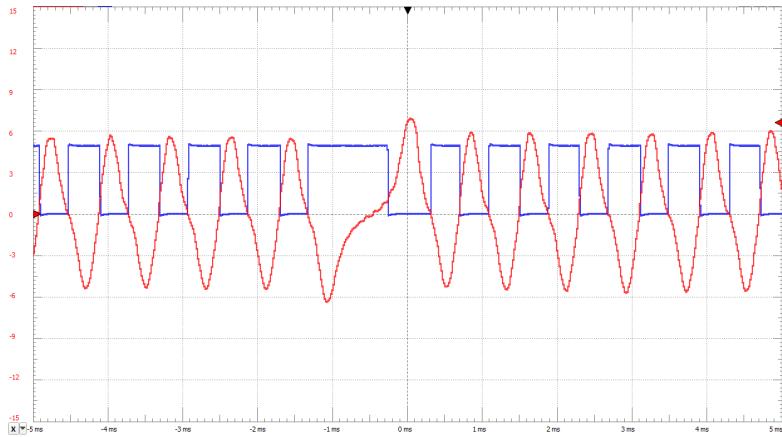


Figura 6.7 - Condicionamento de sinal do sensor de referência

6.3.3. Controlo de Atuadores

O circuito de controlo de atuador implementado foi testado nos diferentes atuadores nomeadamente injetores, bobines de ignição e atuadores de ralenti. No caso dos injetores e bobines, foi medida a tensão aos terminais dos respetivos atuadores comparativamente ao sinal de controlo produzido pelo microcontrolador. Para o atuador de ralenti foram realizadas diferentes simulações com diferentes *duty-cycle*.

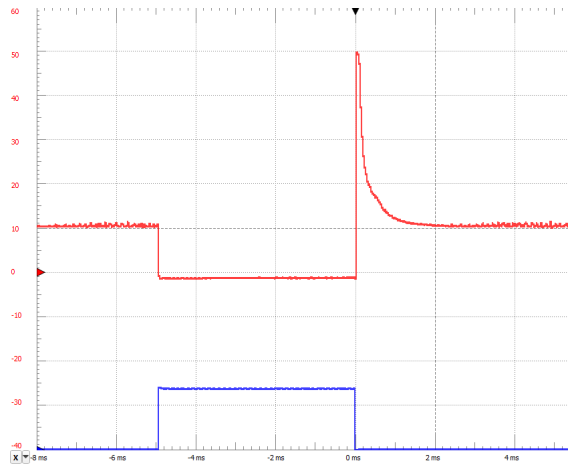


Figura 6.8 – Sinal de controlo do injetor (pedido pelo MCU) e medição aos terminais do injetor.

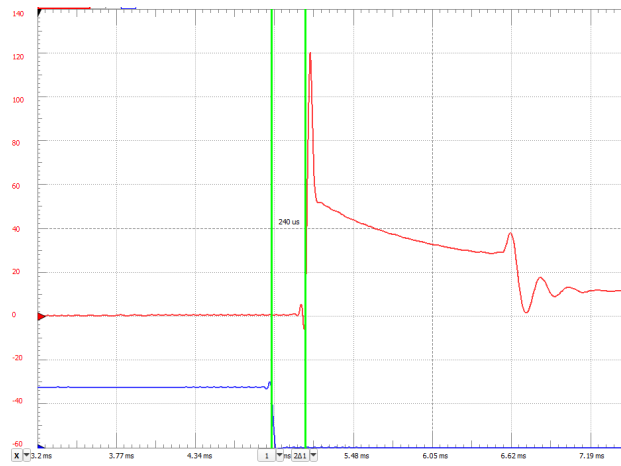


Figura 6.9 - Sinal de controlo da bobine (pedido pelo MCU) e medição aos terminais da bobine.

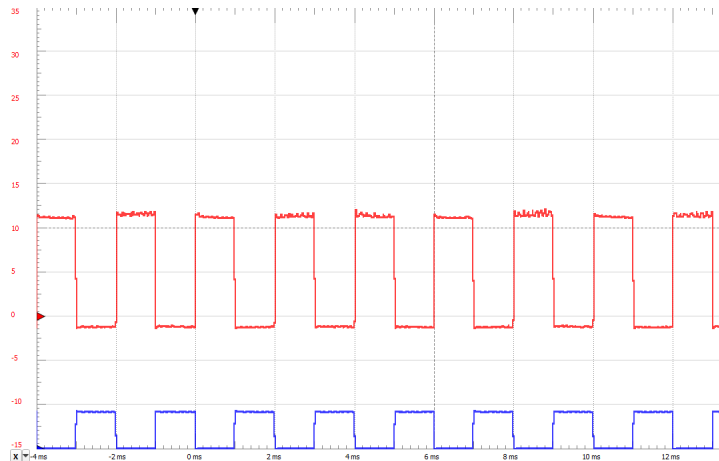


Figura 6.10 - Sinal de controlo do atuador do *ralenti* (pedido pelo MCU) e medição aos terminais do atuador.

6.4. Validação Funcional/firmware

O objetivo destes testes foi verificar se as principais funções desenvolvidas se encontravam implementadas da forma correta, e capazes de efetuar o controlo efetivo do motor. Foi testada a capacidade do *software* desenvolvido em Labview em mostrar os valores de forma correta/consistente e com qualidade na alteração de parâmetros. Foi testada a capacidade de controlo das funções implementadas e analisar as frequências de envio das mensagens CAN por parte dos módulos essenciais na qualidade e resolução do controlo. Permitiram verificar a capacidade da eletrónica em efetuar o sincronismo do motor e manter esse estado mesmo com o elevado ruído eletromagnéticos, verificar a correta medição da RPM tanto estático como dinamicamente, assim como a medição da carga e temperatura do motor.

6.4.1. EMS Manager

Para garantir que a comunicação entre o EMS *Manager* estava correta foi implementado um algoritmo de teste que recorria do envio de uma *string* de dados. Esta *string* é composta por um conjunto de caracteres seguidos com um carácter de início e um de fim para permitir comunicação assíncrona e manter os dados bem sincronizados. Esta *string* possuía uma forma conhecida na qual eram enviado determinados valores específicos na posição de cada um dos valores de sensores ou variáveis específicas sendo que depois se visualizava

no *software* se o valor coincidia com o enviado. Este método permitia garantir tanto a comunicação entre os diferentes módulos, pois era enviado dos diferentes módulos assim como garantir o correto funcionamento da comunicação USB e amostragem realizada de forma eficiente. Por sua vez, e utilizando a capacidade de gravação de dados foi possível verificar a correta gravação dos mesmos e também testar o a formatação de dados admitida pelo *software* Windarab®. Também foi testado o método de modificação de mapas e respetiva alteração dos mesmos na EEPROM.

6.4.2. Mensagens CAN

Para análise das mensagens CAN utilizou-se o *CAN Analyzer* como módulo adicional. Isto permitiu, verificar a veracidade das mensagens enviadas assim como as respetivas frequências de envio ou até o correto funcionamento do *hardware* para as situações de maior carga de trabalho.

6.4.3. Sincronismo e Rotação do Motor

Este teste foi realizado no sentido de comprovar o correto funcionamento do possesso de sincronismo e cálculo da RPM do motor. Para tal foram medidos os sinais de injetores, bobines, assim como os sensores de referência e sincronismo.

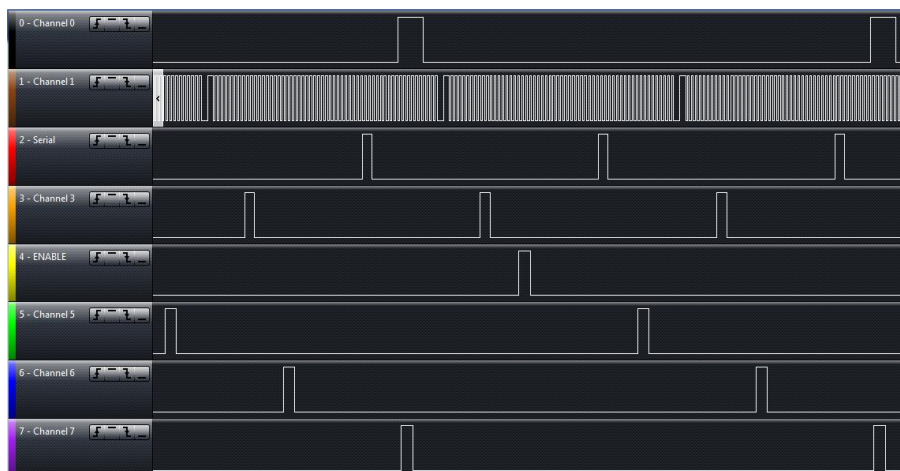


Figura 6.11 – Sincronismo do motor.

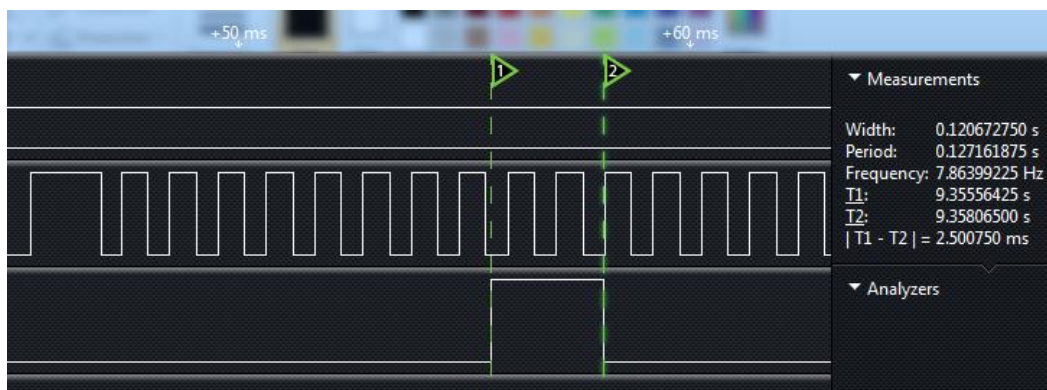


Figura 6.12 – Dwell de 2.5ms da bobine de ignição

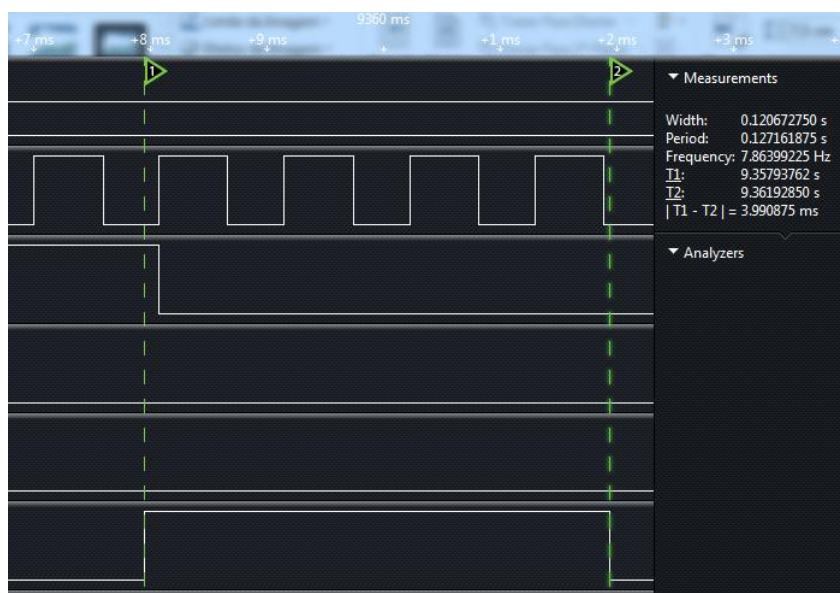


Figura 6.13 – Tempo de injeção de 4ms.

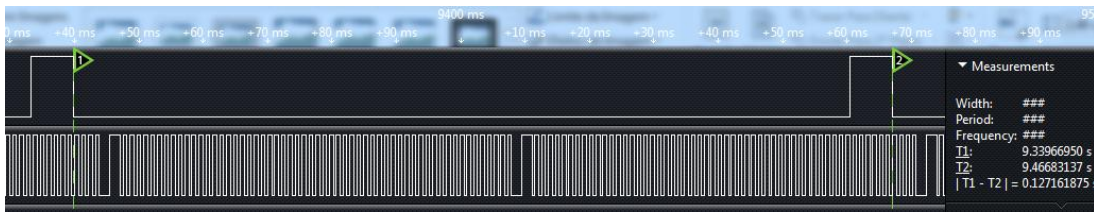


Figura 6.14 – Cálculo da RPM entre dentes da arvore de cames.

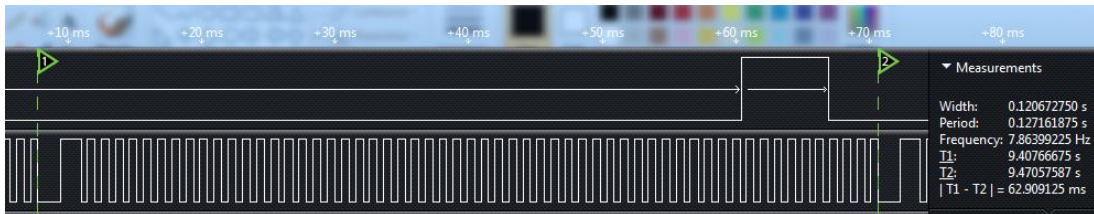


Figura 6.15 – Cálculo da RPM entre cada vota do motor.

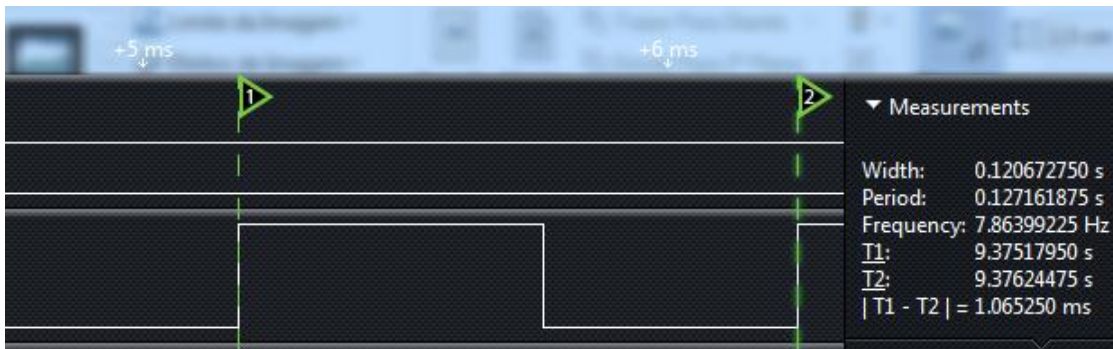


Figura 6.16 – Cálculo da RPM dente a dente (938 RPM).

6.5. Validação Prática

Durante a calibração do motor foram realizados diversos testes, sendo que os diferentes resultados foram sendo otimizados recorrendo à análise de dados. Nas figuras abaixo é possível observar alguns excertos dos dados obtidos.



Figura 6.17 – Variação da compensação do combustível em função da temperatura.



Figura 6.18 – Variação do combustível injetado em função do TPS.



Figura 6.19 – Processo de afinação do motor para as 5500 RPM.

6.6. Testes em Banco de Potência e Estrada

O processo de calibração do motor em banco de potência é um processo extremamente importante e de demonstração do correto funcionamento dos diversos sistemas e sua interligação. Neste sentido foi realizado um teste de potência ao motor tendo sido comparado os valores obtido com os anteriormente obtidos. Na figura abaixo é possível observar os resultados obtidos e diferenças entre os dois testes.

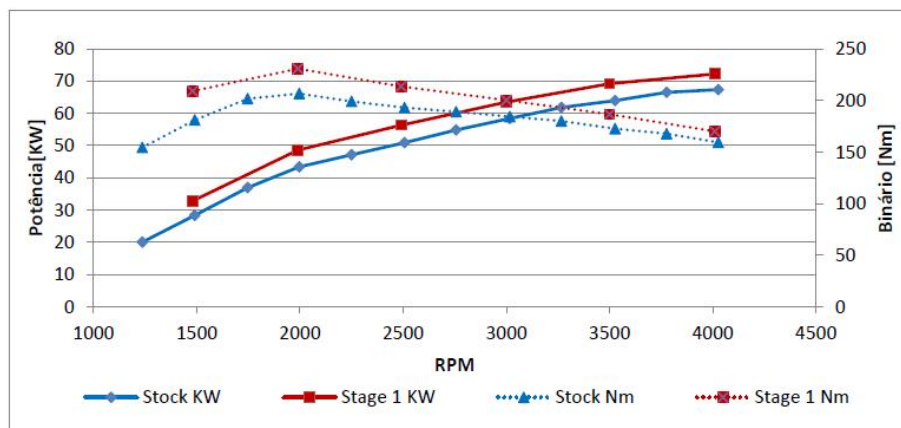


Figura 6.20 – Resultados dos testes realizados.

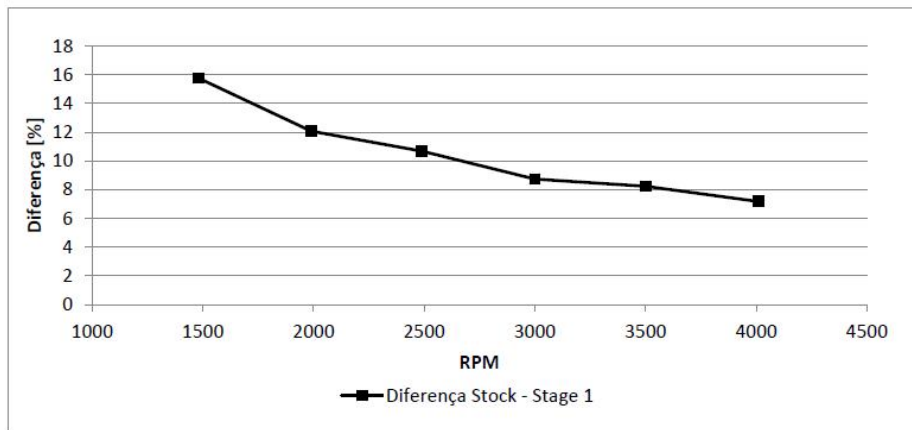


Figura 6.21 – Diferença entre os testes realizados.

7. Discussão de resultados

Neste capítulo vai ser apresentada a discussão dos diferentes resultados obtidos durante os testes acima enumerados, assim como as decisões técnicas tomadas durante a conceção e implementação e suas implicações no resultado geral do projeto.

De uma forma geral foi possível verificar que a implementação da arquitetura de controlo distribuído foi realizada com sucesso, dentro dos parâmetros previamente estabelecidos. Isto foi possível devido ao nível da conceção da estratégia de controlo, principais funções de controlo, frequências de envio de mensagens e calibração do motor.

O barramento CAN encontra-se a uma taxa de ocupação de 41%, permitindo constatar que existe ainda margem de progressão e que o protocolo CAN é capaz de suportar o sistema implementado, denotando que o controlo distribuído não teve um impacto negativo na gestão eletrónica do motor.

Os módulos implementados apresentaram fiabilidade tanto ao nível do *firmware* como do *hardware* desenvolvidos assim como na integração e comunicação do sistema.

A validação do *hardware* correu com sucesso e os componentes pré-selecionados foram eficazes, permitindo assim avançar do simulador para o motor Ford sabendo que estes não seriam um fator de distúrbio ou de indução em erro. Importante realçar que os testes realizados durante os teste iniciais de validação de hardware foram essenciais para garantir a seleção destes componentes, nomeadamente o circuito de condicionamento do sensor de referência assim como no driver de controlo das bobines de ignição. Inicialmente foram utilizados outros métodos de condicionamento do sensor que se revelaram ineficazes e inconstantes, levando à seleção do IC utilizado construído especificamente para sensores indutivos. O driver de controlo das bobines de ignição (*optocoupler* e IGBT) possui um tempo de atuação considerando lento para este tipo de função (derivado do *optocoupler* utilizado) mas a sua seleção revelou-se eficaz pois garantiram um isolamento galvânico entre o microcontrolador e o IGBT reduzindo o enorme ruído produzido pelo sistema de ignição e possíveis falhas esporádicas e de difícil deteção. No entanto este tempo de atuação é facilmente compensado por *software* recorrendo ao parâmetro introduzido para compensar o tempo de resposta de determinado sistema de ignição.

Para realizar o sincronismo do motor e efetuar o controlo dos sistemas de ignição e combustível de forma precisa ao longo de todo o ciclo do motor é necessário obter um

condicionamento praticamente perfeito do sensor de referência e sincronismo, sendo que em situações de erro detetado o *firmware* tem de possuir a capacidade de recuperar dessa situação da forma mais rápida possível. No *firmware* desenvolvido, o sincronismo do motor é efetuado todos os ciclos permitindo assim recuperar de erros esporádicos possuindo a capacidade de os identificar. Durante esta etapa o desenvolvimento do *software* e sua facilidade de calibração foi muito útil tanto pela facilidade de alteração dos filtros assim como a possibilidade de detetar os erros esporádicos que se traduziam em determinações erradas da posição dos motor.

Devido ao tipo de sinal método de método de aquisição (impulsos digitais) e até pelo posicionamento no motor (perto das bobinas de ignição) estes sensores são muito afetados por ruído eletromagnético que facilmente geram falsos impulsos, falsamente considerados como dentes da roda dentada. Para combater esta situação a implementação de filtros por *hardware* (fixos) assim como de *software* foi muito importante e revelou-se eficaz. Durante a afinação do motor surgiram situações em que os filtros de *software* tiveram de ser reajustados conforme se foi realizando a afinação do motor.

A caracterização dos principais sensores do motor, nomeadamente o sensor ET, MAP e TPS demonstrou ter sido realizada com sucesso e os seus valores foram de elevada importância na calibração do motor, tendo sido a utilização do *software* de análise de dados essencial na sua caracterização e calibração do motor. No caso do TPS, sensor que define a carga na estratégia Alpha-N, foi possível verificar que conforme a sua variação também o valor do avanço de ignição e combustível variaram em conformidade. O Sensor ET foi utilizado na compensação do motor com a temperatura servindo como fator de interpolação na curva de compensação de combustível, permitindo aumentar o valor de combustível injetado para situações de funcionamento a frio. Por sua vez o MAP serviu para compensar o combustível nas pequenas variações de pressão no coletor de admissão estabilizando o *ralenti* e suavizando as pequenas acelerações sem para isso utilizar outros mapas mais complexos ou algoritmos de previsão.

Durante as condições estáticas de funcionamento a facilidade de controlo da ignição é efetuada com precisão nomeadamente com uma variação de $\pm 2\mu s$, que é o valor do período do *overflow* do timer utilizado. É durante as fases de aceleração que este algoritmo de abertura e fecho das bobinas e injetores apresenta maior dificuldade de execução e variação no controlo. Esta pequena modificação entre o pedido e o efetuado deve-se à constante variação da rotação do motor e é algo comum e difícil de combater nos sistemas de controlo de motores. Por exemplo quando se pretende ter um avanço de 1.5° antes do PMS, e sabendo que temos como referência uma roda dentada de 60 dentes, sabe-se que

esta apresenta incrementos inteiros de avanço a cada 6°, sendo que o valor pretendido irá ficar compreendidos entre 1/4 do intervalo de dente. Ora neste caso o fecho da bobine não vai coincidir com nenhum flanco ascendente ou descendente, sendo que vai ser necessário calcular o tempo de dente que vai ser dividido por 4. Este tempo por dente, ainda que seja calculado imediatamente no dente anterior (como é o caso) vai variar já no próximo dente, traduzindo-se num fecho de bobine erróneo. Aliado a isto o motor pode ter sido acelerado ou desacelerado perfazendo um erro ainda maior mesmo tendo em conta os dentes e o tempo entre eles. Ora como em determinado momento é necessário prever para determinada rotação de motor qual o ponto ideal para iniciar o *dwell* de uma bobine, este irá sofrer uma alteração se durante o tempo de carregamento o motor acelerar ou desacelerar, traduzindo-se num *dwell* erróneo mesma durante utilização de um algoritmo que tenha um cálculo de previsão com base em acontecimentos anteriores.

No entanto e sabendo-se que uma variação é difícil de combater é possível colmatar a mesma e decidir pelo menos onde a podemos suportar. No *firmware* desenvolvido o tipo de algoritmo de controlo para as bobines de ignição prevê que a variação exista/aconteça no início, ou seja vai ocorrer uma variação de alguns microssegundos no *dwell*. Para o injetor esta variação acontece no tempo de fecho, ou seja a variação existente dá-se nos graus de avanço em que ocorre a injeção.

O algoritmo de compensação de combustível foi o único que sofreu alterações de *firmware* ao longo da afinação do motor. Isto deveu-se essencialmente ao facto de o método até então escolhido não ser constante e capaz de suportar as variações repentinas de aceleração diferentes. Por sua vez o se resultou num comportamento muito superior, conseguido colmatar as acelerações e misturas pobres associadas. Inicialmente era utilizada uma tabela 2D que calculava o valor do combustível durante acelerado com base na rotação e variação da posição da borboleta e que se revelou incapaz. Esta não conseguia compensar as acelerações nem o acréscimo da própria compensação de combustível durante a fase de aquecimento do motor. Posteriormente foi então desenvolvido o algoritmo (apresentado acima) cujo valor do combustível considerava primeiramente o valor da variação de um valor de TPS e que depois (em função de tabela 2D RPM x TRPS) calculava o valor final de acréscimo em percentagem. É de referir que primeiramente é importante saber qual foi a variação de TPS num determinado intervalo de tempo e depois verificar qual a carga em que se encontrava assim como a RPM. Isto deve-se ao facto de por norma o motor necessitar de uma percentagem maior de combustível quando se encontra em valores mais baixos de TPS assim como de RPM.

A calibração do motor, diferentes modificações implementadas, respetivas estratégias de controlo, testes em banco de potência a rotação constantes ou as diversas condições dinâmicas permitiram chegar a um resultado obtido dentro dos parâmetros inicialmente propostos. Isto é de extrema importância pois mesmo com um sistema bem desenvolvido, é a calibração propriamente dita do motor que nos dá o verdadeiro feedback do funcionamento do mesmo, evitando situações de dúvida sobre aquilo que foi desenvolvido quando os problemas principais residem na própria afinação dos valores (mapas).

Existem um conjunto de características tal como o elevado ruído eletromagnético e as diversas condições dinâmicas de funcionamento que fazem de um motor de combustão um sistema difícil de calibrar e controlar para eletrónica digital. Neste sentido era importante garantir a integração de um *software* que oferece-se flexibilidade de configuração dos diferentes parâmetros, permitindo uma afinação de parâmetros *on the fly*.

Neste capítulo o *software* desenvolvido em Labview® teve um papel preponderante pois permitiu visualizar em tempo real todas as variáveis de controlo do motor, permitiu detetar falhas de sincronismo e afinar *on the fly* os diferentes mapas. A capacidade de realizar gravação de dados pelo Labview e a sua utilização no software Windarab® permitiu realizar a posterior análise de dados e verificar muitas e diversas situações de calibração erradas, permitindo por iteração melhorar a afinação final. Situações de arranque a frio, aceleração, fase de aquecimento foram algumas das situações em que a análise de dados foi essencial.

A constituição das mensagens enviadas pelos módulos assim como as respetivas frequências foram previamente estudadas, sendo que foi tido em conta a adaptação dos sistemas comuns (centralizados). Por exemplo, as frequências escolhidas para cada uma das mensagens, bateram certo com o pretendido ainda que se tenha chegado à conclusão que nomeadamente os sensores de TPS e MAP necessitassem de uma maior taxa de atualização no barramento, passando de 200Hz para 300Hz.

As mensagens trocadas com o barramento CAN possuem a mesma frequência de atualização independentemente do valor da rotação do motor, tendo sido selecionadas para cumprir com o maior número de ciclos do motor em altas rotações. Ainda que em rotações inferiores os tempos de ciclo do motor sejam inferiores, e não seja necessária por exemplo uma atualização dos cálculos de combustível a 500Hz, durante o funcionamento da mesma às 5000 RPM já é pertinente que assim seja.

O uso de outro protocolo de comunicação por exemplo o Flexray poderia acrescentar melhorias no sistema tanto do ponto de vista da fiabilidade (redundância), maior largura

de banda de comunicação e características de determinismo para sistema críticos. Por exemplo, se for imposta uma avaria física no barramento CAN os módulos que ficarem posteriormente a esse corte ficarão inacessíveis, levando ao mau funcionamento ou paragem por completo do sistema.

Devido à capacidade de possuir um segmento estático de transferência de dados com característica determinística para situações críticas poderia ser eliminada a latência da transferência dos dados entre os diferentes módulos possuindo a acrescentada a capacidade de sincronizar a posição do motor por mensagens. Neste sentido o módulo de controlo do motor, que possui em conjunto, os sensores de referência e sincronismo assim como os atuadores injetores e bobines, poderia ser reestruturado, sendo dividido em dois módulos separados com troca de informação idêntica aos demais módulos. Aplicações que necessitem de elevada largura de banda para computação de ângulos de posição do motor como o controlo *knock* poderiam também ser implementadas com maior fiabilidade.

8. Conclusões e Trabalhos Futuros

Neste capítulo vão ser apresentadas as conclusões gerais do trabalho desenvolvido assim como os trabalhos futuros possíveis de serem posteriormente desenvolvidos.

8.1. Conclusão do Trabalho

Os motores de combustão interna têm sofrido uma constante evolução e encontram-se hoje em dia mais eficientes que nunca. Parte desta evolução deveu-se à introdução e gradual evolução dos próprios sistemas de gestão eletrónica de motores assim como dos respetivos subsistemas de controlo auxiliares. No entanto, e com a cada vez maior necessidade de implementação de novos sistemas de controlo em diferentes aplicações do veículo tem sido necessário recorrer ao controlo eletrónico descentralizado. Este tipo de controlo possui a capacidade de distribuir o processamento total em pequenas parcelas, cada uma atribuída a um módulo de controlo. Existe assim a partilha de recursos gerais de forma local, tal como capacidade de exercer influência em determinada função externa ou acesso a dados de sensores sem estar fisicamente conectados ao mesmo, tudo isto através de um barramento de comunicação como o CAN bus.

Foi com base nesta tendência cada vez mais acentuada na indústria automóvel que se partiu para a ideia de criar uma rede de controlo distribuído mas neste caso aplicada apenas ao sistema de gestão eletrónica de um motor de combustão interna. Nesta arquitetura desenvolvida existe um conjunto de módulos “infinitamente” pequenos cada um deles encarregue de uma tarefa específica. Esta arquitetura visa reduzir o tamanho e complexidade das cablagens, pois todos os módulos ficam ligados por um barramento de comunicação (CAN bus) juntamente com um barramento de alimentação que interconecta os diversos módulos. Idealmente (ainda que não tenha sido possível desenvolver) o comprimento das cablagens aos atuadores ou sensores é infimamente pequena, pois o conceito visa desenvolver um SoC (sistema no *chip*) colocado no interior de por exemplo um sensor, possuindo acesso ao sensor em si sem recorrer ao uso de cablagens. Isto irá criar módulos inteligentes, que reduzirá drasticamente a distorção do sinal devido ao ruído, realizando a calibração do sensor de forma específica. Cada um possui a capacidade de

realizar localmente o condicionamento do seu sinal enviando-o para o barramento na forma digital já no valor da grandeza física medida, permitindo fácil acesso aos valores sem conhecer as curvas de calibração, poupando assim em condutores, reduzindo a distorção do sinal analógico devido a ruídos externos, facilitando a expansão ou reestruturação do próprio sistema.

Neste trabalho foi desenvolvido e implementado um sistema de gestão eletrônica de motores de combustão interna recorrendo ao conceito de controlo distribuído. De uma forma resumida o objetivo deste sistema era o controlo do combustível, ignição e gestão da carga do motor, para que este funciona-se dentro dos parâmetros ideais de funcionamento e eficiência.

Neste âmbito foram desenvolvidos diferentes módulos de controlo cada um com tarefas específicas, nomeadamente o módulo de sensores, módulo de atuadores, módulo de motor e módulo de cálculo. Cada um deles foi desenvolvido equipado com *hardware*, *firmware* e funções específicas de controlo. Este firmware foi modificado em algumas situações dependendo da necessidade de controlo ao longo que se foi avançando com a implementação do projeto.

O *software* de calibração e visualização dos diversos parâmetros desenvolvidos foi de grande utilidade pois ofereceu flexibilidade de controlo na afinação do motor permitindo ultrapassar algumas situações em que o problema residia na afinação em si, excluindo de imediato dúvidas relacionadas com o *firmware* ou *hardware* desenvolvido.

A conceção do sistema foi inicialmente aplicada num simulador de testes sendo que posteriormente, foi contruído um protótipo da arquitetura desenvolvida com vista à aplicação em um motor Otto Ford 2.0i de injeção sequencial indireta e ignição agrupada. Ainda neste contexto foi realizada uma calibração do motor em banco de potência, nomeadamente a caracterização dos principais sensores e afinação dos mapas de combustível e ignição, para garantir o correto funcionamento do mesmo.

Esta implantação foi considerada de sucesso dentro dos parâmetros previamente definidos. Os variados testes implementados desde o início, tanto ao *hardware* como *firmware*, e respetiva análise permitiram verificar a efetividade do algoritmo de controlo aplicado, fiabilidade dos diversos módulos desenvolvidos, assim como validar a arquitetura implementada.

8.2. Trabalhos Futuros

Embora o conceito de arquitetura distribuída tenha sido aplicado com sucesso na gestão eletrónica de motores Otto de gestão indireta, podem e devem ser sempre introduzidas melhorias substanciais.

Do ponto de vista do *software* de calibração, deveria ser utilizada uma base de programação diferente, nomeadamente textual (C# ou C++), no sentido de facilitar a inclusão de novas funcionalidades permitindo uma expansibilidade superior.

Melhoramento do algoritmo de controlo através da inclusão de maior número de mapas de calibração, diferentes métodos de cálculo de combustível, maior número de atuadores ou sensores.

Inclusão de novas funcionalidades no sistema como controlo de combustível e ignição em malha fechada, controlo de árvores de cames variáveis, sobrealimentação, borboleta eletrónica ou ficha de diagnóstico genérico.

Reestruturação da arquitetura desenvolvida visando a aplicação em motores Diesel ou Otto de injeção direta.

Estudo a capacidade e respetivas vantagens de utilizar protocolos de comunicação com diferentes características.

Avaliar a possibilidade de construção de um protótipo com o objetivo de ser aplicado/testado a um veículo atual para inclusão com outros sistemas e verificar a fiabilidade. Redução do tamanho dos módulos desenvolvidos com o recurso a novas tecnologias e *hardware* específico.

9. Bibliografia

- [1] J. B. Heywood, Internal Combustion Engine Fundamentals, 1988.
- [2] J. Martins, Motores de Combustão Interna, Publindústria , 2006.
- [3] R. B. GmbH, Motronic ME - Engine Management, 1999.
- [4] R. B. GmbH, Gasoline Engine Management: Motronic Systems, 2003.
- [5] T. Denton, Automotive Electrical and Electronic Systems, 2012.
- [6] R. B. GmbH, Diesel Engine Management, Springer Vieweg, 2014.
- [7] R. B. GmbH, Bosch Automotive Electrics and Automotive Electronics, Springer Vieweg, 2007.
- [8] R. B. GmbH, Automotive Networking, 2007.

10. Anexos

Esta página foi intencionalmente deixada em branco