

• C •

FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS
E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA MECÂNICA

Projecto de Um Sistema de Gestão Electrónica para Um Motor de Ciclo de 4 Tempos de Ignição por Faísca de Um Veículo Automóvel Utilitário

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Automóvel

Autor

Nuno Filipe da Silva Petronilho

Orientadores

Professor Doutor Francisco José de Almeida Cardoso

Professor Doutor Pedro de Figueiredo Vieira Carvalheira

Júri

Presidente	Professor Doutor António Manuel Gameiro Lopes Professor Auxiliar DEM-FCTUC Professor Doutor Francisco José de Almeida Cardoso Professor Auxiliar DF-FCTUC Professor Doutor Pedro de Figueiredo Vieira Carvalheira Professor Auxiliar DEM-FCTUC
Vogais	Professor Doutor Bruno Jorge Ferreira Ribeiro Professor Auxiliar Dep. de Eng. Electromecânica-UBI

Coimbra, Setembro, 2011

“Deus quer, o Homem sonha e a obra nasce”

Fernando Pessoa em “Mensagem”, 1934

Aos meus pais

Agradecimentos

Quero agradecer a todas as pessoas que me ajudaram e apoiaram ao longo do desenvolvimento deste trabalho e do meu percurso académico. Aos funcionários da SVP Auto Coimbra pelo apoio e auxílio com a colecta de componentes. Ao José Oliveira da Eneida pela ajuda com conhecimento técnico. Aos meus orientadores, Professor Doutor Pedro Carvalheira e Professor Doutor Francisco Cardoso, pelo conhecimento, auxílio e bom senso proporcionados. À equipa (família) Eco Veículo, da qual faço parte, por todo o apoio, conhecimento, companheirismo e bons momentos proporcionados. A todos os meus amigos pela sua individualidade, maneira de ser, companheirismo e tudo o resto que me tem auxiliado ao longo da vida. À minha namorada, Ana Catarina, pela compreensão e apoio que me tem dado. Aos meus pais, Jorge e São, e à minha irmã, Susana, pela minha vida, por quem sou, fui e por quem serei e por todas as oportunidades proporcionadas. A todos, um grande e sincero Muito Obrigado, sem vós não teria sido possível.

Resumo

É o objectivo deste trabalho a criação de um sistema de controlo para motores de combustão interna. São apresentados ao longo da realização deste trabalho todos os passos tomados até ao final. A identificação da necessidade de um sistema de controlo, os sistemas de controlo e gestão de motores de combustão interna ao longo da história e o estado da arte, onde são apresentadas as soluções mais actuais e em vigor. É apresentada a compilação de informação efectuada e o tipo de elementos a utilizar, assim como o porquê de recorrer a um sistema distribuído com rede CAN e não a utilização de um sistema monolítico. São apresentados os aspectos construtivos e as decisões que a eles conduziram.

Palavras-chave: Motor de combustão interna, Controlo, CAN, Gestão, Rede.

ABSTRACT

A Power Control Module for internal combustion engines creation is the proposed objective for this work. All the major steps took during this job's implementation are documented on the present text. The identification of the need to use such a system as for the historical insertion of such systems is present on this work. All the decisions made on using a distributed system with CAN network and on the used elements are present on this work. The decisions made to achieve the building options are also described in the present work.

Keywords: Internal Combustion Engine, Control, CAN, Network.

ÍNDICE

ÍNDICE	iv
ÍNDICE DE FIGURAS	v
ÍNDICE DE TABELAS	viii
SIMBOLOGIA E SIGLAS	ix
SIMBOLOGIA	ix
SIGLAS	ix
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Objectivos e motivação	2
2 CONTROLO ELECTRÓNICO DE MOTORES	3
2.1 Perspectiva histórica	3
2.2 O Estado da arte – <i>State of the art</i>	13
2.3 processos de um motor, sensores e actuadores	14
2.3.1 Sistema de Admissão, formação de mistura e combustão	15
2.4 Resumo de sensores e actuadores	31
3 ARQUITECTURA DO SISTEMA	34
3.1 Estruturação modular	34
3.2 Alocação Funcional	35
3.3 Plataforma tecnológica	39
3.4 Estruturação de Software	43
4 AS UNIDADES DO SISTEMA	45
4.1 Unidade do depósito	46
4.2 Unidade do pedal do acelerador	47
4.3 Unidade das sondas Lambda	48
4.4 Unidade do sensor de knock	49
4.5 Unidade de controlo principal	50
4.6 Unidade concentradora e de interface externa	51
4.6.1 Memória da Unidade	53
5 CONCLUSÃO	55
6 REFERÊNCIAS	56

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Variação da riqueza da mistura em motores equipados com carburador e em motores equipados com injeção electrónica.	4
Figura 2 Ilustração do motor de seis cilindros em linha do Mercedes-Benz 300SL apresentado em 1954.....	4
Figura 3 Arquitectura do sistema Electrojector retirado da patente do mesmo. ^[2]	5
Figura 4 Arquitectura do sistema D-Jetronic. 1- Unidade de comando, 2- Injector, 3- Sensor de pressão, 4- Sensor de temperatura, 5- Termóstato, 6- válvula de arranque a frio, 7- Bomba de combustível, 8- filtro de combustível, 9- Regulador de pressão, 10- motor de compensação do ralenti, 11- sensor de posição da borboleta de admissão, 12- distribuidor, 13- interruptor de ignição	6
Figura 5 Arquitectura do sistema de injeção K-Jetronic. 1- Depósito com filtro, 2- Bomba de combustível, 3- Acumulador de combustível, 4- Filtro de combustível, 5- Regulador de pressão, 6- Distribuidor de combustível e Caudalímetro, 7- Injectores, 8- Injector de arranque a frio.	7
Figura 6 Módulo distribuidor de combustível com controlo de emissões em ciclo fechado do sistema K-Jetronic. 1- Sonda λ , 2- Unidade de comando, 3- Restritor variável, 4- Corpo do distribuidor de combustível, 5- Câmara inferior das válvulas medidoras de fluxo, 6- Conduatas de fluxo regulado, 7- Restritor de fluxo, 8- Admissão de combustível, 9- Retorno de combustível, 10- Saída de combustível para os injectores.	8
Figura 7 Variação da natureza das emissões gasosas poluentes num veículo com a variação da mistura. 1-Emissões não tratadas, 2- emissões após tratamento catalítico, 3- variação do sinal da sonda λ	9
Figura 8 Esquema do sistema de injeção electrónica L-Jetronic. 1- Depósito, 2- Bomba de combustível, 3- Filtro de combustível, 4- Unidade de comando, 5- Injector, 6- Rampa de injeção com regulador de pressão, 7- Colector de admissão, 8- Válvula de arranque a frio, 9- Sensor de posição da borboleta de admissão, 10- Medidor de fluxo de ar, 11- Sonda λ , 12- Termóstato, 13- Sensor de temperatura do motor, 14- Distribuidor de ignição, 15- Motor e válvula de controlo do ralenti, 16- Bateria, 17- Interruptor de ignição.	10
Figura 9 Esquema do sistema Motronic. 1- Canister, 2- Válvula de corte, 3- Válvula de purga do canister, 4- Sensor de pressão de admissão, 5- Injector, 6- Bobina de ignição e vela de ignição, 7- Sensor de fase da árvore de cames, 8- Bomba de ar secundária, 9- válvula de ar secundária, 10-Sensor de fluxo de ar, 11- Dispositivo da borboleta, 12- Válvula EGR, 13- Sensor de detonação, 14- Sensor de velocidade da cambota, 15- Sensor de temperatura do motor, 16- Sonda λ , 17- Unidade de comando, 18- Interface de diagnóstico, 19- Luz de diagnóstico, 20- imobilizador do veículo, 21- Sensor de pressão do depósito, 22- Depósito e unidade intra-depósito, 23- Módulo do pedal acelerador com sensor de posição do pedal, 24- Bateria.	11

Figura 10 Tipos de injeção indirecta pulsada. A- Injeção simultânea, B- Injeção em bloco, C- Injeção sequencial.	12
Figura 11 Esquema representativo de um sensor de filme quente e gráfico de temperatura em função da posição. S_L - Sensor de temperatura ambiente, S_1 e S_2 - Sensores de temperatura de ar a montante e a jusante da resistência de aquecimento, H - Resistência de aquecimento do ar, S_H - Sensor de temperatura da resistência, t - Temperatura, s - Ponto de medição, Q_{LM} - Caudal de ar.	16
Figura 12 Gráfico de curvas características dos sensores de massa de ar de filme quente. 1 a 4- Família de curvas características dependendo da especificidade do sensor.	17
Figura 13 Esquema de sensor de pressão de diafragma. 1- Ligações internas, 2- vácuo, 3- Conectores, 4- Elemento Sensor, 5- Cristal, 6- Involucro, p- Pressão.	18
Figura 14 Curva característica de um sensor de pressão diferencial de diafragma. p_1 e p_2 - Intervalos de pressão.	18
Figura 15 Curva característica de um sensor NTC.	19
Figura 16 Gráfico de distribuição dos tempos de reacção humanos.	20
Figura 17 Esquema representativo da constituição de um potenciómetro angular. 1- Escova de varrimento, 2- Pista resistiva, 3- Pista de ligação, α - Ângulo de varrimento, R - Resistência, U_A - Tensão medida, U_o - Tensão de alimentação, I_A - Corrente de saída.	21
Figura 18 Curva típica de um sensor de posição angular. N- Curva de referência para o sensor, T- Intervalo de tolerância, A- Intervalo angular limitado construtivamente, L- Tolerância posicional do sensor quando aplicado, ϕ_w - Gama angular mensurável.	22
Figura 19 Vista em corte de exemplo de injectores. Injectores em posição fechada com o solenóide desligado.	23
Figura 20 Esquema eléctrico de bobinas de ignição. a- Bobina de ignição convencional, b- Bobina de ignição de faísca simples, c- Bobina de ignição de dupla faísca, 1- Ligação à “terra”, 15- Ligação ao positivo da ignição, 4- Terminal da vela de ignição.	24
Figura 21 Gráfico de evolução da pressão na câmara de combustão com a variação do avanço à ignição para as mesmas condições de operação, à esquerda, e exemplo de evolução da pressão com <i>knock</i>	25
Figura 22 Exemplo de sinal do sensor de <i>knock</i> . É possível visualizar os pontos de ocorrência de <i>knock</i> e a influência que este fenómeno tem no sinal.	26
Figura 23 Esquema do sensor e curva característica. 1- Electrólito cerâmico, 2- Eléctrodos, 3- Contactos, 4- Contacto do encapsulamento, 5- Tubo de escape, a- zona de mistura rica, b- zona de mistura pobre, c- controlo em ciclo fechado para mistura estequiométrica, d- controlo da mistura pobre.	27
Figura 24 Esquema de aplicação do sistema EGR. 1- Gases de escape, 2- Válvula electro-pneumática, 3- Válvula de recirculação, 4- Unidade de comando, 5- Sensor de fluxo de ar.	27
Figura 25 Esquema de aplicação de <i>canister</i> . 1- Emissões evaporativas do depósito, 2- <i>Canister</i> , 3- Entrada de ar, 4- Válvula de purga do <i>canister</i> , 5- linha de ligação ao colectador de admissão, 6- Borboleta de admissão.	28

Figura 26 Exemplo de curva característica de Sensor de efeito de Hall. α - Ângulo de rotação, α_s - Duração do sinal, L- Dente ou presença, Z- Falha ou ausência, U_{Ao} - Tensão de saída, U_{ASat} - Tensão de saída de saturação.	30
Figura 27 Distribuição dos vários módulos no veículo. 1- Motor, 2- Unidade de comando do motor, 3- Unidade de comando dos ou dos sensores de detonação, 4- Unidade de comando do pedal do acelerador, 5- Unidade de comando das sondas λ , 6- Unidade de comando do depósito e do canister, 7- Baterias, 8- Unidade de armazenamento e gestão de dados.	34
Figura 28 Esquema simplificado da arquitectura de um microcontrolador. [11]	42
Figura 29 Estruturação básica das unidades.	43
Figura 30 Diagrama de transição de estados de uma tarefa no sistema operativo. a- execução por selecção do processo, b- bloqueio, c- desistência por selecção do processo, d- desbloqueio [12]	43
Figura 31 Arquitectura de diagnóstico de dois veículos. a- unidades de comando, b- gateway, c- testador de diagnóstico. Situação 1: o testador é conectado ao veículo por intermédio de uma gateway. Na situação 2, o testador de diagnóstico liga-se directamente às unidades de controlo.	46
Figura 32 Esquema simplificado da unidade do depósito. a- conversor de tensão, b- desacoplamento galvânico de efeito electromagnético, c- desacoplamento galvânico de efeito óptico, d- SPI, SSR- Relé de estado sólido.	47
Figura 33 Esquema simplificado da unidade do Pedal do acelerador. a- conversor de tensão, b- desacoplamento galvânico de efeito electromagnético, c- desacoplamento galvânico de efeito óptico, d- SPI.	48
Figura 34 Esquema simplificado da unidade das sondas λ . a- conversor de tensão, b- desacoplamento galvânico de efeito electromagnético, c- desacoplamento galvânico de efeito óptico, d- SPI, SSR- Relé de estado sólido.	49
Figura 35 Esquema simplificado da unidade do sensor de <i>knock</i> . a- conversor de tensão, b- desacoplamento galvânico de efeito electromagnético, c- desacoplamento galvânico de efeito óptico, d- SPI.	50
Figura 36 Esquema simplificado da unidade Principal. a- conversor de tensão, b- desacoplamento galvânico de efeito electromagnético, c- desacoplamento galvânico de efeito óptico, d- SPI, e- <i>Optocoupler</i> , SSR- Relé de estado sólido.	51
Figura 37 Esquema simplificado da unidade concentradora e de interface externa. a- conversor de tensão, b- desacoplamento galvânico de efeito electromagnético, c- desacoplamento galvânico de efeito óptico, d- SPI, e- Bus OBD.	52

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 Normas de emissões europeias, datas em que entraram em vigor e valores máximos referência.	14
Tabela 2 Sensores aplicados ao sistema e características mais relevantes para o projecto.	31
Tabela 3 Actuadores a utilizar e frequências características	33
Tabela 4 Elementos a utilizar com a unidade de comando do depósito de combustível e respectivas grandezas eléctricas.	35
Tabela 5 Elementos a utilizar com a unidade dedicada às sondas λ e grandezas eléctricas correspondentes. O elemento sensor é um sensor activo.	36
Tabela 6 Elementos a utilizar coma a unidade de comando do pedal do acelerador e respectivas grandezas eléctricas.	37
Tabela 7 Elementos a utilizar com a unidade de gestão principal e respectivas grandezas eléctricas.	38
Tabela 8 Taxa de transferência da rede CAN em função do comprimento da mesma ^[8]	41
Tabela 9 Requisitos de memória da unidade.	53

SIMBOLOGIA E SIGLAS

SIMBOLOGIA

λ – Índice de pobreza da mistura ou de excesso de ar da mistura

U_λ – Tensão aos terminais da sonda λ

SIGLAS

ADC – *Analog-to-digital Converter*, Conversor analógico-digital

CAN – *Controller Area Network*, Protocolo de comunicação local

CO – Monóxido de Carbono, Emissões poluentes gasosas

DAC – *Digital-to-analog Converter*, Conversor digital-analógico

DC – *Direct Current*, Corrente Contínua

EGR – *Exhaust Gas Recirculation*, Recirculação de gases de escape

GPRS – *General Packet Radio Service*, Protocolo de comunicação por pacotes de dados

HC – Hidrocarbonetos não queimados, emissões gasosas poluentes

ISO – *International Organization for Standardization*

NMHC – *Non-Methane-Hydrocarbons*, Hidrocarbonetos, emissões gasosas poluentes

NO_x – Óxidos de Azoto, emissões gasosas poluentes

NTC – *Negative Temperature Coefficient*, Coeficiente de temperature negative, relative a termístores

OBD - *On-Board Diagnostics*, Protocolo de comunicação e interface para diagnóstico automóvel

PMS – Ponto Morto Superior, relativo à posição do êmbolo do motor

PWM - *Pulse-width modulation*, Modelação em largura de impulso

RPM – Rotações por minuto, velocidade de rotação do motor

SSR – *Solid-state Relay*, relé de estado sólido

1 INTRODUÇÃO

Quase desde o seu aparecimento que os motores de combustão interna desempenham um papel importante na economia da sociedade pois servem para os mais variados fins, desde aplicações estacionárias para geração de energia eléctrica até aplicações de movimentação de pessoas e bens. Os motores de combustão interna associados a veículos têm permitido a movimentação de pessoas e bens em zonas de acesso difícil fomentando assim o desenvolvimento dessas zonas. Mas os motores de combustão interna não têm só vantagens, possuem também desvantagens, das quais se destacam as emissões gasosas poluentes. Com vista a reduzir essas emissões gasosas e também o consumo de combustível destes motores, têm sido aplicadas várias soluções, de entre as quais se destacam os sistemas de controlo electrónico de motores. Esse tipo de sistemas surgiu inicialmente com vista a reduzir o consumo dos motores de combustão interna e desde então passaram a ser aplicados para reduzir e controlar emissões poluentes. Este tipo de sistemas foi inicialmente aplicado em motores de ciclo Otto, mas actualmente já se encontram presentes no controlo de motores de ciclo Otto e de ciclo Diesel.

Estes sistemas são constituídos por vários sensores ligados a uma ou mais unidades de comando que avaliam as condições de funcionamento do motor e enviam os sinais de controlo aos actuadores. Verifica-se deste modo que os sistemas de controlo de motores são da maior importância em qualquer situação que envolva a aplicação de motores de combustão interna.

No projecto de um sistema de controlo de motores de combustão interna é necessário verificar qual o tipo de motor a que se destina o sistema, quais os sensores e actuadores que se deverão utilizar, quais os requisitos legais a cumprir e quais os protocolos a cumprir. Com o objectivo de desenvolver um sistema de controlo para um motor de combustão interna de ignição por fâisca, são apresentados neste documento os

fundamentos teóricos, as limitações, as premissas e os restantes passos que conduzem à conclusão do projecto apresentado.

1.1 OBJECTIVOS E MOTIVAÇÃO

Os veículos automóveis sempre foram sistemas mecatrónicos, tal como os motores destes. Nesses sistemas mecatrónicos as componentes eléctrica e electrónica têm tomado uma relevância cada vez maior pois é graças também a estas componentes que as emissões gasosas têm sido atenuadas. Os veículos automóveis têm visto as componentes eléctrica e electrónica aumentarem também, não só devido ao facto de estas componentes terem maior presença nos motores mas também devido ao facto de a propulsão ser parcialmente ou totalmente eléctrica. Devido a este facto começam a ser necessárias novas estratégias de controlo para os motores de combustão interna com vista a optimizar o funcionamento dos sistemas híbridos e também com vista a aumentar a eficiência dos motores de combustão interna.

A motivação para este trabalho deve-se ao facto de os motores de combustão interna necessitarem de controladores e de a componente electrónica possuir uma presença cada vez maior nestes motores. Os objectivos são a reunião de material teórico, estruturação da arquitectura do sistema e elaboração do sistema de controlo.

2 CONTROLO ELECTRÓNICO DE MOTORES

Os motores de combustão actuais utilizam, maioritariamente, sistemas de controlo electrónicos, mas nem sempre assim foi. Tal só foi possível após o aparecimento do transistor e de microprocessadores. Mas, os motores sempre foram sistemas electromecânicos e sempre necessitaram de controlo pois este é um tipo de motor que pode ser directamente ligado à fonte de energia e operar. Além deste ponto, a ignição tem que ocorrer num intervalo limitado e a mistura ar-combustível também tem um intervalo de variação limitado para o motor poder funcionar.

2.1 PERSPECTIVA HISTÓRICA

Os motores de combustão interna de ignição por faísca que foram aplicados nos primeiros veículos automóveis recorriam a carburadores para que a mistura ar-combustível fosse efectuada. Esta solução, apesar de simples e amplamente utilizada, possuía vários problemas que ao longo dos tempos foram sendo resolvidos sem nunca terem sido totalmente corrigidos.

A principal limitação dos carburadores simples encontra-se no facto de a mistura enriquecer com a subida do regime de funcionamento e em aceleração, variação essa que se dá entre valores extremos que permitem a ignição da mistura, tal como se verifica na Figura 1.

Outra desvantagem apresentada pelos carburadores era a relativamente baixa potência que se podia obter de motores equipados com esta solução. Devido a tal e com vista unicamente a aumentar a potência, nos anos 1930 foram desenvolvidos e aplicados sistemas de injeção directa mecânica de gasolina em motores de aviões. Essa tecnologia foi posteriormente adoptada em veículos automóveis, sendo o primeiro veículo automóvel a recorrer a esta solução apresentado em 1954.

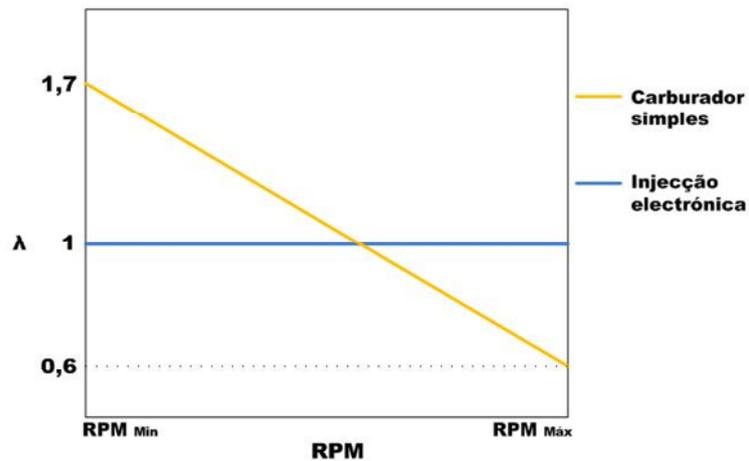


Figura 1 Variação da riqueza da mistura em motores equipados com carburador e em motores equipados com injeção electrónica.

O Mercedes-Benz 300 SL recorria a um sistema de injeção directa Bosch para conseguir desse modo um acréscimo de potência.

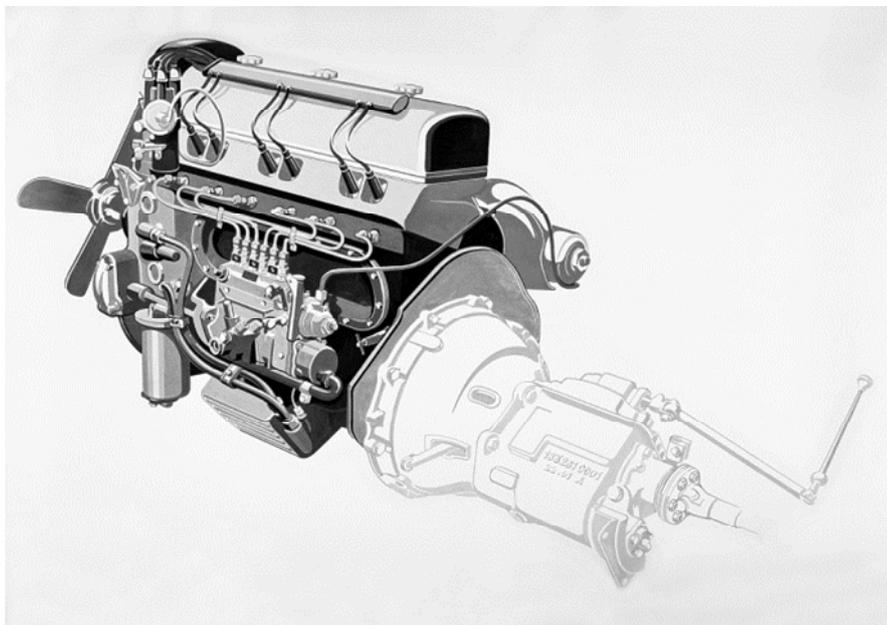


Figura 2 Ilustração do motor de seis cilindros em linha do Mercedes-Benz 300SL apresentado em 1954

Esse motor, Figura 2, utilizava uma bomba de alta pressão em linha que alimentava os injectores, que por sua vez injectavam o combustível já no interior da

câmara de combustão. A quantidade de combustível variava proporcionalmente com a rotação do motor, isto é, a quantidade de combustível injectado aumentava com o aumento da rotação do motor ^[1].

Posteriormente e na mesma década, a americana Bendix lançou o primeiro sistema de injeção electrónica ^[2]. Em 1956 é lançado o Electrojector, Figura 3, com o objectivo de aumentar a eficiência de combustão e de estabilizar os valores de riqueza da mistura. Este sistema de injeção indirecta recorria a uma estratégia de controlo que consistia em injectar uma quantidade de combustível proporcional à velocidade de rotação do motor e à pressão no colector de admissão. Este sistema apresentava a vantagem de reduzir as emissões dos motores, melhorar o comportamento em aceleração e aumentar a potência dos motores que equipava.

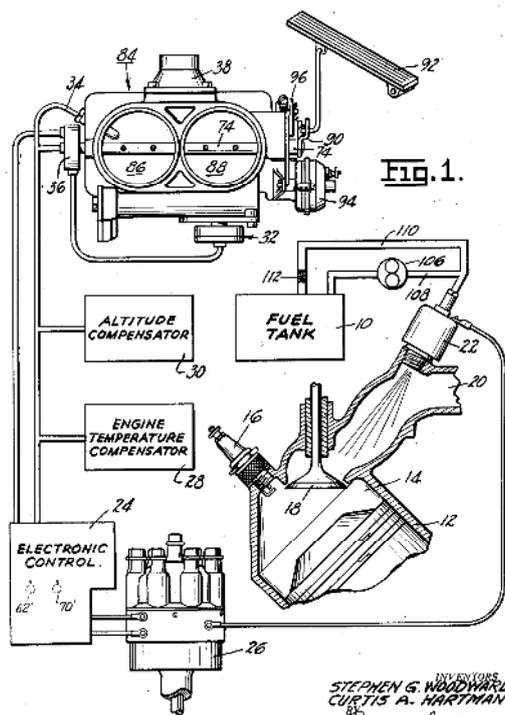


Figura 3 Arquitectura do sistema Electrojector retirado da patente do mesmo. ^[2]

As patentes desse sistema viriam a ser adquiridas pela companhia alemã Bosch que efectuou algumas alterações ao sistema para no ano de 1967 lançar o sistema de injeção electrónica Bosch D-Jetronic. Para efectuar a medição da quantidade de ar

que era admitido pelo motor, este sistema recorria a um sensor de pressão colocado a jusante da borboleta de admissão e que efectuava a comparação das pressões atmosférica e do colector de admissão. A unidade de comando recebia informação do sensor de pressão, do sensor de velocidade do motor, da posição da borboleta de admissão e da temperatura do ar de admissão para assim calcular a quantidade de combustível a injectar e enviar o sinal aos injectores. O ponto de injeção era definido por um sinal proveniente do distribuidor. A arquitectura do sistema é visível na Figura 4

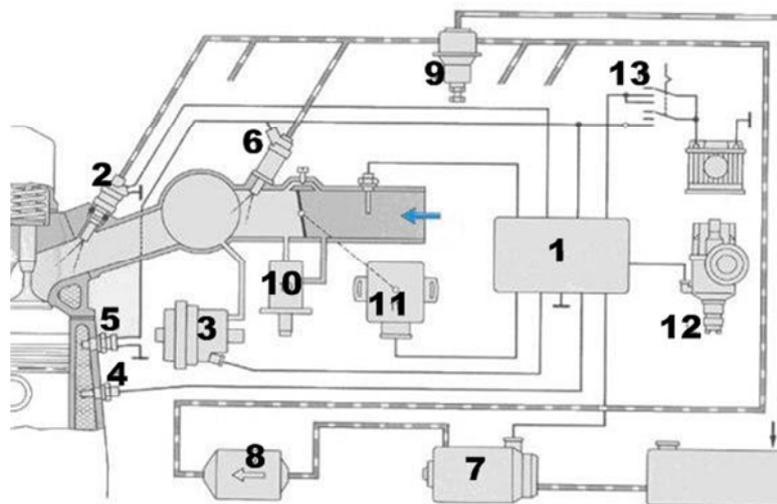


Figura 4 Arquitectura do sistema D-Jetronic. 1- Unidade de comando, 2- Injector, 3- Sensor de pressão, 4- Sensor de temperatura, 5- Termóstato, 6- válvula de arranque a frio, 7- Bomba de combustível, 8- filtro de combustível, 9- Regulador de pressão, 10- motor de compensação do ralenti, 11- sensor de posição da borboleta de admissão, 12- distribuidor, 13- interruptor de ignição

No mesmo ano em que surgiu o sistema D-Jetronic surgiram nos Estados Unidos da América as primeiras normas ambientais relativas a emissões gasosas poluentes.

Em 1973 surgiu uma crise energética a nível mundial, crise que trouxe escassez de combustível. Nesse mesmo ano foram lançados pela Bosch dois sistemas de injeção de combustível. O sistema K-Jetronic era um sistema de injeção mecânico-hidráulico que não necessita de qualquer controlo electrónico na sua versão sem controlo de emissões com recurso a sonda λ . A quantidade de gasolina injectada no colector de admissão é proporcional à quantidade de ar admitido e é injectada continuamente. Este sistema recorre a um prato metálico que se encontra ligado a um

regulador de fluxo por intermédio de uma alavanca, esse regulador de fluxo é alimentado pela bomba de combustível e vai alimentar os injectores, tal como se verifica na Figura 5. ^{[1][3]}

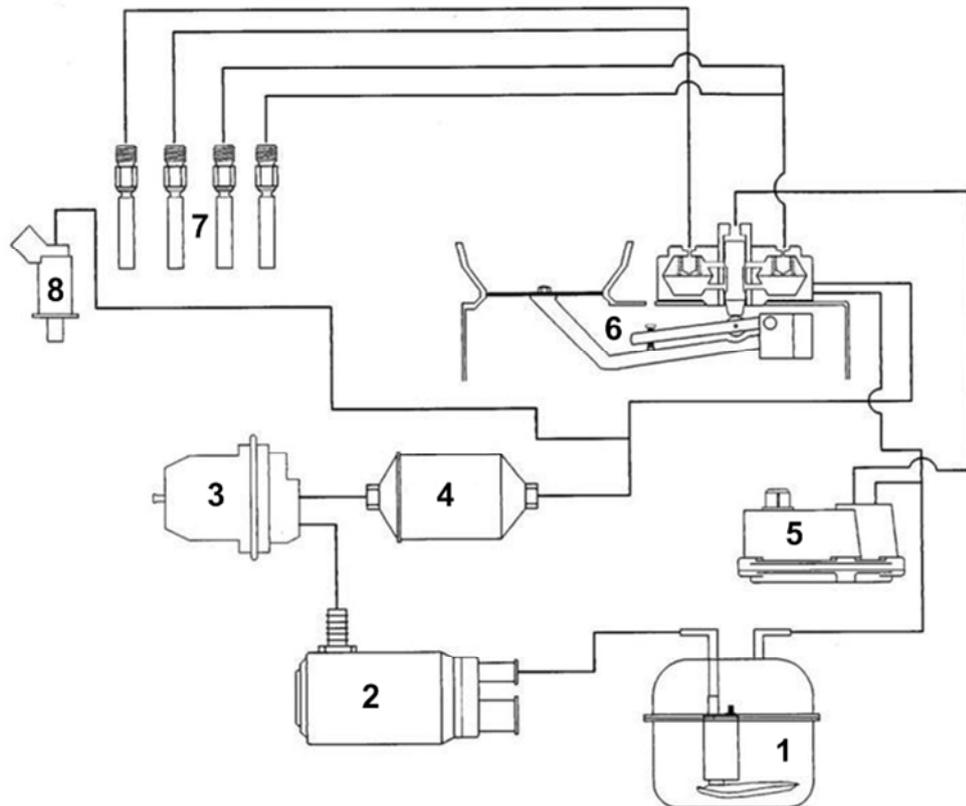


Figura 5 Arquitectura do sistema de injeção K-Jetronic. 1- Depósito com filtro, 2- Bomba de combustível, 3- Acumulador de combustível, 4- Filtro de combustível, 5- Regulador de pressão, 6- Distribuidor de combustível e Caudalímetro, 7- Injectores, 8- Injector de arranque a frio.

Este sistema é um sistema mecânico, sem qualquer controlo electrónico. Na sua versão com controlo de emissões de escape, este sistema é equipado então com uma unidade de comando que recebe um sinal de uma sonda λ e efectua então o ajuste da quantidade de combustível a injectar.

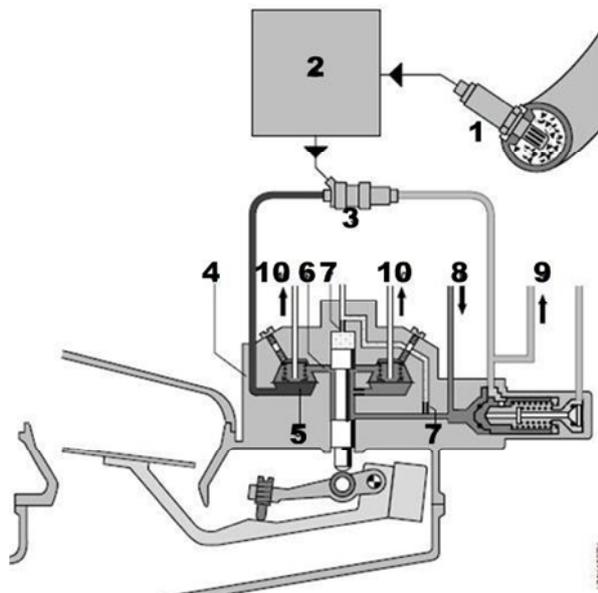


Figura 6 Módulo distribuidor de combustível com controlo de emissões em ciclo fechado do sistema K-Jetronic. 1- Sonda λ , 2- Unidade de comando, 3- Restritor variável, 4- Corpo do distribuidor de combustível, 5- Câmara inferior das válvulas medidoras de fluxo, 6- Conduatas de fluxo regulado, 7- Restritor de fluxo, 8- Admissão de combustível, 9- Retorno de combustível, 10- Saída de combustível para os injectores.

A utilização de sonda λ deve-se ao facto de serem também utilizados catalisadores nas linhas de escape para que as emissões gasosas sejam mais reduzidas. Como a gama de funcionamento de um conversor catalítico ou de um catalisador relativamente à riqueza da mistura é muito apertada, conforma se verifica na Figura 7.

Pela análise da Figura 7 verifica-se que as emissões gasosas tratadas têm um mínimo para valores de λ muito próximos de 1, com variações percentuais inferiores a 0,3. Deste modo, é necessário que o sistema de injeção mantenha a riqueza da mistura em valores próximos de $\lambda=1$ para que as emissões gasosas poluentes sejam o menor possível.^{[1][3]}

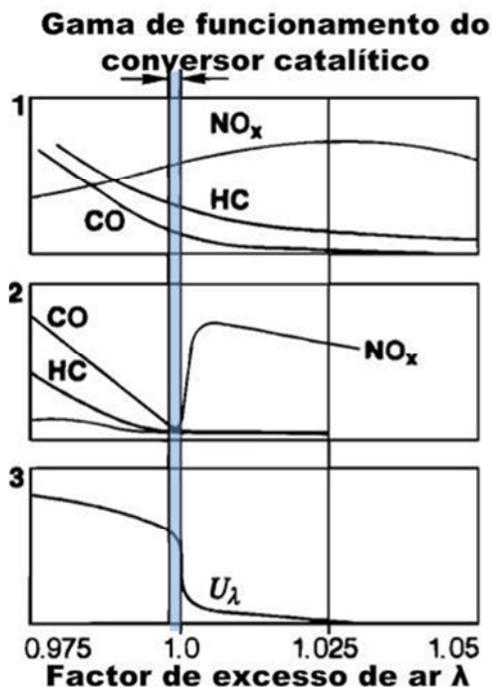


Figura 7 Variação da natureza das emissões gasosas poluentes num veículo com a variação da mistura.
1-Emissões não tratadas, 2- emissões após tratamento catalítico, 3- variação do sinal da sonda λ .

O sistema L-Jetronic, Figura 8, que também surgiu no ano 1973 era um sistema de injeção electrónica pulsada. O sistema L-Jetronic era um sistema muito semelhante ao sistema D-Jetronic, mas com as grandes diferenças de possuir um sensor de fluxo de ar e o controlo em ciclo fechado da riqueza da mistura. Outra grande diferença residia no facto de este sistema possuir circuitos integrados específicos, o que se traduzia numa unidade de comando mais simples e eficaz. O sensor de fluxo é uma placa cuja base se encontra ligada a um potenciómetro angular. A deslocação da placa é proporcional à passagem de ar, logo, o curso do potenciómetro é proporcional à passagem de ar. Essa informação é então processada pela unidade de comando juntamente com a informação proveniente do sensor de posição da borboleta, do sensor de pressão e do sensor de temperatura. A unidade envia então os sinais de controlo para os injectores que se encontram ligados em paralelo, ou seja, a injeção é efectuada em simultâneo em todos os injectores. ^{[1][3]}

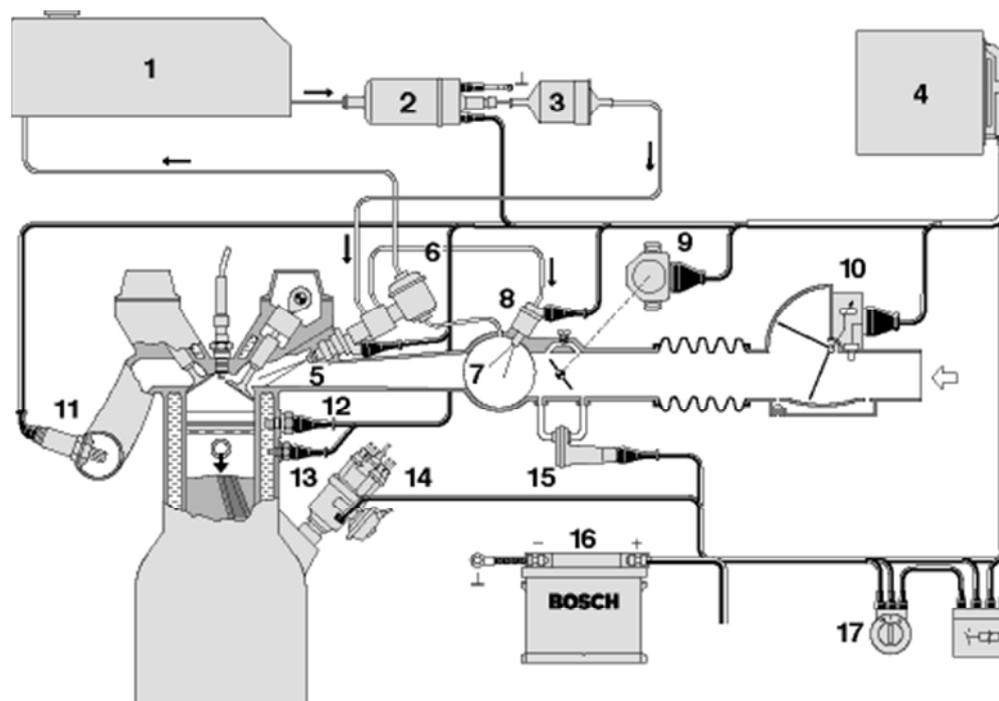


Figura 8 Esquema do sistema de injeção electrónica L-Jetronic. 1- Depósito, 2- Bomba de combustível, 3- Filtro de combustível, 4- Unidade de comando, 5- Injector, 6- Rampa de injeção com regulador de pressão, 7- Colector de admissão, 8- Válvula de arranque a frio, 9- Sensor de posição da borboleta de admissão, 10- Medidor de fluxo de ar, 11- Sonda λ , 12- Termóstato, 13- Sensor de temperatura do motor, 14- Distribuidor de ignição, 15- Motor e válvula de controlo do ralenti, 16- Bateria, 17- Interruptor de ignição.

Em 1979 é lançado pela Bosch o sistema Motronic, Figura 9. Este sistema é já um sistema de gestão electrónica do motor, isto é, é um sistema que combina a injeção electrónica com a ignição electrónica.

Este sistema, para a injeção, funciona como o sistema L-Jetronic, com a diferença de serem utilizados sensores de fase na árvore de cames e de velocidade da cambota. Estes sensores substituem o interruptor e sensores existentes no distribuidor do sistema L-Jetronic. A ignição é efectuada electronicamente, eliminando de vez a existência de elementos mecânicos e o desgaste existente a este nível.

O avanço à ignição é modificado de acordo com o regime do motor, com a posição da borboleta e quantidade de ar que entra e com as temperaturas de funcionamento.

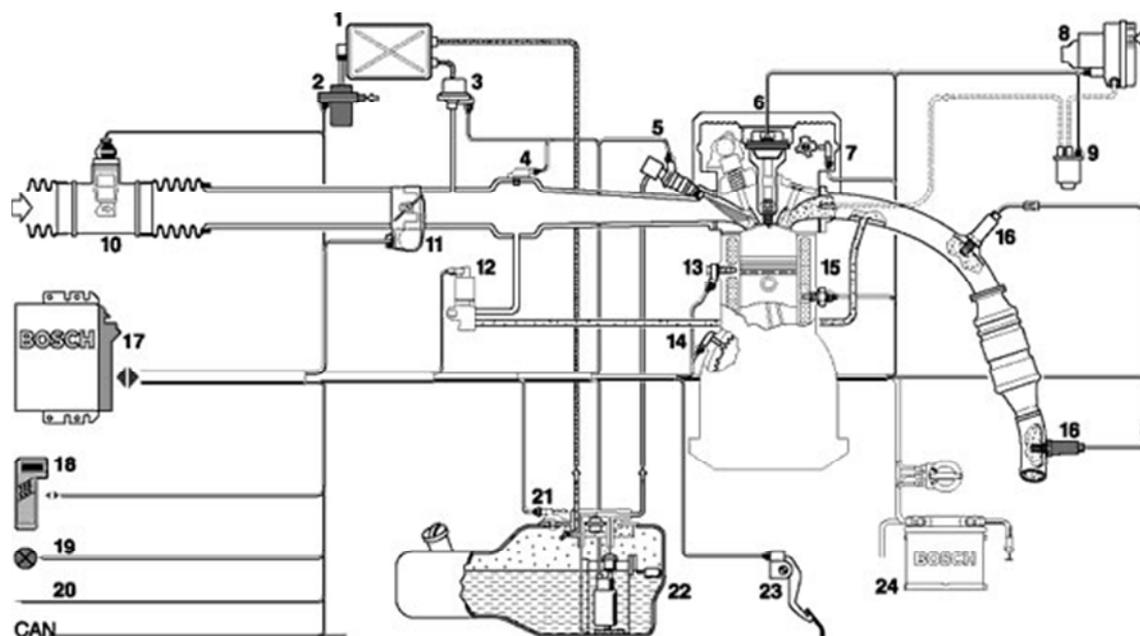


Figura 9 Esquema do sistema Motronic. 1- Canister, 2- Válvula de corte, 3- Válvula de purga do canister, 4- Sensor de pressão de admissão, 5- Injetor, 6- Bobina de ignição e vela de ignição, 7- Sensor de fase da árvore de cames, 8- Bomba de ar secundária, 9- válvula de ar secundária, 10- Sensor de fluxo de ar, 11- Dispositivo da borboleta, 12- Válvula EGR, 13- Sensor de detonação, 14- Sensor de velocidade da cambota, 15- Sensor de temperatura do motor, 16- Sonda λ, 17- Unidade de comando, 18- Interface de diagnóstico, 19- Luz de diagnóstico, 20- imobilizador do veículo, 21- Sensor de pressão do depósito, 22- Depósito e unidade intra-depósito, 23- Módulo do pedal acelerador com sensor de posição do pedal, 24- Bateria.

A injeção, quanto à continuidade temporal, pode ser classificada como contínua ou pulsada. Como exemplo de injeção contínua existe o sistema K-Jetronic, os restantes sistemas apresentados recorrem à utilização de injeção pulsada. A injeção pulsada pode ser então dividida em injeção simultânea, injeção em bloco e injeção sequencial, como se pode verificar pela análise da Figura 10. Ainda existe a injeção individual por cilindro.

Na injeção em bloco, todos os injectores se encontram ligados em paralelo, logo, injectam combustível em simultâneo. A quantidade de combustível injectada em cada rotação corresponde a metade da quantidade necessária em cada cilindro, sendo que a restante é injectada na rotação seguinte. A evaporação do combustível em cada conduta é desigual pois o ciclo em cada cilindro é diferente e a temperatura na válvula de admissão também o é. ^{[1][3]}

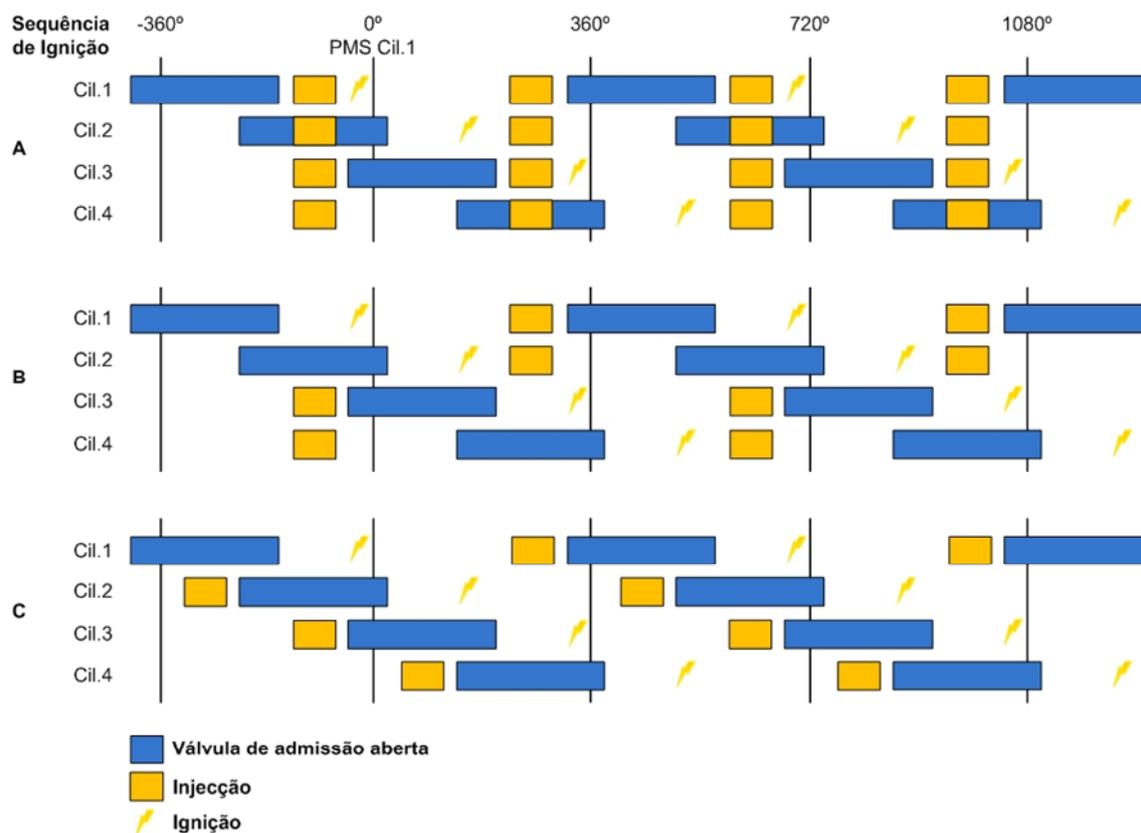


Figura 10 Tipos de injeção indirecta pulsada. A- Injecção simultânea, B- Injecção em bloco, C- Injecção sequencial.

Na injeção em bloco, os injectores encontram-se ligados em paralelo mas aos pares, isto é, cada dois injectores encontram-se ligados em paralelo. Com esta solução, o combustível injectado em cada ciclo é a correspondente à quantidade necessária em cada cilindro. A vantagem desta solução é o facto de o ponto de injeção de cada conjunto se modificar de acordo com o ponto de funcionamento do motor.

A injeção sequencial caracteriza-se por cada injector injectar a quantidade de combustível necessária a cada cilindro. O ponto de injeção é função da posição angular da cambota. Cada injector vai injectar o combustível no mesmo instante angular relativamente à abertura da respectiva válvula de admissão. Caso exista alguma variação nas condições de funcionamento do motor, só se irá reflectir na injeção seguinte do primeiro cilindro, pois os outros injectores mantêm o mesmo desfaseamento face à abertura da válvula de admissão que o primeiro injector. Esta situação conduz a taxas de evaporação de combustível diferentes em cada cilindro.

Existe ainda a injeção independente em que o ponto de injeção e a quantidade de combustível injectada por cada injector varia de acordo com as condições de funcionamento. Deste modo garantem-se quantidades de combustível, pontos de injeção e taxas de evaporação específicas e correctas para cada cilindro.

2.2 O ESTADO DA ARTE – STATE OF THE ART

Na actualidade existem muitas soluções tecnológicas passíveis de serem utilizadas no controlo de motores devido à multiplicidade de tipos de soluções de gestão de motores existentes. Essas soluções variam em relação à injeção e ignição. Em ordem a desfazer esta situação, baliza-se neste momento as especificações de projecto.

O sistema de gestão destina-se a um motor de combustão interna de ciclo Otto a quatro tempos sem admissão forçada e com injeção indirecta. Estes são os pontos que definem e restringem o sistema, sendo que existe total liberdade para o restante. Deste modo, o estado da arte é definido para sistemas de gestão de motores de combustão interna de ciclo Otto e injeção indirecta.

Para unidades comerciais encontrar qualquer informação relativa a que entradas são utilizadas e quais os princípios de gestão utilizados é muito difícil, daí que a informação apresentada não reflecta todos os pontos de controlo, algoritmos e capacidade de processamento e memória. Apresenta sim, o que são as práticas mais actuais relativamente ao controlo de motores.

Sendo um sistema de injeção directa, verifica-se que o sistema de controlo mais evoluído que a marca Bosch apresenta é o ME-Motronic. Este sistema utiliza as mesmas entradas do sistema Motronic descrito anteriormente e possui ligação a rede CAN, ligação OBD e tem que garantir que o motor que controla cumpre as normas de emissões EURO V, como se pode ver na Tabela 1.^[3]

Para cumprir as normas de emissões europeias, o veículo tem que possuir EGR, Canister, controlo em ciclo fechado com recurso a duas sondas λ e catalisador.

Tabela 1 Normas de emissões europeias, datas em que entraram em vigor e valores máximos referência.

Normas	Data	CO [g/km]	THC [g/km]	NMHC [g/km]	NO _x [g/km]
Euro V	09/2009	1	0,1	0,068	0,06
Euro VI	09/2014	1	0,1	0,068	0,06

O recurso a três sondas λ é utilizado nos sistemas de injeção directa pois estes sistemas, pontualmente, operam com misturas pobres e possuem dois catalisadores. Um dos catalisadores dos sistemas de injeção opera como acumulador de NO_x, enquanto nos sistemas de injeção indirecta são utilizados apenas catalisadores de três vias.

O sistema de controlo, além de controlar os parâmetros normais de funcionamento do motor, tem que ser capaz de controlar os sistemas auxiliares e acessórios que permitem cumprir as normas de emissões. Esses sistemas são o canister, e a EGR. O canister é um depósito com carvão activado que adsorve as emissões evaporativas do depósito de combustível e a EGR é uma electro-válvula que controla a recirculação dos gases de escape. O funcionamento destes elementos e a necessidade de utilização destes elementos serão descritos posteriormente.

2.3 PROCESSOS DE UM MOTOR, SENSORES E ACTUADORES

Um motor de combustão interna é um elemento que transforma energia química em energia mecânica. Para tal, recorre à combustão de um combustível que gera pressão e desloca o êmbolo, que por sua vez e através da biela faz rodar a cambota. Este conjunto de processos que ocorre no motor tem que ser o mais controlado possível para que se possa obter a maior eficiência possível. ^[4]

Cada um dos processos que ocorre no motor tem um tempo próprio, ou seja, uma frequência própria. A frequência de cada processo é que irá ser determinante na definição da frequência de funcionamento do sistema.

Os gases operantes do motor passam por quatro fases que são a admissão, a compressão e combustão, a expansão e o escape, isto considerando as ocorrências dentro dos cilindros. No exterior dos cilindros existe a admissão de ar através do filtro e do sistema de admissão, a formação de mistura e o escape através do sistema de escape.

Os sensores e actuadores a utilizar neste projecto são sensores convencionais da indústria automóvel devido à disponibilidade, fiabilidade e robustez. Como um automóvel é um ambiente electromagneticamente agressivo para qualquer elemento ou componente, a opção tomada foi em ordem a não surgir a necessidade de testar e implementar novas soluções que introduziriam novas variáveis de estudo e poderiam comprometer o normal desenvolvimento do sistema.

2.3.1 Sistema de Admissão, formação de mistura e combustão

No sistema de admissão, além de ser admitido ar, é efectuada a mistura ar-combustível e é também admitida uma parte dos gases de escape para recircular em no motor para assim se reduzir as emissões poluentes. Deste modo, no sistema de admissão existirão sensores para a medição da temperatura, da quantidade de ar admitido, da pressão no colector de admissão e da posição da borboleta de admissão. A frequência de aquisição de sinal para cada sensor depende da frequência a que ocorre cada processo e também das limitações impostas por cada sensor. A frequência da pressão nos colectores de admissão depende da velocidade do som nos mesmos, do diâmetro e do comprimento das condutas e da temperatura do ar de admissão. Recorrendo ao indicado em *The Motor Vehicle*, um valor temporal aceitável é 1 ms deste modo, a frequência natural do fenómeno em questão, a flutuação das ondas de pressão na admissão, é de 1 kHz. Para respeitar o teorema de Shannon, todos os sensores que se encontram relacionados com este fenómeno irão operar a uma frequência mínima de 3 kHz, isto é, no mínimo 3 vezes superior à frequência de ocorrência do fenómeno. ^[6]

Tem que se efectuar a medição da pressão no colector de admissão e do caudal de ar que são fenómenos que se encontram relacionados com a flutuação da pressão na admissão.

O sensor de caudal de ar admitido a utilizar é um sensor de filme quente ou de fio quente. Este sensor mede a velocidade do ar que passa numa secção conhecida. Deste modo, e sabendo que o caudal volúmico corresponde ao produto da velocidade do fluido pela área de passagem, ao ter a área de passagem fixa e a velocidade de passagem do ar, sabe-se qual é o caudal volúmico. Este sensor utiliza três elementos para efectuar a medição de velocidade do ar e um para medir a temperatura ambiente. Utiliza também uma resistência de aquecimento para que o ar seja aquecido junto ao ponto de medição, tal como se verifica na Figura 11.

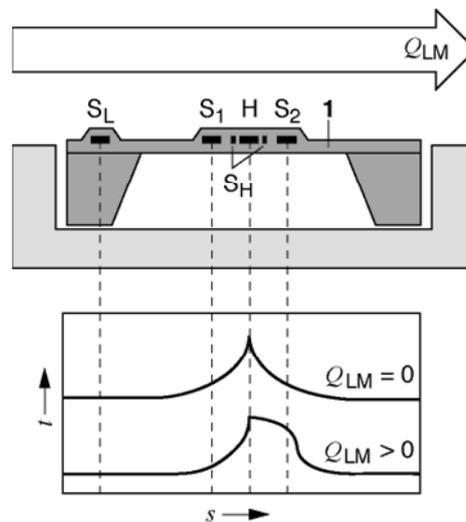


Figura 11 Esquema representativo de um sensor de filme quente e gráfico de temperatura em função da posição. S_L - Sensor de temperatura ambiente, S_1 e S_2 - Sensores de temperatura de ar a montante e a jusante da resistência de aquecimento, H - Resistência de aquecimento do ar, S_H - Sensor de temperatura da resistência, t - Temperatura, s - Ponto de medição, Q_{LM} - Caudal de ar.

Como o caudal mássico de ar corresponde ao produto do caudal volúmico pela massa volúmica do ar, tem que se medir o caudal volúmico e a massa volúmica do ar para se conhecer o caudal mássico. A massa volúmica do ar é possível conhecer através da equação dos gases ideais desde que se tenham os valores da pressão e da temperatura do ar no ponto de medição do caudal volúmico de ar. ^[3]

Os sensores de temperatura encontram-se todos colocados na mesma base de silício, mas o sensor de temperatura ambiente encontra-se separado dos restantes através de um corte no substrato para que a base deste sensor não aqueça devido à acção da resistência. O sensor de temperatura verifica então qual a temperatura ambiente a que o motor opera. O sensor da resistência indica se a resistência funciona correctamente e qual a temperatura máxima atingida no substrato e naquele ponto de medição. Os sensores S_1 e S_2 encontram-se equidistantes à resistência e verificam a temperatura do ar nos pontos respectivos. Caso a temperatura em S_1 e S_2 seja igual, significa que não existe qualquer ar a ser admitido pelo motor, isto é, o caudal de ar passante ou admitido é zero. A outra situação possível é S_1 inferior a S_2 , e nessa situação existe um caudal de ar admitido superior a zero. A quantificação da diferença entre S_1 e S_2 é que indica a velocidade do ar admitido. O sinal de saída deste sensor é uma curva de tensão em função da quantidade de ar admitido, como é visível na Figura 12.

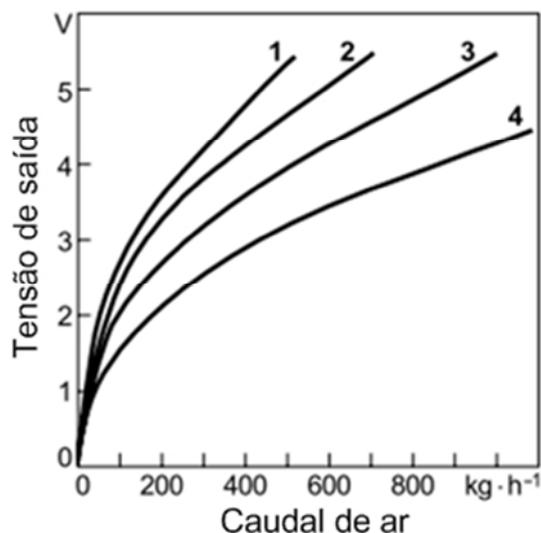


Figura 12 Gráfico de curvas características dos sensores de massa de ar de filme quente. 1 a 4- Família de curvas características dependendo da especificidade do sensor.

A outra variável que depende da flutuação das ondas de pressão na admissão é a pressão do colector de admissão e, devido a isto, a frequência de aquisição deste sinal será a mesma com que se obtém o caudal de ar admitido. O sensor de pressão é um sensor de pressão de diafragma, é um sensor que mede directamente a pressão

através da deformação de uma base onde se encontra integrado o sensor, como se verifica na Figura 13.

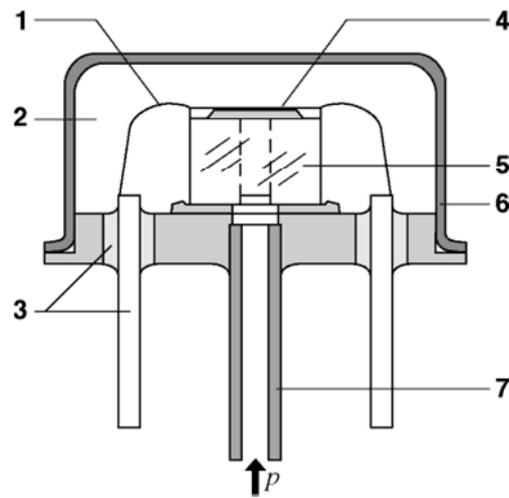


Figura 13 Esquema de sensor de pressão de diafragma. 1- Ligações internas, 2- vácuo, 3- Conectores, 4- Elemento Sensor, 5- Cristal, 6- Invólucro, p- Pressão.

O encapsulamento pode também possuir uma ligação de pressão de modo a poder ser medida uma pressão de referência como é o caso da pressão atmosférica. Deste modo elimina-se a necessidade de utilizar dois sensores de pressão, um para a pressão atmosférica e outro para a pressão do colector de admissão. Deste modo, a curva característica que se obtém da medição é dada pela Figura 14.

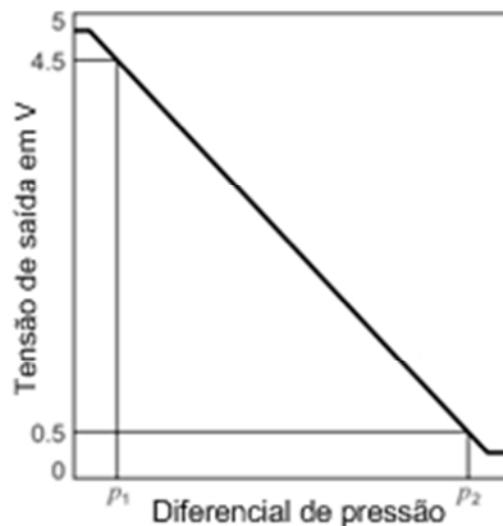


Figura 14 Curva característica de um sensor de pressão diferencial de diafragma. p_1 e p_2 - Intervalos de pressão.

O sinal obtido deste sensor é um valor em tensão inversamente proporcional ao aumento do diferencial de pressões. Tal como o sinal do sensor de fluxo de ar, este sensor necessita de tratamento digital, pois a sua saída é analógica.

Na admissão existe também o sensor de temperatura do ar. Este é um sensor termo resistivo com um coeficiente, geralmente, negativo, isto é, o valor da resistência diminui com o aumento da temperatura, como se verifica na Figura 15.

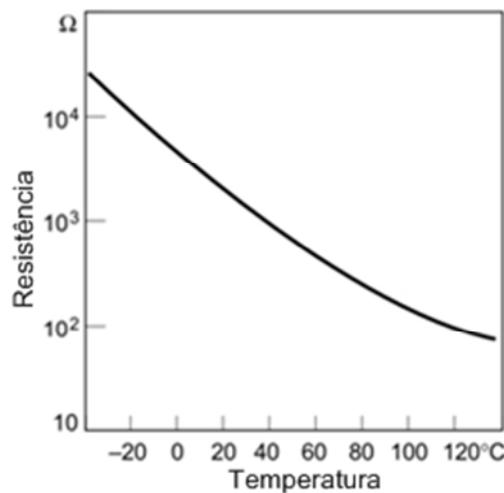


Figura 15 Curva característica de um sensor NTC.

Devido à elevada inércia térmica associada ao sensor e ao baixo coeficiente de transferência de calor por convecção entre o sensor e o ar, para este sensor a frequência de aquisição também é baixa, comparativamente aos restantes sensores. Uma frequência aceitável para a aquisição deste sinal é de 3 Hz, visto que não é um valor que se altera bruscamente. Este valor pode ser linearizado por *software* ou fisicamente recorrendo à ligação em paralelo e série com outras resistências. A opção recaiu em fazer a linearização do sensor virtualmente, isto é, recebe-se o valor analógico, faz-se a conversão e utiliza-se uma função cujo valor de entrada é o resultante da conversão e o resultado da função é o valor linearizado. ^{[1][3][4][6]}

Na admissão existe ainda a válvula borboleta de admissão cuja posição deverá ser monitorizada com vista a verificar qualquer alteração brusca no valor da pressão absoluta do colectador de admissão e de verificar se existe uma situação de aceleração ou desaceleração com vista a otimizar os consumos e as prestações do

motor. A válvula borboleta de admissão é um tipo de válvula que regula o fluxo de ar que é admitido pelo motor. Esta válvula é controlada através de interface humana, que é o pedal de acelerador, ou de um motor eléctrico que transmite o movimento à borboleta. De ambos os modos, o tempo de resposta é o mesmo pois o motor transmite à borboleta a vontade do condutor ajustada a diferentes situações. O tempo de resposta humano médio é de 200ms e o mínimo é de 100ms, como se verifica pela análise da Figura 16. [5]

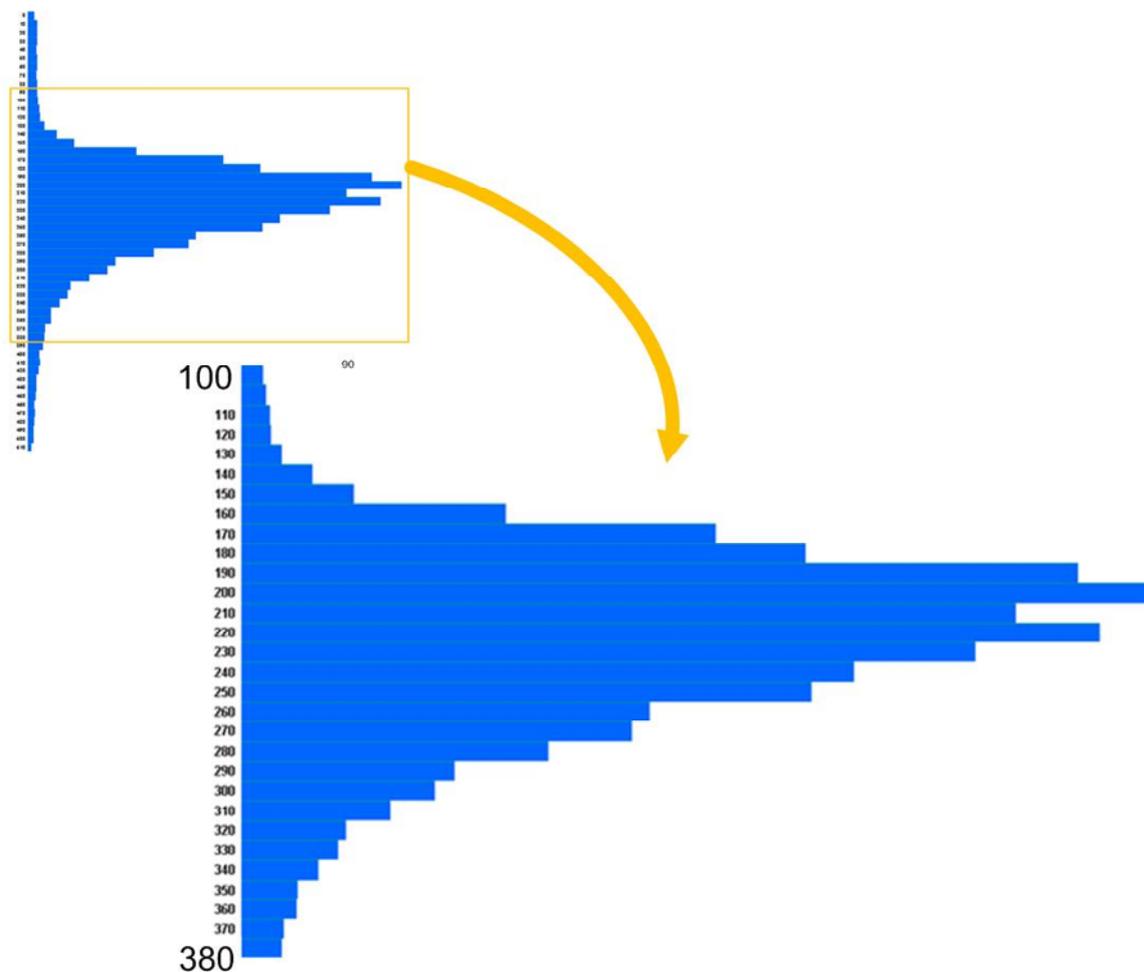


Figura 16 Gráfico de distribuição dos tempos de reacção humanos.

Pela análise da figura verifica-se que o tempo crítico que define a frequência de aquisição deste processo é o tempo mínimo, isto é, 100 ms. Este tempo de reacção traduz-se numa frequência de processo de 10 Hz, o que corresponde a uma frequência de aquisição mínima de 30 Hz e recomendável de 100 Hz, uma vez que com uma

frequência de aquisição maior se obtém uma leitura mais correcta, mas à custa da utilização de recursos do microprocessador, pois ao realizar um ciclo ou uma instrução o microprocessador não pode realizar outra instrução em simultâneo.

O sensor de posição da borboleta de admissão é, geralmente, um potenciómetro angular que traduz a posição angular da borboleta numa grandeza eléctrica que varia entre a tensão de alimentação do sensor e a tensão mínima de referência do circuito. Isto é possível devido à constituição do sensor, como se pode ver na Figura 17.

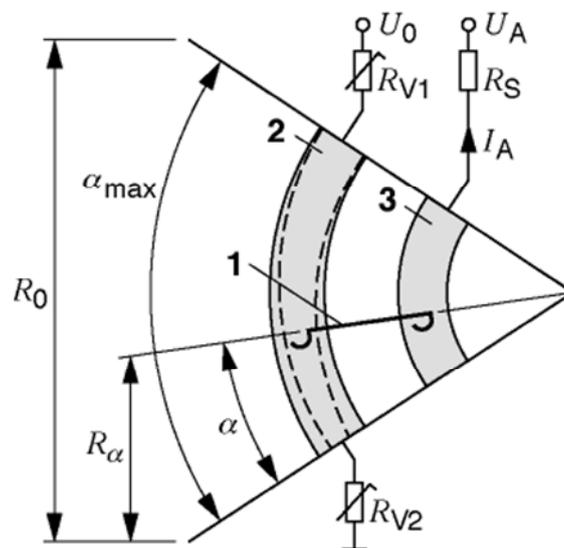


Figura 17 Esquema representativo da constituição de um potenciómetro angular. 1- Escova de varrimento, 2- Pista resistiva, 3- Pista de ligação, α - Ângulo de varrimento, R- Resistência, U_A - Tensão medida, U_0 - Tensão de alimentação, I_A - Corrente de saída.

A saída destes sensores é, geralmente, conectada a elementos de alta impedância para minimizar a corrente I_A e eliminar a divisão de corrente nestes sensores. Deste modo, a grandeza mensurável destes sensores é a tensão de saída que resulta da divisão da tensão de alimentação na pista resistiva. A saída destes sensores é, portanto, um valor em tensão proporcional ao valor do ângulo varrido, como se verifica na Figura 18.

Em vez de serem utilizados sensores resistivos, também podem ser utilizados sensores de efeito de Hall. A vantagem dos sensores de efeito de Hall reside na fiabilidade pois não possuem qualquer ligação mecânica no elemento sensor, o que

elimina qualquer existência de desgaste aumentando assim a fiabilidade do sensor e, consequentemente, do sistema. Actualmente, são utilizados aceleradores *fly-by-wire*, isto é, aceleradores que não possuem ligação mecânica directa entre o acelerador e a borboleta de admissão. Existe um sensor conectado ao pedal que verifica a vontade do condutor através do curso angular do pedal. Essa informação é então tratada juntamente com outros parâmetros a ser adquiridos pela unidade e é então calculada a posição da borboleta de admissão para os parâmetros de funcionamento em causa.

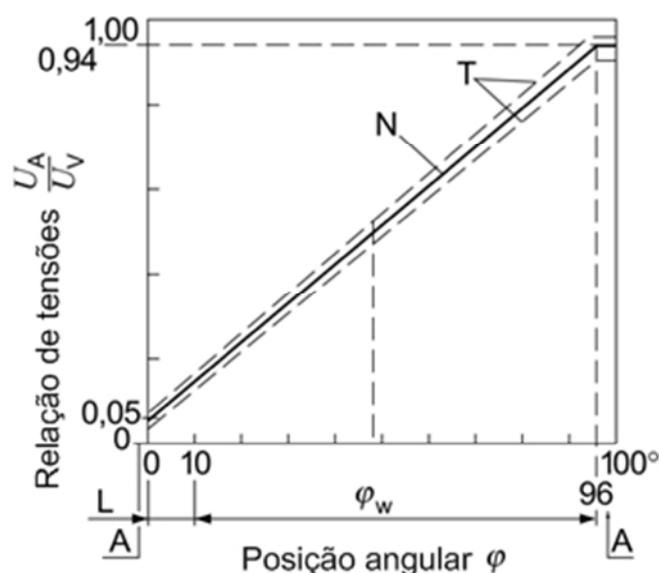


Figura 18 Curva típica de um sensor de posição angular. N- Curva de referência para o sensor, T- Intervalo de tolerância, A- Intervalo angular limitado construtivamente, L- Tolerância posicional do sensor quando aplicado, φ_w - Gama angular mensurável.

A posição angular da borboleta é então transmitida sob forma de sinal eléctrico a um motor DC que actua a borboleta e ao qual é feito um controlo em ciclo fechado com recurso a um sensor de posição angular da borboleta.

Também na admissão é efectuada a mistura ar-combustível com recurso ao injector de combustível. Este elemento recebe um sinal de controlo da unidade de comando que activa um solenóide que por sua vez desloca a agulha do injector para que o combustível possa ser injectado, como se verifica pela constituição do injector na Figura 19. Para a unidade de comando poder alimentar este elemento é necessário utilizar um circuito amplificador para se poder fornecer a potência eléctrica necessária ao funcionamento deste elemento.

Este elemento tem um tempo de resposta de 1 ms, segundo a ficha de características apresentada por um fabricante, logo, a frequência de operação mínima para este elemento será de 5 kHz, pois é uma frequência cinco vezes superior à frequência de ocorrência do processo e já não deverá interferir com o normal funcionamento do referido elemento.

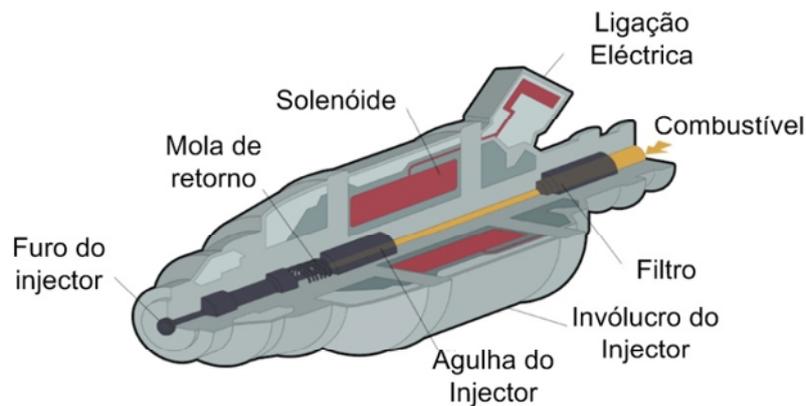


Figura 19 Vista em corte de exemplo de injetor. Injetor em posição fechada com o solenóide desligado.

O injetor deverá injectar o combustível antes de a válvula de admissão abrir pois caso o combustível seja injectado no momento em que a válvula de admissão abre, uma parte desse combustível é projectado e deposita-se na parede do cilindro oposta à válvula de admissão. Essa deposição nas paredes frias, aumenta o consumo e as emissões poluentes, daí que a opção tomada seja a de injectar o combustível com a válvula de admissão fechada.

Já na câmara de combustão e após a admissão e compressão, dá-se a ignição da mistura. Este processo ocorre devido à libertação de um arco eléctrico na vela de ignição. A vela de ignição encontra-se conectada à bobina de ignição que recebe o sinal de ignição proveniente da unidade de comando através de um amplificador de sinal. A bobina de ignição, tal como o próprio nome indica, é um elemento indutivo que é utilizado como transformador. Dois dos terminais encontram-se conectados à alimentação através da ignição e à terra. Os outros dois encontram-se conectados à vela ou às velas, dependendo dos casos, como se verifica pela análise da Figura 20. A bobina recebe energia eléctrica da bateria e alimenta a vela onde é necessário formar-se um

arco eléctrico. Os valores de tensão do arco eléctrico são da ordem de 10000-30000 V, isto é também o valor de tensão do secundário enquanto no primário os valores existentes são de 13 V, que correspondem aos valores de tensão da bateria. O comando para carregamento da bobina de ignição será dado pela unidade de comando por intermédio de um transistor ou de uma ponte de transístores.

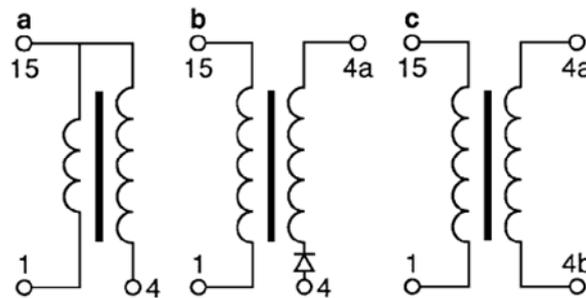


Figura 20 Esquema eléctrico de bobinas de ignição. a- Bobina de ignição convencional, b- Bobina de ignição de faísca simples, c- Bobina de ignição de dupla faísca, 1- Ligação à “terra”, 15- Ligação ao positivo da ignição, 4- Terminal da vela de ignição.

Ao utilizar transístores para o comando da bobina de ignição, consegue-se um comando mais eficaz pois é possível controlar o tempo de carregamento dos enrolamentos e, devido a tal, a energia do arco eléctrico. Além de controlar a energia contida no arco eléctrico, é também possível controlar o ponto de libertação do arco eléctrico e, devido a tal, o ponto de ignição. Ao ocorrer a libertação do arco eléctrico, ocorre o início da combustão. De acordo com a ocorrência de ignição face à posição da cambota, isto é, o desfasamento entre o ponto morto superior e o ponto de ignição. Caso o ponto de ignição seja muito precoce, isto é, o avanço à ignição seja grande, a pressão máxima é mais elevada mas conduz a uma pressão média efectiva inferior ao desejável e aumenta o risco de ocorrência de *knock*. Caso o ponto de ignição seja o óptimo para as condições de funcionamento, verifica-se que a pressão média efectiva é mais elevada que na situação anteriormente descrita e não existe auto-ignição em nenhum ponto da mistura. Caso o ponto de ignição seja muito atrasado, a pressão máxima no interior do cilindro é inferior e a pressão média efectiva é inferior à correspondente ao ponto de ignição óptimo. As evoluções de pressão em função da posição angular da cambota são descritas na Figura 21.

O *knock* é um fenómeno altamente indesejável pois a sua ocorrência pode conduzir à degradação e falha de alguns componentes do motor. O *knock* deve o seu nome ao ruído característico que origina que faz parecer que existe algo a bater no motor ou no seu interior. Este fenómeno ocorre pois as ondas de pressão geradas pela auto-ignição da mistura percorrem a câmara de combustão e podem coincidir com a frequência natural de vibração do motor ou de algum componente deste e são ampliadas deste modo.

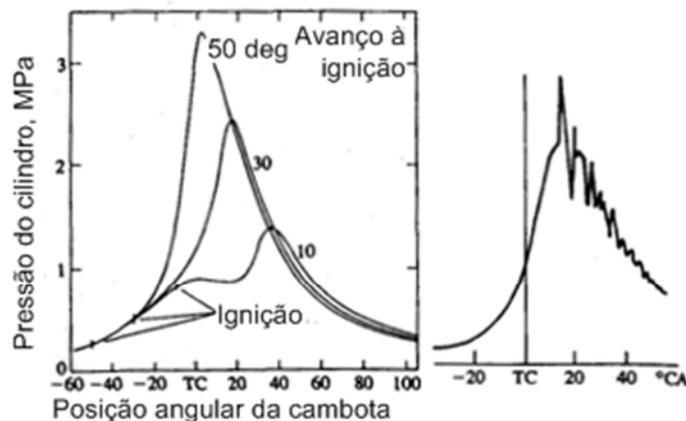


Figura 21 Gráfico de evolução da pressão na câmara de combustão com a variação do avanço à ignição para as mesmas condições de operação, à esquerda, e exemplo de evolução da pressão com *knock*.

Devido a tal, é da maior importância detectar este fenómeno para evitar consequências maiores para o motor. Para detectar este fenómeno utiliza-se um sensor piezoeléctrico cuja saída varia em amplitude e frequência proporcionalmente ao estímulo sofrido. Ou seja, este sensor envia sempre um sinal desde que o motor esteja em funcionamento, mas esse sinal aumenta a sua frequência e amplitude caso ocorra *knock*, como se verifica na Figura 22.

A frequência das ondas de pressão quando ocorre *knock* é de, geralmente, 6 a 8 kHz. Devido a isto e para não consumir muitos recursos do processador da unidade de comando, existe uma unidade dedicada ao tratamento do sinal proveniente do sensor de *knock*. Esta unidade envia então os dados tratados via rede CAN para a unidade de comando do motor.

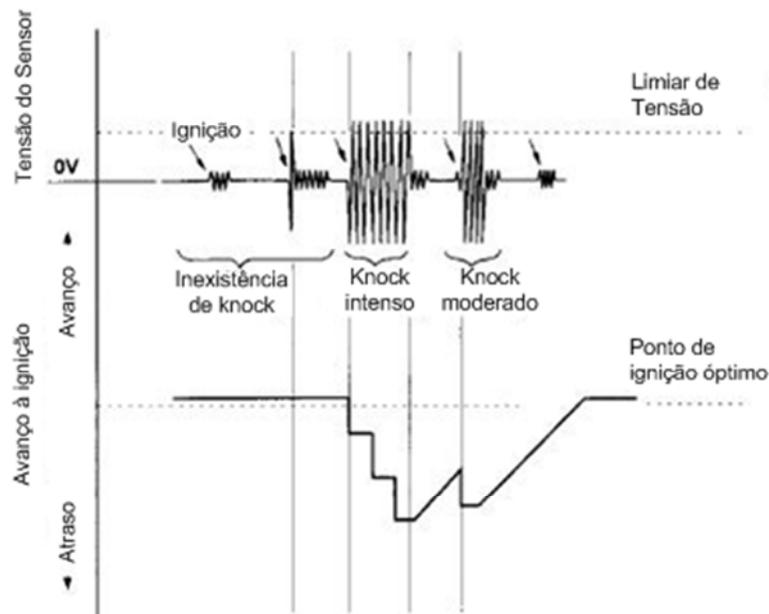


Figura 22 Exemplo de sinal do sensor de *knock*. É possível visualizar os pontos de ocorrência de *knock* e a influência que este fenómeno tem no sinal.

Após a combustão é efectuado o escape e é verificada, nessa fase, a qualidade da mistura. Para efectua a medição da qualidade da mistura utiliza-se um sensor de excesso de oxigénio. Este sensor é, essencialmente, uma pilha electroquímica que reage à presença de oxigénio. Quando a quantidade de oxigénio aumenta, a diferença de potencial aos terminais deste sensor diminui, como se pode verificar pela Figura 23.

Como um catalisador tem o ponto óptimo de funcionamento para valores de $\lambda=1$, a monitorização do sinal da sonda λ é efectuada na zona em que a variação do sinal é maior e é, praticamente, linear. Deste modo, pode-se efectuar um controlo em ciclo fechado com bastante exactidão devido à gama de valores provenientes da sonda. Como, geralmente, o valor em tensão aos terminais de sinal da sonda são inferiores a 1V, foi tomada a decisão de utilizar uma unidade dedicada.

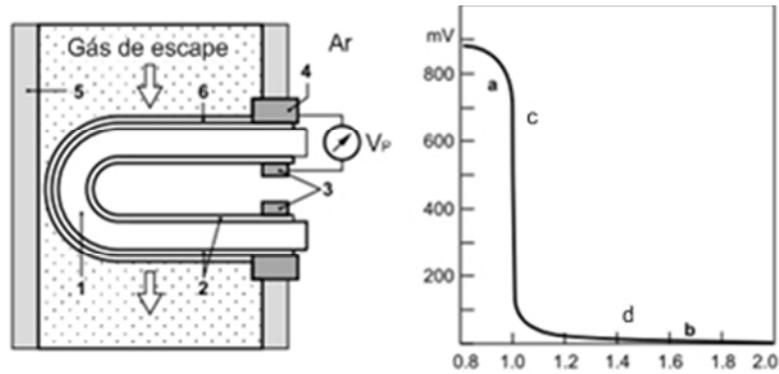


Figura 23 Esquema do sensor e curva característica. 1- Electrólito cerâmico, 2- Eléctrodos, 3- Contactos, 4- Contacto do encapsulamento, 5- Tubo de escape, a- zona de mistura rica, b- zona de mistura pobre, c- controlo em ciclo fechado para mistura estequiométrica, d- controlo da mistura pobre.

Ainda na linha de escape e com vista a reduzir as emissões encontra-se a EGR – *Exhaust Gas Recirculation*. Este dispositivo é uma válvula solenóide que permite efectuar a passagem de uma quantidade de gases de escape para a admissão para que se efectue a recirculação dos mesmos, como se verifica na Figura 24.

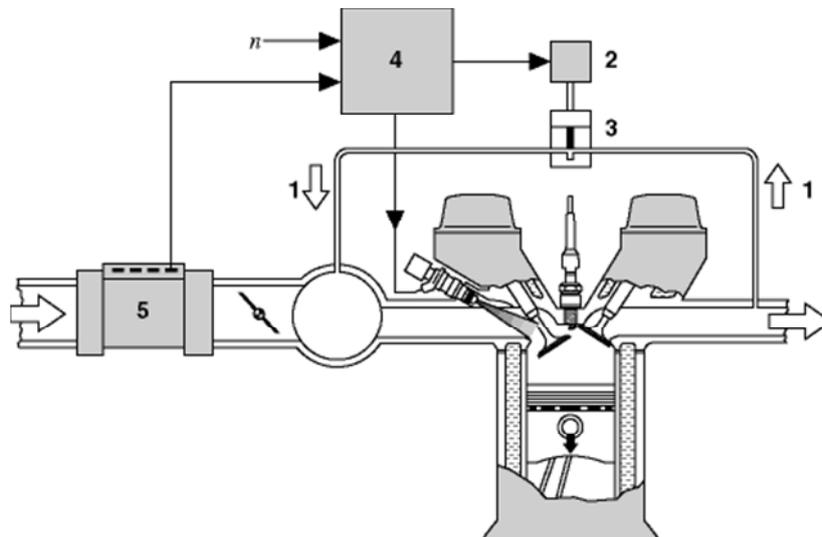


Figura 24 Esquema de aplicação do sistema EGR. 1- Gases de escape, 2- Válvula electro-pneumática, 3- Válvula de recirculação, 4- Unidade de comando, 5- Sensor de fluxo de ar.

Esta recirculação tem em vista a redução da temperatura na câmara de combustão para reduzir as emissões de NO_x e também reduzir as emissões de HC devido à passagem dos hidrocarbonetos não queimados pela câmara de combustão.

Com vista a reduzir as emissões existe também o canister. Este dispositivo é um reservatório com carvão activado que adsorve as emissões evaporativas do depósito e que as insere no colector de admissão para evitar a saturação do carvão. Essas emissões são inseridas no colector de admissão pela acção de uma válvula solenóide semelhante à válvula EGR, como se verifica pela análise da Figura 25.

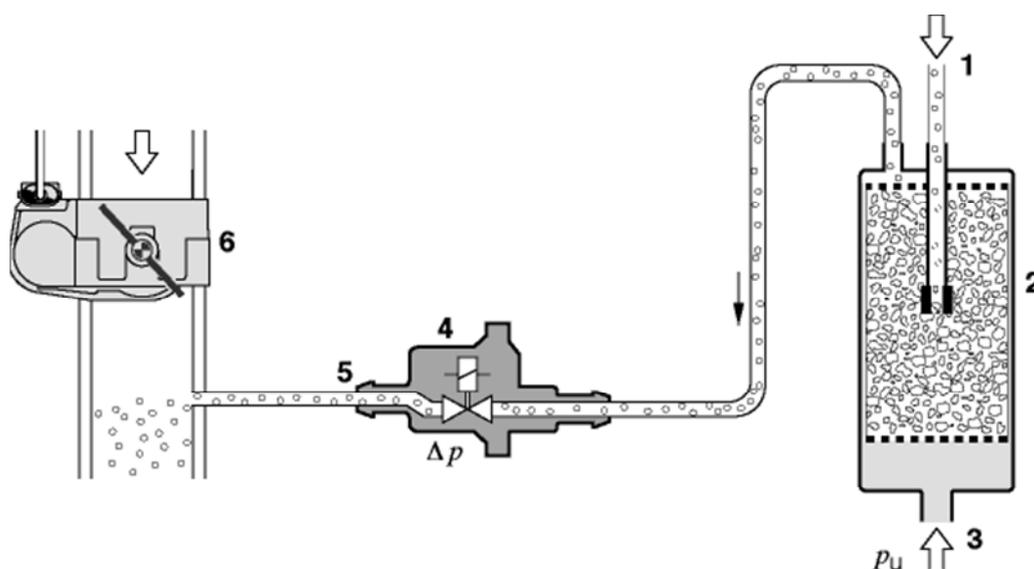


Figura 25 Esquema de aplicação de *canister*. 1- Emissões evaporativas do depósito, 2- *Canister*, 3- Entrada de ar, 4- Válvula de purga do canister, 5- linha de ligação ao colector de admissão, 6- Borboleta de admissão.

A ligação de purga encontra-se logo após a borboleta de admissão porque esta é uma das zonas de mais baixa pressão no colector de admissão, o que permite criar um efeito de sucção no *canister*. Como o *canister* se encontra próximo do depósito devido à sua natureza e finalidade, este encontrar-se-á conectado a uma unidade que monitoriza o sensor de nível do depósito e controla o motor da bomba de combustível.

O sensor de nível do depósito, tal como o sensor de posição do pedal do acelerador ou da borboleta de admissão, é um potenciómetro angular. A variação do seu curso indica a variação da quantidade de combustível, que pode não ser proporcional pois depende da geometria do depósito. Só é proporcional caso a geometria do depósito permita uma variação proporcional com a variação da altura do depósito.

No depósito e, geralmente inserido no mesmo módulo, encontra-se a bomba de combustível. Esta bomba é movida por um motor DC. A característica da bomba é

dada pelo fabricante e a sua potência varia de acordo com o caudal que esta debita. Para reduzir a quantidade de componentes utilizados e reduzir a complexidade do sistema, e também porque nos sistemas mais recentes assim acontece, elimina-se a utilização de um regulador de pressão na rampa de combustível e efectua-se o controlo da bomba em PWM de modo a obter a quantidade de combustível pretendida a cada instante.

A frequência de PWM para a bomba deve ser o mais elevada possível, mas ao mesmo tempo não deve ser elevada demais para as perdas na electrónica não serem também elevadas, mas não pode ser baixa para não interferir com a frequência normal de funcionamento do motor eléctrico. Deste modo, e utilizando valores referência, optou-se por se utilizar uma frequência de funcionamento que se situará entre 100 Hz e 1 kHz. Tal como dito anteriormente, a bomba é controlada pela unidade que controla o *canister* e monitoriza o sensor de nível. Esta unidade encontra-se em comunicação com as restantes unidades através de uma rede CAN e possui regulação de tensão local. Esta prática deve-se ao facto de existir a necessidade de comunicação entre as várias unidades e de existirem perdas e diferenças de potencial ao longo da linha de alimentação que provém da bateria que têm que ser corrigidas.

O motor deve operar dentro de um intervalo de temperaturas óptimo para que possa funcionar correctamente, logo, a refrigeração deverá ser assegurada. A monitorização da temperatura do líquido de refrigeração é efectuada pelo sensor de temperatura do fluido de refrigeração que, tal como o sensor de temperatura do ar admitido, é um termistor NTC. Ao obter a informação da temperatura lida do sensor de temperatura do fluido, pode-se actuar a ventoinha do motor em ordem a garantir a refrigeração adequada. Este elemento, tal como a bomba de combustível, deverá ser actuado em PWM para permitir um melhor controlo da temperatura e reduzir os consumos deste elemento.

O tempo de injeção varia com a tensão, assim como a velocidade dos motores eléctricos. Devido a tal, é necessário monitorizar a tensão da bateria para que se possa efectuar a correcção dos sinais de controlo.

Para que o motor possa funcionar correctamente, é necessário que esteja também bem lubrificado. Para tal, dever-se-á também monitorizar o nível de

lubrificante. Relativamente ao sensor de nível de óleo do motor, não foi encontrada qualquer informação, daí deixar-se-ão uma entrada analógica e uma entrada digital livres para que se possa adoptar um sensor de nível existente na indústria automóvel que suporte as condições de funcionamento no cárter.

Como as condições de funcionamento variam com a velocidade de rotação do motor e é necessário monitorizar a posição do êmbolo, Utilizam-se sensores de efeito de Hall para monitorizar a posição da árvore de cames, que indica qual a posição do êmbolo, e utilizam-se sensores indutivos ou de efeito de Hall para verificar qual a velocidade angular da cambota.

O sensor de efeito de Hall é verifica a proximidade de um elemento ferro magnético e apresenta aos seus terminais valores de tensão diferentes para a presença ou ausência desse elemento ferro magnético. Este sensor é utilizado devido à sua elevada fiabilidade e à simplicidade de utilização. Como, geralmente, estes sensores já possuem tratamento de sinal interno, a sua saída é digital, como se verifica na Figura 26.

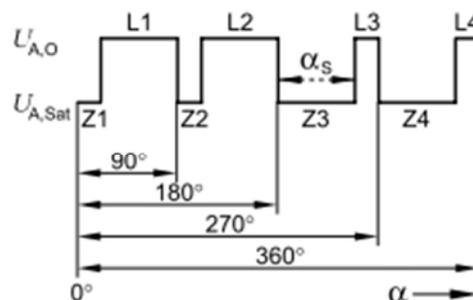


Figura 26 Exemplo de curva característica de Sensor de efeito de Hall. α - Ângulo de rotação, α_s - Duração do sinal, L- Dente ou presença, Z- Falha ou ausência, $U_{A,O}$ - Tensão de saída, $U_{A,Sat}$ - Tensão de saída de saturação.

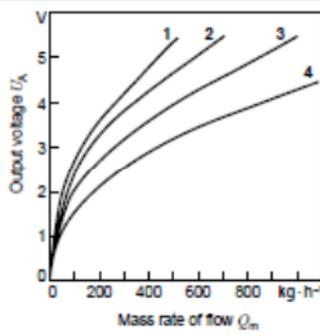
Este sensor é, geralmente, aplicado a uma roda dentada, daí a identificação da proximidade de um dente ou de um ressalto. Quando a velocidade de rotação se torna demasiadamente elevada, o sinal de saída deste sensor satura, ou seja, não sofre qualquer alteração. O ponto de saturação é dado pelo fabricante para cada sensor, daí pode-se seleccionar a roda dentada adequada à situação de modo a obter uma boa resolução a baixa velocidade e ao sensor nunca sature.

A presença de sensores de nível prende-se com a protecção do motor e cumprimento de normas ambientais. Caso o nível de combustível seja muito baixo existem falhas na entrega de combustível, o que pode danificar a bomba de combustível e também vai fazer com que as emissões de NO_x, pela observação da Figura 7, sejam mais elevadas, o que conduz a um não cumprimento das normas de emissões.

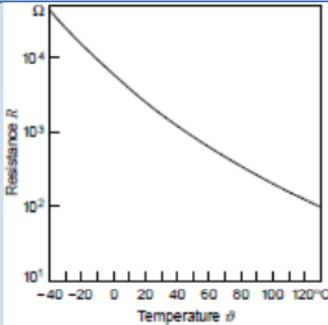
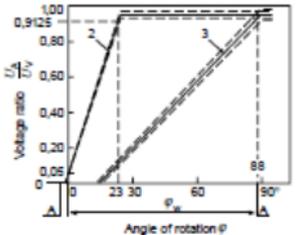
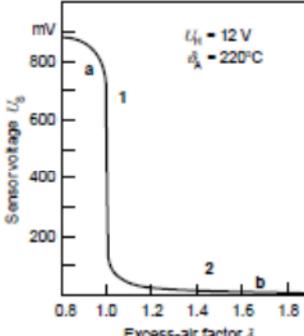
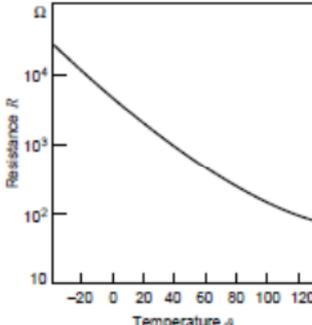
2.4 RESUMO DE SENSORES E ACTUADORES

Relativamente a sensores e actuadores, a informação relevante é apresentada nas Tabela 2 e Tabela 3.

Tabela 2 Sensores aplicados ao sistema e características mais relevantes para o projecto.

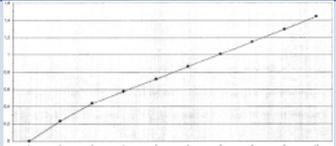
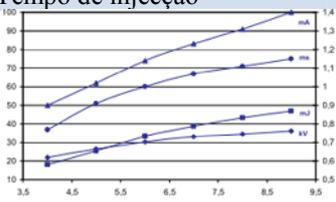
Grandeza	Tipo de Sensor	Grandeza eléctrica	Característica	Referência/ Quantidade	Frequência de operação (Hz).
Velocidade de rotação e posicionamento da cambota	Sensor de efeito de Hall	Sinal digital com $0V \leq V_{out} \leq 5V$	5V para presença de dente da roda e 0V para supressão	0 232 103 022 /1	Sensor digital
Velocidade de rotação e posicionamento da árvore de cames	Sensor de efeito de Hall	Sinal digital com $0V \leq V_{out} \leq 5V$	5V para presença de dente da roda e 0V para supressão	0 232 103 022 /1	Sensor digital
Pressão no colectador de admissão	Sensor de Pressão Piezo-elétrico (<i>Manifold Air Pressure</i> – MAP)	Entrada de 5V e saída entre 0,4 e 4,65V	Saída linear (directamente proporcional) entre 0,4 V para P _{min} e 4,65 V para P _{máx}	0 261 230 052 /1	1000
Caudal de ar de admissão	Sensor de filme quente (<i>Mass Air Flow</i> – MAF)	14V de alimentação e saída $0V \leq V_{out} \leq 5V$		0 280 217 519 /1	50

Curva 3

Temperatura do ar de admissão	Termístor NTC (<i>Air Intake Temperature</i> – AIT)	Resistência variável entre 0,364kΩ e 8,26kΩ		0 280 130 085 /1	1
Posição Angular absoluta da borboleta de admissão	Potenciômetro angular (<i>Throttle position Sensor</i> – TPS)	0,71kΩ a 2kΩ Tensão de alimentação 5V Tensão de saída máxima 5V		0 280 122 201 Ou sensor <i>built in</i> do módulo Bosch DV-E5 /1	10
Posição Absoluta do pedal do acelerador	Potenciômetro angular ou sensores de efeito de Hall	Por falta de informação relativa a este sensor, consideram-se as mesmas grandezas eléctricas do TPS, pois a tipologia do sensor é a mesma		0 280 122 201 Ou Sensor <i>built in</i> do módulo de acelerador Bosch /1	10
Excesso de oxigénio nos gases de escape	Sensor electroquímico (sonda λ)	Tensão de alimentação de 12V e tensão de saída entre 68mV e 3,5mV		0 258 104 002 /2	10
Detonação na câmara de combustão	Sensor de vibração piezo-eléctrico	26 ±8 mV/g		0 261 231 153 /2	1000 a 20000
Temperatura de fluidos e da cabeça do motor	Sensores resistivos NTC	8,24kΩ ≤ R _{-10°C} ≤ 10,66kΩ 2,26kΩ ≤ R _{20°C} ≤ 2,76kΩ 0,3kΩ ≤ R _{80°C} ≤ 0,34kΩ V ≤ 5V		0 281 002 170 /3	1
Nível de óleo do motor	Sensor digital ou sensor de posição resistivo	-	-	-	Sensor digital ou 1
Nível de gasolina do depósito	Sensor de posição resistivo	Valores de resistência	Curva característica semelhante ao sensor TPS	- /1	1

semelhantes ao
TPS

Tabela 3 Actuadores a utilizar e frequências características

Grandeza	Tipo de Actuador	Grandeza eléctrica	Característica	Referência/ Quantidade	Frequência de operação (Hz).
Quantidade de combustível	Injector de combustível	12V 14,5Ω	 Quantidade injectada vs. Tempo de injeção	280 434 801/1 /4	400
Ignição da mistura	Bobina de ignição	13V 7,5A	 Energia da fâsca Vs. Corrente do primário Vs. Duração da ignição	0 221 604 014 /4	4000
Quantidade de ar	Motor da borboleta de combustível	-	-	0 280 750 148 /1	10
Recirculação dos gases de escape	Electro-válvula	-	-	- /1	100
Purga das emissões evaporativas	Electro-válvula	-	-	- /1	100
Pressão de combustível	Bomba de combustível	13,5V 5A	-	Y580701456- 03 /1	100
Temperatura do motor	Motor ventoinha	-	-	- /1	100

Com estas tabelas, finaliza-se e especifica-se a necessidade de utilização de sensores e actuadores do sistema.

3 ARQUITECTURA DO SISTEMA

Este capítulo reflecte as opções relativas à arquitectura do sistema e, devido a tal, abordar-se-ão a alocação funcional, as tecnologias construtivas e os mecanismos de comunicação.

3.1 ESTRUTURAÇÃO MODULAR

Este é um sistema distribuído, isto é, é um sistema que partilha a geração e processamento da informação por várias unidades de medida e controlo. O facto de se recorrer a um sistema distribuído prende-se com a carga de trabalho e com a localização de cada variável. Deste modo utilizam-se várias unidades com processamento local conectadas através de uma rede CAN. A localização das diversas unidades de comando é visível na Figura 27.

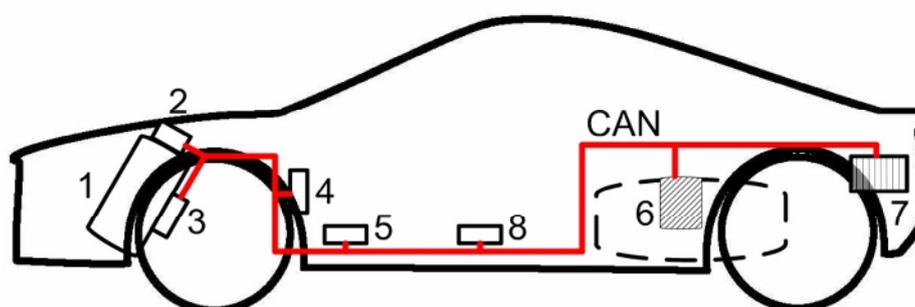


Figura 27 Distribuição dos vários módulos no veículo. 1- Motor, 2- Unidade de comando do motor, 3- Unidade de comando dos sensores de detonação, 4- Unidade de comando do pedal do acelerador, 5- Unidade de comando das sondas λ , 6- Unidade de comando do depósito e do canister, 7- Baterias, 8- Unidade de armazenamento e gestão de dados.

Tal como indicado anteriormente, a alocação das tarefas às unidades deve-se, também, à localização de cada elemento a controlar ou monitorizar. Deste modo, não só se obtém um sistema distribuído mas também um sistema em que cada unidade de controlo tem uma menor carga de trabalho e, devido a tal, um melhor desempenho. Recorre-se à implementação da rede CAN devido não só a existir competência para a aplicação da mesma, mas sobretudo devido às características da rede CAN. Este tipo de

rede de comunicação foi criado para que se pudessem conectar várias unidades de controlo em veículos automóveis. Devido a ser originalmente desenvolvido para aplicações automóveis, este sistema é bastante robusto e simples. Utiliza dois pares de condutores, um de alimentação e outro de comunicação, o que confere uma simplicidade e uma fiabilidade bastante elevadas ao sistema.

3.2 ALOCAÇÃO FUNCIONAL

Este sistema é constituído por várias unidades de comando locais que comunicam entre si através de uma rede CAN. Cada unidade controla um conjunto de variáveis locais que influenciam o comportamento global do sistema sendo alimentada através do cabo de rede CAN, com regulação local. Após processamento local, a informação é enviada para a unidade de comando que envia sinais para os actuadores. Deste modo, as unidades a projectar são as descritas em seguida.

No seu todo, o sistema recebe a informação da vontade do condutor de andar mais depressa ou mais devagar através da variação do sinal do acelerador. São então actuados os elementos responsáveis pelo aumento do regime de funcionamento do motor. A bomba de combustível debita a quantidade de combustível necessária ao funcionamento do motor de acordo com o solicitado pelo condutor e também consoante a velocidade do motor. A válvula de purga do canister é activada em regimes estacionários ou quasi-estacionários de funcionamento do motor de modo a inserir os gases de gasolina na admissão.

Tabela 4 Elementos a utilizar com a unidade de comando do depósito de combustível e respectivas grandezas eléctricas.

Elemento	Tensão (V)	Corrente (A)	Potência (W)	Quantidade
Bomba de combustível	12	10	120	1
Válvula de purga do canister	12	-	-	1
Sensor de nível do depósito	12	-	-	1

Assim, a unidade do depósito de combustível recebe sinais digitais tratados provenientes da unidade de comando central e tem que controlar a bomba de combustível e a válvula de purga do canister.

Esta unidade tem que controlar elementos cuja potência máxima pode ser superior a 120W, como se verifica na Tabela 4 Elementos a utilizar com a unidade de comando do depósito de combustível e respectivas grandezas eléctricas.

Deste modo, a bomba de combustível será alimentada em PWM com recurso a um relé de estado sólido de modo a reduzir o consumo energético da mesma e a aumentar o rendimento do sistema. O potenciómetro utilizado para medição do nível de combustível é inserido num sistema com vista a reduzir também o consumo energético do sistema.

Esta preocupação prende-se com o facto de que a energia eléctrica presente num veículo de combustão interna provém toda da mesma origem, que é o motor de combustão interna. Logo, ao reduzir o consumo de energia eléctrica, reduz-se o consumo de combustível. É com base na premissa do baixo consumo que é concebido o sistema.

A unidade de comando das sondas λ apenas recebe os sinais das mesmas e envia uma mensagem que indica se as sondas se encontram a funcionar correctamente e se a mistura se encontra dentro dos parâmetros de riqueza pretendidos. Assim consegue-se efectuar uma monitorização local do funcionamento das sondas λ e enviar a informação relevante via rede CAN para a unidade de controlo principal. O consumo energético para esta unidade é apresentado na Tabela 5.

Tabela 5 Elementos a utilizar com a unidade dedicada às sondas λ e grandezas eléctricas correspondentes. O elemento sensor é um sensor activo.

Elemento	Tensão (V)	Corrente (A)	Potência (W)	Quantidade
Sonda λ - heater	12	1,25	16	2
Sonda λ - Sensor	3,5E-03 – 0,89	-	-	2

O controlo da alimentação das sondas λ , devido à corrente que consomem, será efectuado com recurso a um relé de estado sólido. Deste modo, o funcionamento das sondas λ não é autónomo nem controlado somente pela chave de ignição. Uma vez que as sondas se encontram alocadas a esta unidade, é conveniente a alimentação das mesmas ser controlada pela unidade de comando.

A existência de uma unidade dedicada ao pedal do acelerador deve-se ao facto de a localização deste elemento ser afastada da unidade principal. Devido ao facto de já existir a rede CAN no veículo, que liga todas as unidades, e, também, de se eliminar a necessidade de efectuar cablagem específica desde o pedal do acelerador até à unidade principal, utiliza-se uma unidade local conectada à rede CAN que efectua o condicionamento de sinal do acelerador e envia mensagens através da rede CAN às unidades que utilizem esse sinal para o seu funcionamento. O único elemento conectado à unidade é o pedal do acelerador. Devido às suas características, o acelerador será directamente conectado à unidade pois tem um consumo muito baixo.

Tabela 6 Elementos a utilizar coma a unidade de comando do pedal do acelerador e respectivas grandezas eléctricas.

Elemento	Tensão (V)	Corrente (A)	Potência (W)	Quantidade
Pedal acelerador	5	2E-03	10E-03	1

Do mesmo modo e para não sobrecarregar a unidade principal, a unidade de comando dos sensores de detonação encontra-se isolada e junto ao sensor. O objectivo é efectuar o processamento local e enviar um mensagens que indicam se existe detonação ou não e qual o grau de detonação.

A unidade de gestão do motor principal recebe as mensagens provenientes das unidades descritas até este ponto, e, ainda, recebe sinais de sensores específicos que se encontram situados na baía do motor próximos desta unidade. Mensagens são transmitidas sobre a rede CAN, para serem utilizadas nas outras unidades e existem ainda sinais de saída para o controlo dos actuadores do motor. A informação de entrada que não provém da rede CAN tem origem nos sensores de temperatura, de caudal de ar,

de pressão de ar do colector de admissão, de velocidade e posição da árvore de cames e da cambota, de nível de óleo do motor e de posição da borboleta. Os sinais de saída são enviados para os injectores, para as bobinas de ignição, para o controlo da posição da borboleta de admissão, para o controlo da válvula EGR e para o controlo da ventoinha do motor. Este conjunto encontra-se sistematizado na Tabela 7.

Tabela 7 Elementos a utilizar com a unidade de gestão principal e respectivas grandezas eléctricas.

Elemento	Tensão (V)	Corrente (A)	Potência (W)	Quantidade
Injector de combustível	12	0,83	9,93	4
Bobinas de ignição	12	-	-	4
Ventoinha do motor	12	-	-	1
Motor da borboleta	-	-	-	1
Válvula EGR	-	-	-	1
Sensor de pressão do colector de admissão	5	-	-	1
Sensor de temperatura do ar de admissão	5	-	-	1
Sensor de temperatura da cabeça	5	-	-	1
Sensor de temperatura do óleo	5	-	-	1
Sensor de caudal de ar	14	0,8	11,2	1
Sensor de posição da borboleta	5	-	-	1

Devido à frequência de operação dos injectores e das bobinas, estes dispositivos serão actuados através de transístores IGBT. Não serão operados por relés de estado sólido devido à frequência de operação dos mesmos que não permite atingir as frequências de funcionamento necessárias para a correcta operação das bobinas e dos injectores.

A válvula EGR, devido ao facto de ser uma válvula de solenóide e de as suas frequências de operação serem baixas quando comparadas com as frequências de operação dos injectores, será operada com recurso a um relé de estado sólido. A ventoinha do motor será igualmente operada com recurso a um relé de estado sólido para efectuar a variação da sua velocidade e, devido a esse facto, afectará a variação do caudal de ar por ela debitado.

Devido à necessidade de armazenar dados relativos ao funcionamento do motor para o controlo de emissões e com o objectivo de não sobrecarregar a unidade de gestão principal, utiliza-se uma unidade de armazenamento e gestão de dados. Esta unidade armazena os dados mais importantes relativos a emissões com vista a poder otimizar os parâmetros de funcionamento do motor e efectua a comunicação com o exterior via OBD para o diagnóstico, assim como se pode conectar via GPRS com o exterior para efeitos de diagnóstico. Deste modo, pode-se efectuar uma manutenção preventiva e preditiva baseada nos dados fornecidos pela unidade a qualquer aparelho de diagnóstico. A grande vantagem de utilizar esta unidade reside no facto de se poder efectuar uma qualquer ligação com o exterior em qualquer momento que a necessidade surja sem que a performance do sistema de gestão do motor seja comprometida.

Deste modo, existem seis unidades responsáveis pela gestão do motor e dados associados e existe uma unidade que gere a informação do sistema, efectua o armazenamento dessa informação e efectua o interface com o exterior através de OBD e outros métodos e protocolos de comunicação.

3.3 PLATAFORMA TECNOLÓGICA

O sistema desenvolvido é um sistema de gestão distribuído, como é referido anteriormente, com as várias unidades de comando conectadas por rede CAN. Como

qualquer outra opção, possui as suas vantagens e as suas desvantagens. Como prós, um sistema descentralizado apresenta a redução do poder de cálculo em cada nó necessário devido à distribuição de tarefas e o aumento da fiabilidade devido ao aumento de simplicidade de cada unidade, mas, devido ao aumento do número de unidades de processamento, verifica-se um aumento do poder de cálculo do sistema global.

Devido ao facto de se utilizarem várias unidades de gestão do motor, distribui-se a carga de trabalho, o que permite utilizar, localmente, microcontroladores com menor desempenho e com menos memória. Deste modo reduz-se a complexidade de cada unidade de controlo. Mas, para que o sistema funcione, é necessário conectar todas as unidades, aqui sobre CAN, através de um cabo entrançado com dois pares de fios, um par entrançado para a comunicação e outro para distribuir a alimentação em potência. Para o projecto desenvolvido, a grande vantagem reside no facto de não se necessitar de cablagem específica entre cada unidade de gestão. Esta vantagem traduz-se na redução do custo global pois já existe cablagem para rede normalizada que pode ser utilizada em qualquer aplicação, sendo apenas necessário efectuar a cablagem que conecta os sensores e os actuadores às respectivas unidades de gestão. Com a, cada vez maior, utilização de sistemas distribuídos e de redes CAN no veículo automóvel, as indústrias dedicadas ao fabrico de cablagem para automóveis têm perecido com o tempo pois este tipo de produto tem caído em desuso. As vantagens da rede CAN fizeram com que cada vez mais esta rede seja utilizada nos automóveis

A rede CAN é um tipo de rede de transmissão de dados de alta velocidade, *multi-master* e que permite uma modularidade muito elevada. Foi criada para aplicações automóveis, mas depressa passou a ser aplicada noutras áreas devido à sua robustez e facilidade de utilização. A velocidade de transmissão de dados é dependente do comprimento do comprimento de cabo utilizado, mas, como se verifica na Tabela 8, nesta situação é desprezável a perda de velocidade pois o comprimento máximo a utilizar é inferior a 6m. [8]

Tabela 8 Taxa de transferência da rede CAN em função do comprimento da mesma ^[8].

Taxa de transferência	Comprimento de Bus
[kbit/s]	[m]
1000	40
500	110

A rede CAN surgiu devido à necessidade de se utilizarem unidades distribuídas em veículos automóveis, logo, tem que apresentar elevada imunidade electromagnética. Devido a todas as características descritas anteriormente e devido ao facto de esta rede ainda ser a mais utilizada e continuar bastante actual é que foi a rede escolhida para ser utilizada neste sistema.

Esta rede vai conectar unidades lógicas baseadas em microcontroladores da família MSP 430 da Texas Instruments. Esta decisão deve-se ao facto de esta ser uma família de microcontroladores muito vasta, o que permite um selecção mais precisa e adequada ao fim pretendido ^[9]. Um microcontrolador é elemento que num só sistema inclui unidade de processamento, memória de programas, memória de dados, relógio que estabelece o ritmo de funcionamento e portos de entrada e saída, como se pode ver no diagrama da Figura 28. Devido a tal, os microcontroladores são muitas vezes chamados “computadores num chip”, pois incluem todos os componentes necessários ao seu funcionamento num só chip. Inicialmente, os processadores eram compostos por unidades distribuídas onde existia um chip para cada função principal. Com o tempo, a evolução destes sistemas conduziu à concentração dos recursos num só chip. ^{[10][11]}

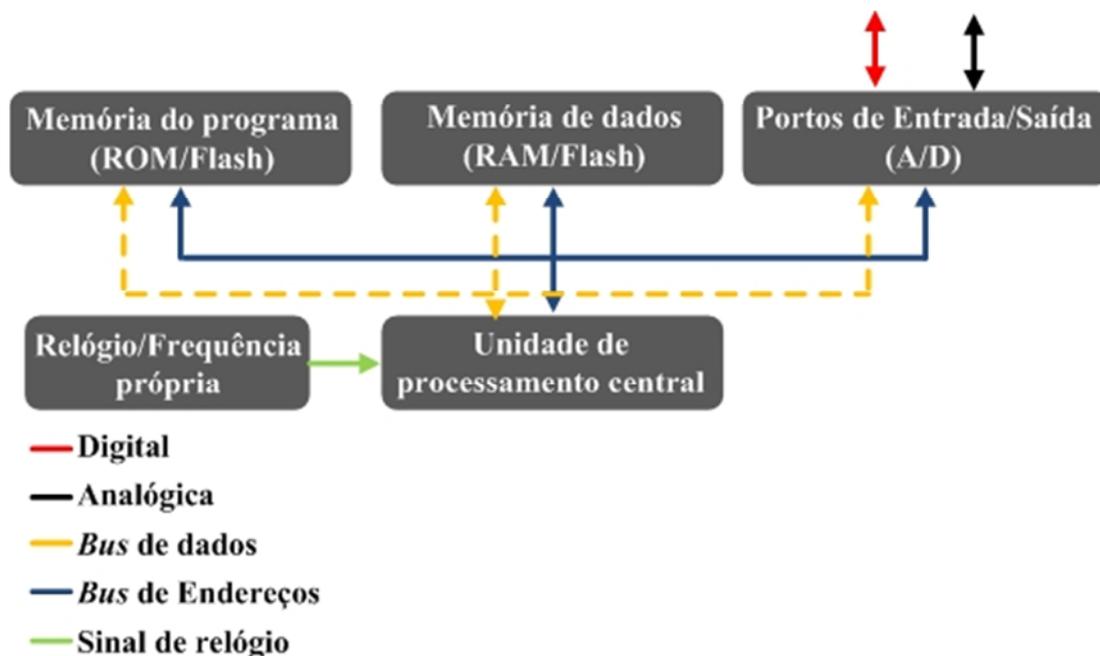


Figura 28 Esquema simplificado da arquitectura de um microcontrolador. ^[11]

A família MSP 430 é uma família de microcontroladores bastante vasta com dispositivos bastante rápidos e com uma escolha bastante vasta relativamente à dimensão da memória do controlador. São microcontroladores que apresentam entradas e saídas analógicas e digitais, o que se torna uma grande vantagem pois não existe a necessidade de utilizar outros ADCs ou DACs no circuito, o que simplifica bastante o desenvolvimento de *hardware*. A única desvantagem verificada, recordando que é um projecto com aplicação de rede CAN, reside no facto de esta família não possuir controladores CAN integrados, o que obriga à utilização de um controlador externo. Por outro lado, existe uma multiplicidade de bibliotecas de *software* disponíveis, suporte técnico e algum conhecimento prévio desta família de microcontroladores, o que se revela factor decisivo na opção tomada ^[9].

Como se pretende um produto fiável num ambiente hostil, promove-se o recurso ao desacoplamento galvânico para isolar as unidades de controlo das restantes fontes de ruído. Como o ruído se pode transmitir pelas massas ou pela alimentação, o desacoplamento galvânico é promovido pela utilização de desacoplamento galvânico óptico ou electromagnético com vista a eliminar essa propagação de ruído, promovendo uma maior compatibilidade electromagnética.

3.4 ESTRUTURAÇÃO DE SOFTWARE

Como em qualquer aplicação de controlo que recorra à utilização de microcontroladores, é necessária a utilização de *software*. Com o intuito de aumentar a simplicidade de programação e de criar abstracção relativamente ao *hardware*, utiliza-se sistema operativo em todas as unidades. Deste modo, cria-se uma base comum em que se pode trabalhar e criar uma qualquer aplicação ou actualização para as unidades sem ser necessário conhecer o *hardware*. Deste modo, todas as unidades podem ser esquematizadas de acordo com a Figura 29.



Figura 29 Estruturação básica das unidades.

Verifica-se que o sistema operativo é uma base para as aplicações e efectua o interface entre a camada física e a programação. Deste modo, é possível instalar qualquer aplicação simples sobre um sistema operativo e criar assim um sistema mais complexo e de acordo com o necessário recorrendo apenas à instalação de aplicações, tal como acontece com um computador.

O sistema operativo é um sistema operativo proprietário em tempo real, multitarefa que gere as operações de acordo com a sua prioridade e estado, tal como se verifica na Figura 30.

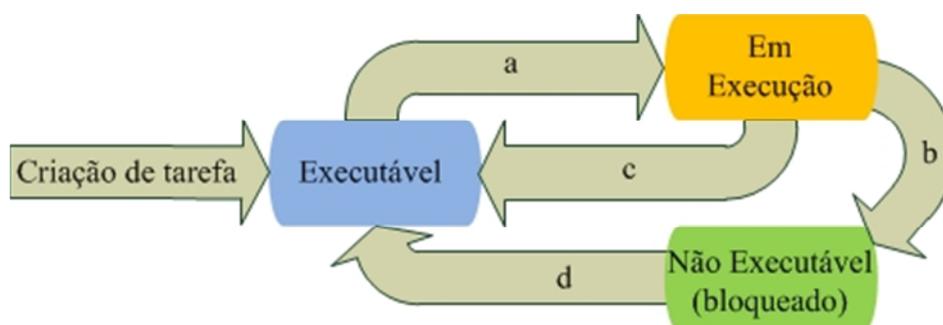


Figura 30 Diagrama de transição de estados de uma tarefa no sistema operativo. a- execução por selecção do processo, b- bloqueio, c- desistência por selecção do processo, d- desbloqueio ^[12].

O facto de se utilizar sistema operativo em todas as unidades deve-se ao desenvolvimento de *software*, pois ao existir uma base comum com todo o interface com a camada física estabelecido, torna-se mais simples e menos moroso desenvolver uma qualquer aplicação. ^[12]

4 AS UNIDADES DO SISTEMA

Com a definição da plataforma tecnológica, da alocação funcional e com a estruturação modular efectuada, pode-se definir cada unidade construtivamente. Os diagramas seguintes representam, através de blocos funcionais, a esquematização física das unidades de comando e gestão do sistema.

Este capítulo reflecte as opções construtivas relativas a cada unidade e apresenta, de forma simples, cada unidade relativamente à sua definição física. Visto que o tema da tese é “Um sistema de controlo para motor de combustão interna”, é apresentada a abordagem efectuada relativa à construção de cada unidade e à abordagem de controlo nela existente. As unidades já foram descritas funcionalmente restando, portanto, a descrição física das mesmas, apresentada de uma forma ligeira com recurso a blocos funcionais.

Estas unidades comunicam com o exterior com através da unidade concentradora de informação e interface descrita no capítulo 4.6. Por sua vez e visto que este é um sistema para aplicar num veículo automóvel, esta unidade tem que se conectar com o exterior via OBD-II para que o sistema possa ser utilizado em veículos comerciais. Deste modo, o sistema encontra-se de acordo com a norma ISO 14230 que se refere à implementação do *Keyword protocol 2000* e que indica como deve ser efectuada a ligação entre o sistema de controlo e o testador de diagnóstico, como é visível na Figura 31.

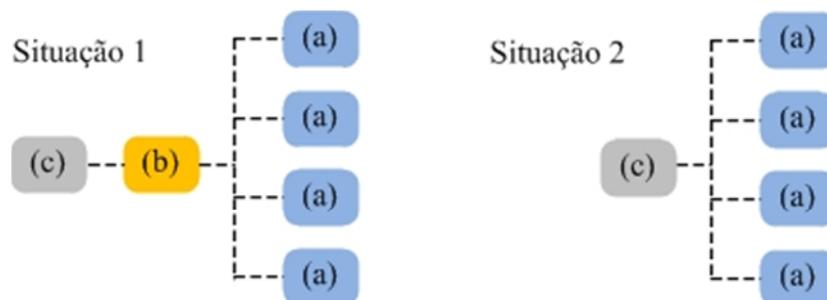


Figura 31 Arquitectura de diagnóstico de dois veículos. a- unidades de comando, b- gateway, c- testeador de diagnóstico. Situação 1: o testeador é conectado ao veículo por intermédio de uma gateway. Na situação 2, o testeador de diagnóstico liga-se directamente às unidades de controlo.

É também indicado que qualquer troço de comunicação série existente no veículo não deve exceder os 2nF e também que a massa e a tensão de alimentação têm de ser fornecidas à unidade de teste, mas através da unidade de gestão. ^[13]

4.1 UNIDADE DO DEPÓSITO

Esta unidade encontra-se conectada à rede CAN do veículo, como todas as restantes, recebendo daí a energia eléctrica necessária ao seu funcionamento e a sua via de comunicação da informação. Logo, como a rede CAN e as ligações ao sensor e actuadores são as suas ligações com o exterior, estes pontos encontram-se sujeitos ao desacoplamento galvânico.

Para tal, utiliza-se tecnologia óptica em todos os elementos onde apenas existe transmissão de informação e sinal, enquanto é utilizado desacoplamento galvânico de efeito electromagnético entre no patamar de alimentação da unidade. O facto de se utilizar o desacoplamento galvânico de efeito electromagnético deve-se à necessidade de transmitir energia entre as duas partes do desacoplamento, ao invés dos restantes pontos de aplicação do desacoplamento galvânico, onde apenas é necessário transmitir informação entre as duas partes do desacoplamento galvânico.

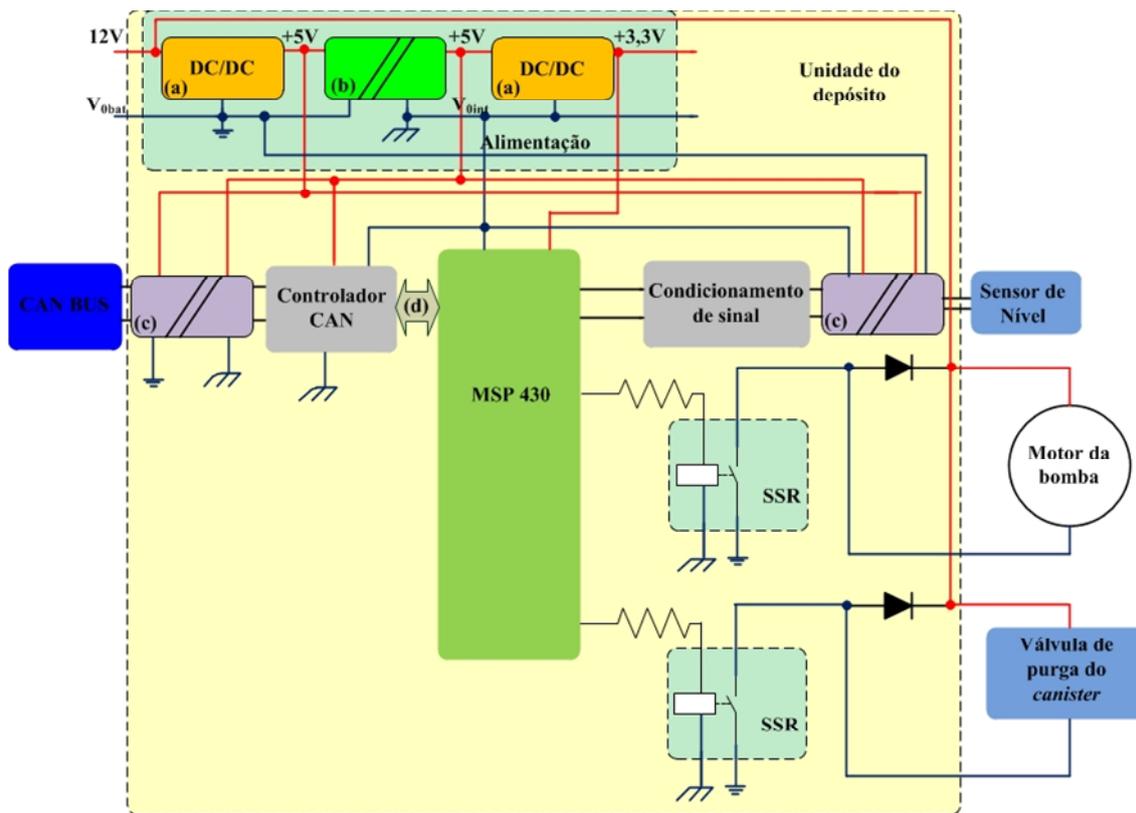


Figura 32 Esquema simplificado da unidade do depósito. a- conversor de tensão, b- desacoplamento galvânico de efeito electromagnético, c- desacoplamento galvânico de efeito óptico, d- SPI, SSR- Relé de estado sólido.

É visível na Figura 32 a arquitectura da unidade do depósito de combustível. O relé de estado sólido, SSR, é utilizado para a promoção do desacoplamento galvânico, tal como indicado anteriormente. Este elemento recorre à tecnologia óptica para efectuar o desacoplamento entre a parte de sinal e a parte de potência do relé. O díodo conectado em antiparalelo é utilizado para dissipar as correntes remanescentes dos enrolamentos das válvulas e dos motores, evitando deste modo a geração de ruído e a propagação do mesmo. O SPI é uma ligação série interna, USB ou RS232 para que exista compatibilidade entre os elementos por ele conectados, pois o microcontrolador não possui controlador CAN integrado.

4.2 UNIDADE DO PEDAL DO ACELERADOR

Esta é, das unidades presentes, uma das mais simples. É uma unidade que apenas apresenta uma entrada analógica sendo efectuada a conversão interna no microcontrolador, logo, o condicionamento de sinal existente é apenas necessário para

efectuar a passagem dos valores de tensão do sensor para valores de tensão próprios da entrada analógica do microcontrolador.

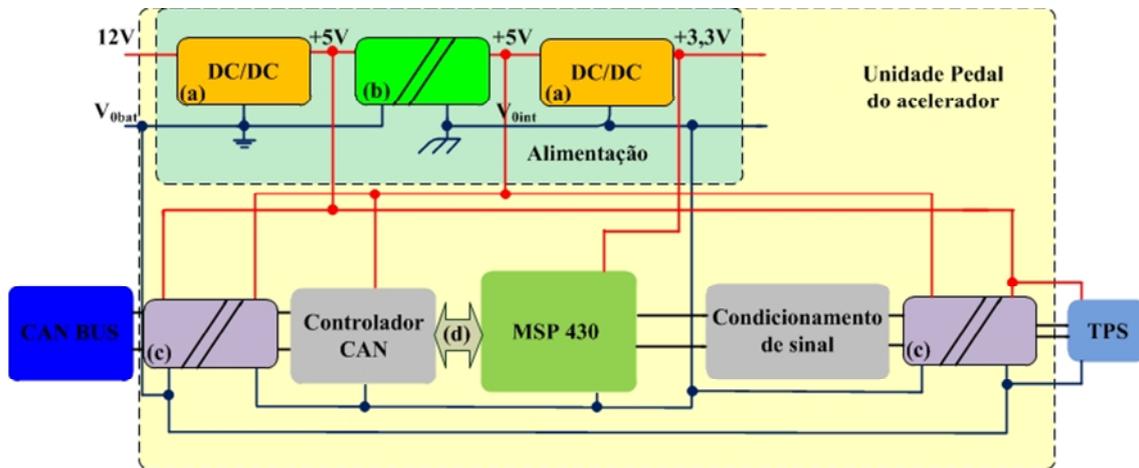


Figura 33 Esquema simplificado da unidade do Pedal do acelerador. a- conversor de tensão, b- desacoplamento galvânico de efeito electromagnético, c- desacoplamento galvânico de efeito óptico, d- SPI.

Todos os restantes elementos da unidade são comuns às restantes unidades, como se pode verificar na Figura 33.

4.3 UNIDADE DAS SONDAS LAMBDA

Esta unidade efectua o controlo e aquisição de sinal das sondas λ , logo, os sinais de entrada são correspondentes à tensão à saída do elemento sensor, descrito em 2.3.1 e à saída existem os sinais digitais para controlo das resistências de aquecimento. Como se verifica pela Figura 34, A arquitectura desta unidade é semelhante às restantes. A única especificidade reside no número de entradas e saídas e na tipologia das mesmas.

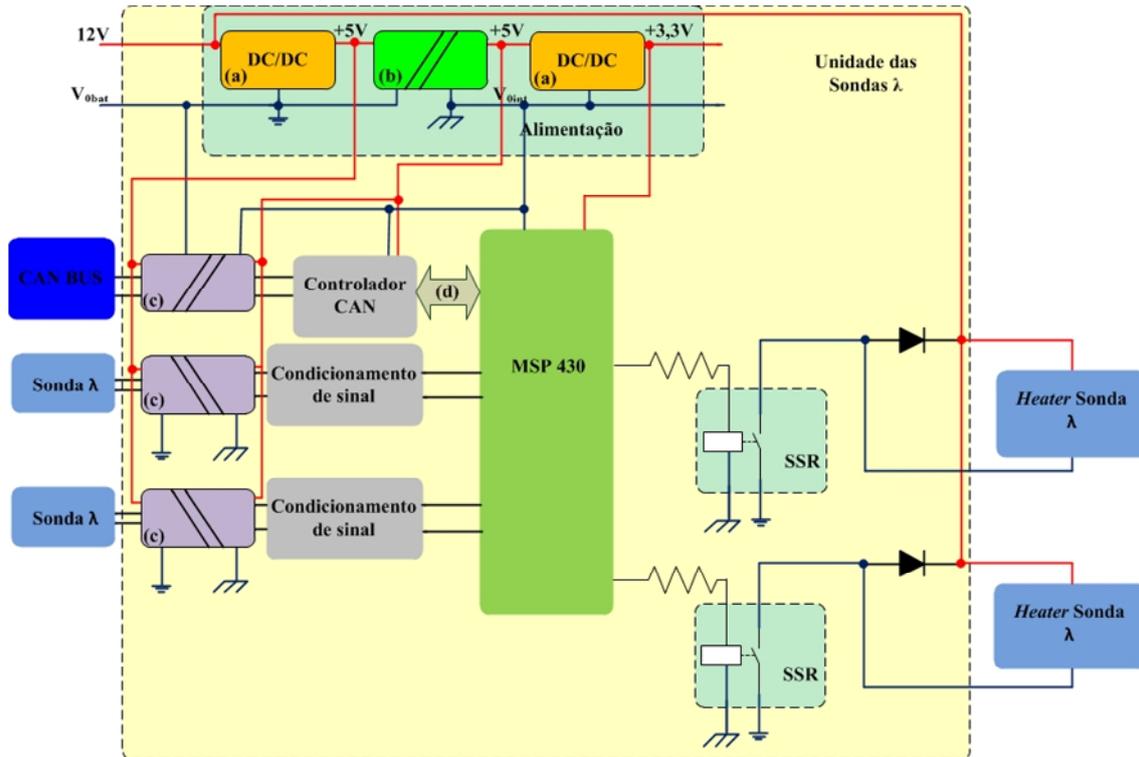


Figura 34 Esquema simplificado da unidade das sondas λ . a- conversor de tensão, b- desacoplamento galvânico de efeito electromagnético, c- desacoplamento galvânico de efeito óptico, d- SPI, SSR- Relé de estado sólido.

4.4 UNIDADE DO SENSOR DE KNOCK

Esta unidade, a par com a unidade do acelerador, é também das unidades de controlo mais simples do sistema, com se pode verificar pela Figura 35. Esta é uma unidade de aquisição de sinal em frequência e tensão, logo, o condicionamento de sinal é utilizado para passar os níveis de tensão do sensor para valores utilizáveis pela unidade.

Como o sensor de *knock* possui a saída em frequência é também necessário garantir que o condicionamento de sinal e todo e qualquer dispositivo aplicado entre o sensor e o microcontrolador não interfere com o sinal.

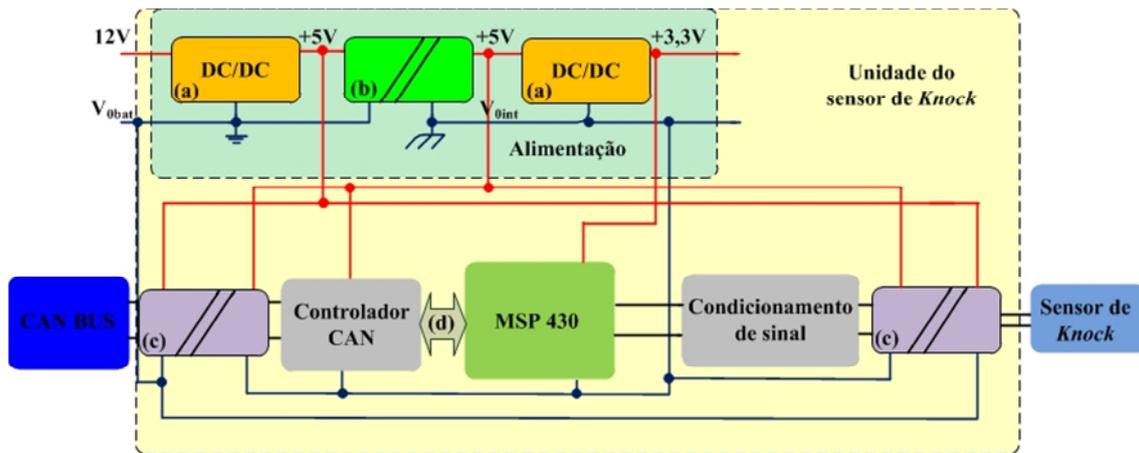


Figura 35 Esquema simplificado da unidade do sensor de *knock*. a- conversor de tensão, b- desacoplamento galvânico de efeito electromagnético, c- desacoplamento galvânico de efeito óptico, d- SPI.

4.5 UNIDADE DE CONTROLO PRINCIPAL

Esta é a unidade, presente na Figura 36 mais complexa de todas as unidades de gestão do motor. É a que mais sensores tem que monitorizar e actuadores tem que gerir. Esta unidade, devido à sua elevada especificidade, frequências variáveis da informação a adquirir e dos elementos a actuar e também devido à quantidade de informação a gerir, utiliza um sistema operativo como base para as aplicações. O sistema operativo a utilizar é o referido no capítulo 3.4.

As soluções relativas ao desacoplamento galvânico utilizadas nesta unidade são as mesmas utilizadas nas unidades restantes. A principal diferença reside na utilização de um *optocoupler* para efectuar o desacoplamento galvânico na actuação do IGBT das bobinas de ignição e dos injectores. Todos os actuadores recebem alimentação directa da bateria através do par de potência da rede CAN. O condicionamento de sinal existente nesta unidade tem a mesma finalidade do condicionamento de sinal presente nas restantes unidades. Como todos os actuadores controlados por esta unidade possuem enrolamentos na sua constituição, utilizam-se diodos em antiparalelo e/ou condensadores para evitar os *ripples* e a distorção harmónica proveniente da actuação destes elementos.

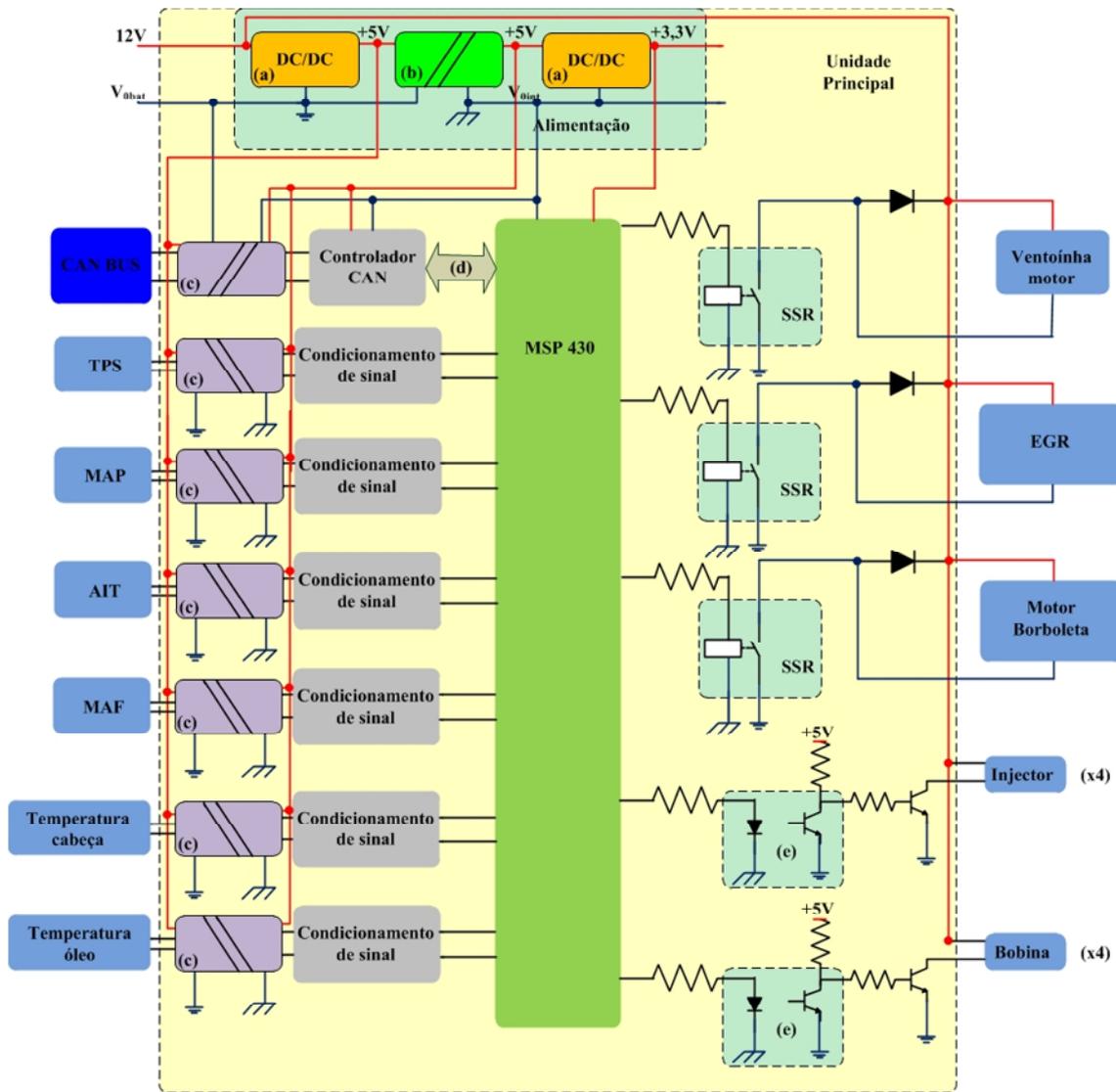


Figura 36 Esquema simplificado da unidade Principal. a- conversor de tensão, b- desacoplamento galvânico de efeito electromagnético, c- desacoplamento galvânico de efeito óptico, d- SPI, e- *Optocoupler*, SSR- Relé de estado sólido.

Mais uma vez, o meio de comunicação desta unidade com o exterior, assim como as restantes, é a rede CAN.

4.6 UNIDADE CONCENTRADORA E DE INTERFACE EXTERNA

Esta unidade difere das restantes pelo facto de não se encontrar conectada a qualquer sensor ou actuador. Esta unidade apenas efectua a gestão e armazenamento de dados, logo, as únicas ligações ao exterior desta unidade são vias de informação. Devido a tal, são os únicos elementos sujeitos a isolamento galvânico. Como se pretende manter

a unidade o menos vulnerável possível, o modem GPRS é apenas utilizado como saída de informação e não como ponto de acesso total à informação contida na unidade e alteração da mesma, tal como se verifica na Figura 37.

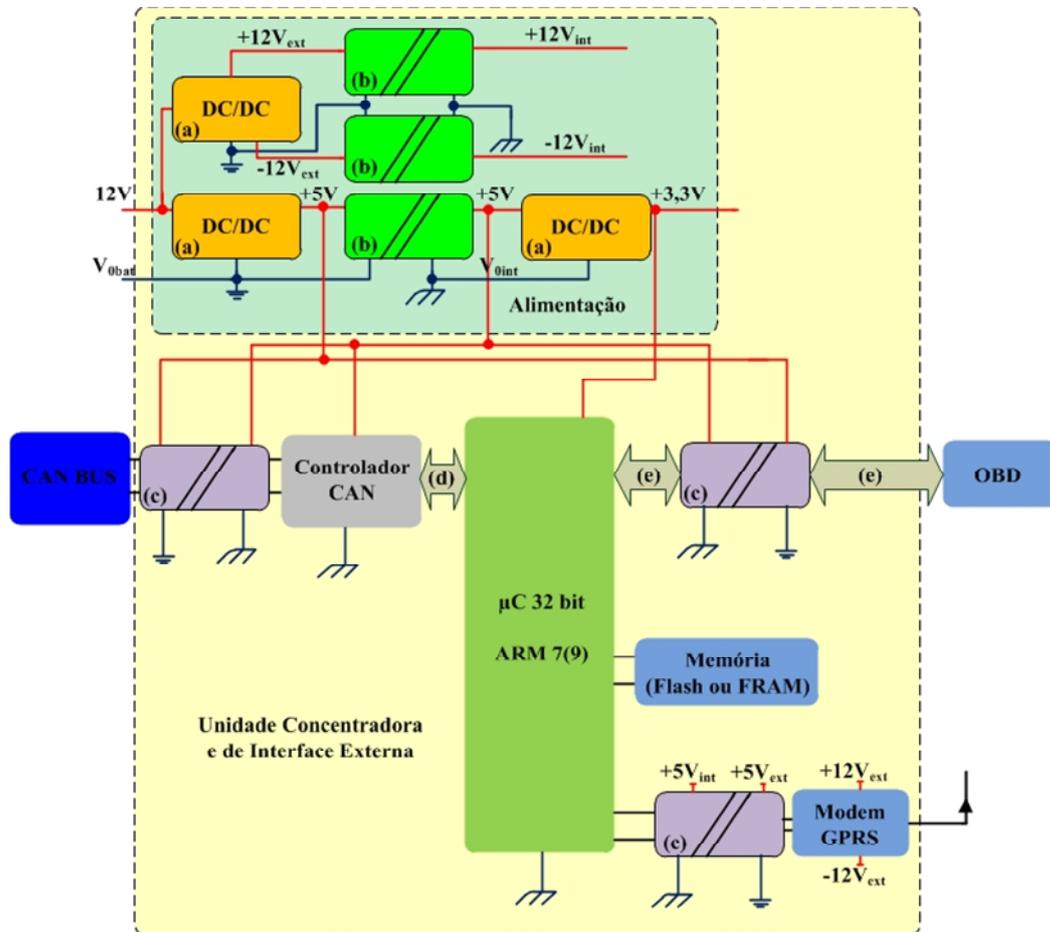


Figura 37 Esquema simplificado da unidade concentradora e de interface externa. a- conversor de tensão, b- desacoplamento galvânico de efeito electromagnético, c- desacoplamento galvânico de efeito óptico, d- SPI, e- Bus OBD.

A alteração da informação contida na unidade é apenas acessível pelo porto OBD e Pela rede CAN através de *software* específico. A memória utilizada é uma memória interna à unidade, não amovível com vista a reduzir os custos relativos à unidade e também para evitar as alterações de programação da unidade.

4.6.1 Memória da Unidade

Como o veículo tem que armazenar dados de funcionamento e alguns códigos de erro ou anomalias, principalmente relativas a emissões, tem que possuir alguma capacidade de memória. Como não foi encontrada qualquer referência relativa à extensão dessa capacidade de memória, esse valor tem que ser arbitrado.

Logo, têm que ser assumidos vários valores, tais como a distância máxima percorrida por um carro em tempo de vida e a velocidade média a que o veículo percorre essa distância. Um valor razoável para distância máxima percorrida por um automóvel ligeiro em tempo útil de vida são 400.000 km e que a velocidade média é de 50 km/h. Logo, temos uma duração, em tempo de trabalho, de 8000 horas, ou seja, 28.800.000 segundos. Segundo 2.4, ter-se-ia a necessidade de memória presente na Tabela 9.

Tabela 9 Requisitos de memória da unidade.

Variável	Frequência de operação [Hz]	Tipo de variável	Memória ocupada no tempo d vida útil do veículo [MB]
Pressão do colector de admissão	1000	float	115200
Fluxo de ar na admissão	50	float	5760
Riqueza da mistura	10	float	1152

Verifica-se então que a capacidade de memória total teria que ser superior a 122 GB. Tal valor não é praticável, o que nos remete para uma situação em que se

efectua o armazenamento esporádico de variáveis e o armazenamento de todos os códigos de erro presentes na norma ISO 14230. Como a cada revisão dever-se-á aceder ao sistema de gestão e verificar a existência de códigos de erro, um intervalo de manutenção aceitável será de 20.000 km. Logo, a memória total passa a ter um valor de 6,1 GB. Mesmo assim, é um alor bastante elevado para o que existe actualmente, mas a ordem de grandeza é aceitável.

Deste modo, assume-se como um valor realista e praticável uma capacidade de memória de 2 GB. Pois, guardam-se alguma informação, mas efectua-se uma actualização da memória constante, ou seja, os códigos de erro são armazenados normalmente na memória, assim como os parâmetros de funcionamento referidos anteriormente, mas escreve-se por cima ou efectua-se uma actualização dos dados no decorrer do funcionamento do veículo.

5 CONCLUSÃO

Com a realização deste documento e deste trabalho foi criada uma base sólida para a realização física de um sistema de gestão de motor de combustão interna de ciclo Otto. Tal afirmação baseia-se na compilação de informação efectuada e de todo o trabalho de selecção de funções e componentes realizado.

Verifica-se que, dependendo do fabricante, se podem optar por várias normas para o interface externo OBD, sendo que a opção recaiu sobre a norma ISO 14230 visto ser uma das mais utilizadas e também porque se verifica uma tendência de migração para a utilização dos protocolos referidos nesta norma. ^[14]

Conclui-se também que a tendência recai sobre a utilização de sistemas distribuídos ao invés de sistemas monolíticos com a redução da complexidade de cada unidade, mas com o aumento da complexidade e do poder de cálculo e memória do sistema global. A adição de um sistema operativo permite a criação de uma capacidade de programação ou a criação de *software* com abstracção da camada física, o que facilita e agiliza a adição de qualquer função ao sistema de controlo desde que a camada física o permita.

Como trabalho futuro resta efectuar a integração de todo o sistema e efectuar a realização de testes estáticos e dinâmicos. A realização de testes estáticos em bancada é efectuada para garantir a compatibilidade entre unidades. A realização de testes dinâmicos do sistema integrado num motor em bancada e posteriormente num veículo é efectuada para garantir a compatibilidade electromagnética do sistema com o motor e com o veículo e para efectuar qualquer afinação ao sistema.

6 REFERÊNCIAS

- [1] Bosch Gmbh, Robert. (2006), “Gasoline-Engine Management”, 3ª Ed., John Wiley and Sons Ltd, Chichester, Reino Unido.
- [2] Patente Bendix Electrojector, US002948272. 9/8/1960.
- [3] Bosch, Robert. (2005), “Manual de Tecnologia Automotiva /Robert Bosch”, Tradução 25ª Ed. Alemã, Edgard Blücher Ltda., São Paulo, Brasil.
- [4] Heywood, John. (1988), “Internal Combustion Engine Fundamentals”. McGraw-Hill Inc., U.S.A.
- [5] Reaction time statistics. Human Benchmark, <http://www.humanbenchmark.com/tests/reactiontime/stats.php>. Consultado à data 14/12/2010.
- [6] Garrett, T.K., et al. (2001), “The Motor Vehicle”, 13ª Ed., Butterworth Heinemann, U.S.A.
- [7] “Bosch Sensors Catalog”, Robert Bosch Gmbh;
- [8] Voss, Wilfried. (2008), “A comprehensive guide to CAN”, 2ª Ed., Copperhill Media Corporation, Greenfield, Massachusetts.
- [9] “Ultra-Low-Power MSP 430™ Microcontrollers”, 2011, Texas Instruments Incorporated.
- [10] “What’s a Microcontroller? Student Guide for Experiments”, V 1.9. Parallax Inc.
- [11] Davies, John. (2008), “MSP430 Microcontroller Basics”. Elsevier Ltd., Oxford, Reino Unido.
- [12] Cardoso, Francisco e Ribeiro, Bruno. “Remote Applications Programming in CANopen-Based Distributed Embedded Systems”. Coimbra.
- [13] ISO 14230 (1999). “Road vehicles - Diagnostic systems - Keyword Protocol 2000”. International Organization for Standardization, Geneva, Suíça.
- [14] “OBD II Specifications and Connections”. Euro Systems Automotive Training Inc.