
Desenvolvimento de uma Central Eletrônica aberta para Controle de Motores de Combustão Interna

Túlio Charles de Oliveira Carvalho

Dissertação submetida à banca examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Dr. Marcos Antonio Severo Mendes

Belo Horizonte, 16 de Janeiro de 2005

Dedicatória

Este trabalho é dedicado especialmente a Giselle, meus pais e familiares pela paciência, apoio e ajuda durante esta caminhada.

Agradecimentos

Agradeço ao orientador Professor Marcos Severo, aos colegas Gabriel e Fabrício, ao pessoal do CETEC e UFMG e todos que de uma forma ou outra contribuíram para a realização deste trabalho.

Conteúdo

Resumo	vi
Abstract	vii
Lista de Tabelas	viii
Lista de Figuras	xii
1 Introdução	1
1.1 Objetivo	2
1.2 Organização do texto	3
1.3 Funcionamento real do motor	5
1.4 Controle eletrônico de motor a combustão interna	10
1.4.1 Sistema de controle de ignição	11
1.5 Sistema de injeção eletrônica	18
1.5.1 Controle por mapeamento	27
1.6 Sensores Utilizados no sistema de injeção e ignição eletrônica .	28
1.6.1 Sensor de quantidade de massa de ar	29
1.6.2 Sensor de posição da borboleta	30
1.6.3 Sensor de posição angular e rotação da árvore de manivela	30
1.6.4 Sensor de pressão no coletor de admissão	32

1.6.5	Sensor de temperatura da água e ar aspirado	34
1.6.6	Sensor de oxigênio dos gases da exaustão	36
1.7	Emissões de poluentes e consumo de combustível	38
1.7.1	Emissão de CO	40
1.7.2	Emissão de HC	41
1.7.3	Emissão de NO_x	44
1.7.4	Consumo de combustível	46
1.8	Central Eletrônica Motec	47
1.8.1	Calibração de tabelas	47
1.8.2	Entradas e saídas	48
1.8.3	Software	49
2	Descrição do DSP TMS320LF2407A	51
2.1	Introdução	51
2.2	Características do TMS320LF2407A	51
2.3	Memórias	54
2.4	Central Processing Unit - CPU	56
2.5	Interrupções no TMS320LF2407A	60
2.6	Gerenciador de Eventos	62
2.6.1	Contadores de uso geral - Timers	62
2.6.2	Unidades de comparação e circuitos de PWM	67
2.6.3	Unidade de captura	69
2.6.4	Quadrature Encoder Pulse (QEP)	70
2.7	Conversores Analógico/Digital	72
2.8	Interface serial	76
2.9	Conclusão	79

3	Metodologia	81
3.1	Introdução	81
3.2	Hardware	82
3.2.1	Condicionadores de sinais	86
3.3	Software	100
3.3.1	Processamento do sinal de rotação	104
3.3.2	Módulo de Ignição	107
3.3.3	Módulo de Injeção	111
3.3.4	Módulo Driver PWM	113
3.3.5	Conversor analógico/Digital	117
3.3.6	Comunicação Serial	119
3.3.7	Mapa de Injeção e Ignição	120
3.3.8	Interpolação de Tabelas	121
3.4	Interface Homem-Máquina	124
3.5	Conclusão	131
4	Resultados de ensaios em dinamômetro	133
5	Conclusão	140
	Bibliografia	144

Resumo

Este trabalho descreve o projeto de uma central eletrônica aberta que consiste de um sistema eletrônico microprocessado capaz de gerenciar sinais elétricos provenientes dos sensores instalados no motor e, a partir destas informações, fazer o controle de um motor de combustão interna. Para a central desenvolvida foi escolhido o DSP (Digital Signal Process) da Texas Instruments Inc. modelo TMS320F2407A. Os parâmetros de configuração do sistema, bem como a estratégia de controle do motor são disponibilizados para o operador através de uma interface Homem-Máquina (IHM). Teve-se uma preocupação de se fazer uma interface bastante amigável. Foram feitos ensaios em um banco dinamométrico com o objetivo de testar a central desenvolvida. Como resultado, a central aberta obteve um desempenho de torque e potência satisfatório, superando em algumas situações a central convencional. Assim pode-se concluir que este trabalho é de grande valia para estudos de motores de combustão interna devido a flexibilidade do sistema projetado.

Abstract

This work describes a project of an opened Engine Control Unit (ECU) that is formed by micro-processed electronic system capable of managing electrical signals that come from sensors installed in the engine and that from those information, is able to control an engine of internal combustion. In order to use this ECU a digital signal process (DSP) was chosen from Texas Instruments Inc. Model TMS320F2407A. The parameters of this system configuration, as well as the strategy used to control the engine are available to the operator by an Human-Machine Interface (HMI). There was a concern of doing a friendly interface. There have been some previous tests at a engine test bed with the objective of testing the ECU projected. As a result, this ECU achieved a satisfactory torque and power development, surpassing in some moments the traditional one. Concluding, it's important to mention that this work is very significant for those who want to develop some kind of study in the internal combustion engines area, because of the flexibility of the projected system.

Lista de Tabelas

3.1	Calibração da Temperatura do Ar de entrada	90
3.2	Calibração do Sensor de Pressão no coletor	94
3.3	Mapa de Avanço de ignição	122
3.4	Mapa de Tempo de injeção	123

Lista de Figuras

1.1	Tempo de Admissão	6
1.2	Tempo de Compressão	7
1.3	Tempo de Expansão	7
1.4	Tempo de exaustão	8
1.5	Ciclo de válvulas	10
1.6	Ângulo de avanço [5]	12
1.7	Auto ignição dentro do cilindro	14
1.8	Ocorrência de detonação	15
1.9	Diagrama esquemático do sistema de ignição	16
1.10	Tensão do transformador de ignição	17
1.11	Diagrama esquemático de um sistema de gerenciamento eletrônico para motores	19
1.12	Regulador de pressão do combustível	20
1.13	Detalhes contrutivos de um bico injetor de combustível	21
1.14	Foto do bico injetor de combustível [5]	22
1.15	Controle da mistura ar-combustível em malha fechada	23
1.16	Mapa do ângulo de avanço em função da carga e rotação do motor	28
1.17	Anemômetro de Fio Quente	29
1.18	Esquema do sensor de posição da borboleta	31

1.19	Sensor de rotação	32
1.20	Sinal emitido pelo sensor de rotação	32
1.21	ponte de wheatsonte	34
1.22	Variação da resistência em função da Temperatura do Sensor de temperatura	35
1.23	Sonda Lambda	37
1.24	Sonda Lambda	38
1.25	Emissão de CO , HC e NO_x em função de λ	40
1.26	Emissão de CO em função do λ e do ângulo de avanço	41
1.27	Emissão de HC em função do λ e do ângulo de avanço	43
1.28	Emissão de NO_x em função do λ e do ângulo de avanço	45
1.29	Consumo específico de combustível em função dos coeficientes λ e a_z	46
1.30	Tabela típica do tempo base da injeção de combustível	47
1.31	Gráfico típico do tempo base da injeção de combustível	48
1.32	Diagrama da central eletrônica modelo M4	49
1.33	Painel principal do software	50
2.1	Arquitetura interna do DSP TMS320C2407A	53
2.2	Mapas de memória do DSP: programa, dados e I/O	55
2.3	Diagrama de blocos da CALU, Multiplicador e Unidade Des- locadora	57
2.4	Diagrama de blocos da ARAU	58
2.5	Diagrama esquemático das interrupções	60
2.6	Diagrama do gerenciador de eventos	63
2.7	Fluxograma do Contador	65
2.8	Contador no modo Continuous up	66
2.9	Contador no modo Continuous up/down	66

2.10	Bloco de comparação do gerenciador de evento (EV)	67
2.11	PWM Assimétrico	68
2.12	PWM Simétrico	69
2.13	PWM Assimétrico	70
2.14	Visão geral do módulo QEP	71
2.15	Sinais de um encoder	71
2.16	Diagrama de blocos ADC com os seqüenciadores SEQ1 e SEQ2	73
2.17	Diagrama de blocos ADC em modo cascata	75
2.18	Diagrama de blocos SCI	77
3.1	Arquitetura dos condicionadores de sinais	83
3.2	Arquitetura dos Drivers	84
3.3	Arquitetura do sistema de comunicação	85
3.4	Foto do protótipo da central aberta	85
3.5	Ensaio utilizando o protótipo da central aberta	86
3.6	(a) Sinal proveniente do sensor de rotação (b) Sinal condicionado	87
3.7	Condicionador de sinal da rotação do motor	88
3.8	Condicionador de sinal do sensor de temperatura	89
3.9	Calibração da temperatura do Ar de entrada	91
3.10	Condicionador de sinal do sensor de pressão	92
3.11	Flutuação da pressão no tubo de admissão	93
3.12	Gráfico da Calibração do Sensor de Pressão	94
3.13	Condicionador de Sinal da posição da borboleta	95
3.14	Circuito de Injeção de combustível	96
3.15	(a) Pulso de Comando de injeção (b) Sinal no dreno do MOSFET	97
3.16	Circuito de Ignição	98
3.17	(a) Sinal no Dreno (b) Pulso de Comando de ignição	99
3.18	(a) Sinal no Dreno (b) Sinal da corrente	99

3.19	Diagrama dos Módulos do sistema	102
3.20	fluxograma da interrupção de hardware	103
3.21	Contador sendo usado para estabelecer posição e rotação do motor	105
3.22	Módulo de processamento do sinal de rotação	106
3.23	(a) Sinal no Coletor (b) Pulso de Comando de ignição	108
3.24	Módulo de ignição	109
3.25	Módulo de injeção	111
3.26	Sinal gerado pelo módulo PWM	114
3.27	Módulo PWM	115
3.28	Módulo Conversor Analógico Digital	118
3.29	Exemplo de interpolação	124
3.30	Painel de controle	126
3.31	Sinais analógicos	127
3.32	Painel de ajustes iniciais	128
3.33	Ajuste do mapa de ignição e injeção	129
3.34	Tela de calibração da temperatura Água	130
3.35	Tela de calibração da pressão no tubo de admissão	131
4.1	Curva do torque em função da rotação	136
4.2	Curva de Potência em função da rotação	138

Capítulo 1

Introdução

Os avançados sistemas de Gerenciamento Eletrônico existentes no mercado e aplicados a motores de combustão interna são capazes de controlar todos os parâmetros de funcionamento do motor, otimizando seu rendimento e aumentando sua vida útil. Otimizar o rendimento de um motor de combustão interna significa aproveitar uma maior parcela da energia contida no combustível, transformando-a em trabalho útil.

Os sistemas eletrônicos em particular, mantém a mistura ar-combustível dentro de limites precisamente definidos que traduzem em um maior desempenho do motor, proporcionando maior economia de combustível e conforto. Para determinação precisa desses limites, as montadoras do país necessitam realizar ensaios em bancos dinamométricos, onde são simuladas diferentes condições de operação do motor, variando desde os regimes de marcha lenta até condições extremas de operação.

Além disso, as rigorosas Resoluções Nacionais de Controle de Emissões Veiculares que devem ser atendidas para a homologação e posterior venda de

veículos, restringem ainda mais suas condições de operação. A necessidade de se obter calibrações individuais precisas para cada veículo faz com que os fabricantes desses sistemas disponibilizem para as montadoras equipamentos de Desenvolvimento das Centrais Eletrônicas.

Concluída a etapa de desenvolvimento, os dados são gravados e transferidos para as centrais dedicadas, unidades responsáveis pelo gerenciamento eletrônico do motor, que equipam os veículos quando saem de fábrica.

Diversos são os fabricantes desses modernos sistemas de controle, porém centrais eletrônicas de desenvolvimento não são disponibilizadas para instituições de ensino superior ou de pesquisa, o que leva pesquisadores e alunos a buscar em novas soluções para a realização de estudos sobre novos conceitos aplicados a motores de combustão interna, bem como a possibilidade de novas alternativas de combustíveis potenciais para essa aplicação.

1.1 Objetivo

O objetivo deste trabalho é desenvolver uma central eletrônica aberta, com estrutura flexível para controle de motores de combustão interna, que possibilite não só a utilização das técnicas de controle atuais, mas também o desenvolvimento e aplicação de novos algoritmos e técnicas de controle, além de possibilitar o desenvolvimento e implementação de novos componentes mecânicos do motor e novos combustíveis. É objetivo também deste trabalho, desenvolver uma Interface Homem Máquina que permita a alteração de

parâmetros e visualização de todas as variáveis do motor na tela de um PC.

1.2 Organização do texto

O próximo capítulo, Revisão Bibliográfica, apresenta o princípio de funcionamento do motor de ciclo otto, o funcionamento do sistema de controle de injeção e ignição dos motores atuais. Além disto, é feita uma análise das emissões de gases poluentes e do consumo de combustíveis.

O capítulo Descrição do DSP TMS320LF2407A apresenta uma descrição sucinta do processador de sinais (DSP) TMS320LF2407A da família 2000 da Texas Instruments, utilizado neste trabalho. Trata-se de um DSP de ponto fixo de 16 bits que agrega diversos periféricos.

O capítulo Descrição do Sistema Desenvolvido apresenta as principais características do sistema de injeção e ignição implementado neste trabalho. Nele está presente a descrição do hardware e software, bem como a Interface Homem máquina desenvolvida.

O capítulo Resultados apresenta uma análise comparativa de um central eletrônica original com a central aberta desenvolvida neste trabalho. Como resultado foi possível notar que é possível otimizar o desempenho de motores de combustão interna.

No capítulo conclusão é discutida a utilidade de uma central de desenvolvimento em uma instituição de ensino. É mostrado também que com a utilização da central aberta é possível desenvolver novos trabalhos envolvendo

motores de combustão interna.

1.3 Funcionamento real do motor

Em um ciclo de 4 tempos a operação do motor pode ser entendida considerando a ação de qualquer um dos cilindros durante um ciclo completo do motor. Um ciclo completo de um motor de quatro tempos requer duas rotações completas do eixo de manivelas. Nas duas revoluções completas do eixo de manivelas, que corresponde a um ciclo de motor, há quatro movimentos do pistão do ponto superior do cilindro para o ponto inferior ou vice-versa. Os quatro tempos são:

1. Admissão
2. Compressão
3. Expansão
4. Exaustão

Como pode ser visto na figura 1.1 há duas válvulas para cada cilindro. A válvula da esquerda é chamada de válvula de admissão e a da direita é chamada de válvula de exaustão.

Admissão

Durante o tempo de admissão, figura 1.1, o pistão está movendo-se do ponto morto superior (PMS) para o ponto morto inferior (PMI). Nesta fase, a válvula de admissão está aberta e a válvula de exaustão está fechada. Como o pistão cria uma depressão no interior do cilindro, a mistura ar-combustível

é aspirada através da válvula de admissão para dentro do cilindro. A válvula de admissão é fechada quando o pistão atinge o ponto morto inferior. Nota-se no gráfico que o volume do cilindro aumenta com pressão constante.

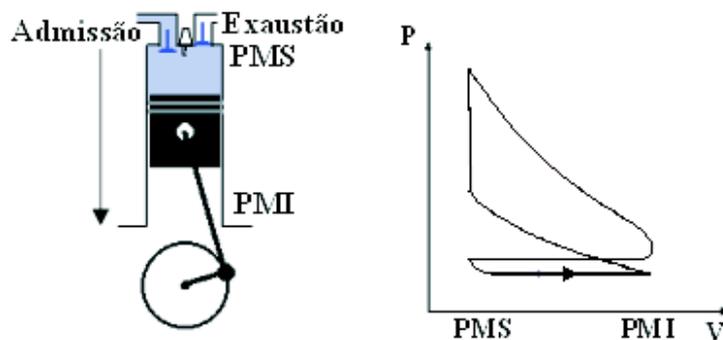


Figura 1.1: Tempo de Admissão

Compressão

Durante a compressão, figura 1.2, o pistão move-se para cima comprimindo a mistura ar-combustível contra o cabeçote do cilindro. Nesta fase as duas válvulas estão fechadas. Quando o pistão está próximo ao ponto morto superior, o sistema de ignição produz uma centelha através da vela. A centelha ignita a mistura ar combustível e esta rapidamente queima causando um rápido aumento de pressão no cilindro. Nesta fase, como mostrado no gráfico, o volume do cilindro diminui enquanto a pressão aumenta.

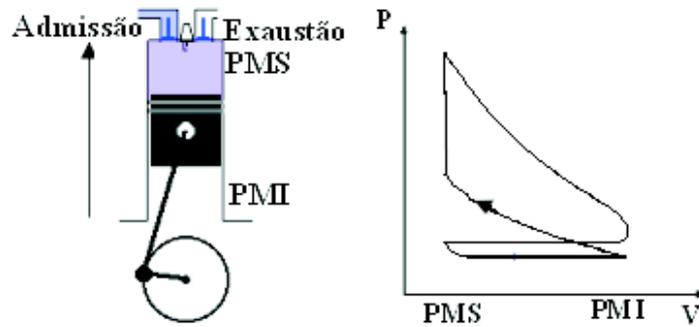


Figura 1.2: Tempo de Compressão

Expansão

A fase de expansão é mostrado na figura 1.3. Durante esta fase, a alta pressão criada pela queima da mistura força o pistão para baixo. É somente durante este estágio que a potência útil é gerada para o motor. Aqui, a pressão no cilindro é transferida na forma de trabalho.

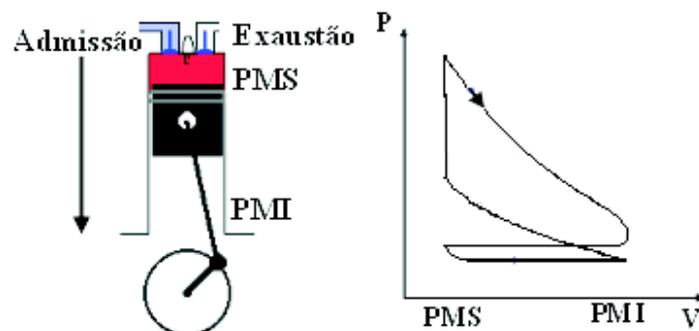


Figura 1.3: Tempo de Expansão

Exaustão

Durante a exaustão, como mostrado na figura 1.4, o pistão está de novo movendo-se para o ponto morto superior. A válvula de exaustão está aberta e o pistão força o gás queimado do cilindro através da válvula até o sistema de exaustão, e daí para a atmosfera.

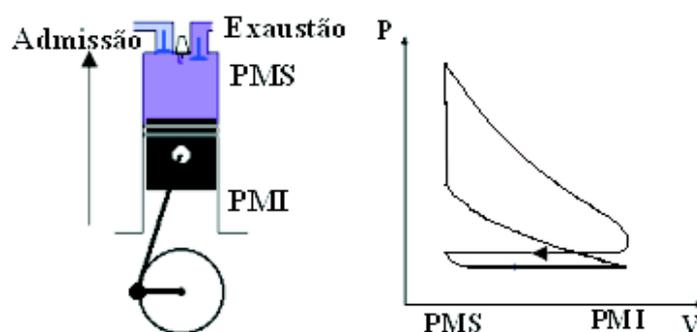


Figura 1.4: Tempo de exaustão

A Ignição inicia-se momentos antes do ponto morto superior durante a fase de compressão. Este instante é a medida angular da rotação do eixo de manivelas referenciado ao PMS do pistão. Para um moderno motor de sistema de ignição por centelha, este ângulo é tipicamente de 8 a 10 graus para a configuração mecânica básica com o motor rodando a baixa rotação.

Concluído um ciclo, o motor está apto a realizar outro ciclo, com a velocidade determinada pelas revoluções do eixo de manivelas (Virabrequim).

A eliminação dos gases de exaustão do cilindro é melhorada abrindo-se a válvula de descarga antes que o pistão tenha atingido completamente o PMI

de sua fase de potência motriz (expansão) e atrasando-se o fechamento da válvula até que o pistão já tenha iniciado a fase de admissão. Para melhorar o enchimento de mistura fresca de ar no interior do cilindro, a válvula de admissão é projetada para abrir antes que o pistão atinja o PMS na fase de descarga. A válvula de admissão, portanto, permanece aberta por toda a fase de admissão de ar atmosférico e parte da fase de exaustão. De modo similar, a válvula de exaustão permanece aberta por toda a fase de exaustão e parte da fase de admissão. O intervalo angular em que tanto a válvula de admissão quanto a de descarga estão simultaneamente abertas na região de PMS é conhecido como cruzamento de válvulas. A figura 1.5 mostra um ciclo completo de abertura e fechamento das válvulas de admissão e descarga e a região de cruzamento. Onde as variáveis utilizadas na figura 1.5 são:

- EO : abertura da válvula de exaustão;
- EC : fechamento da válvula de exaustão;
- IO : abertura da válvula de admissão;
- IC : fechamento da válvula de admissão;
- TDC : ponto morto superior;
- BDC : ponto morto inferior;
- IP : ângulo de ignição.

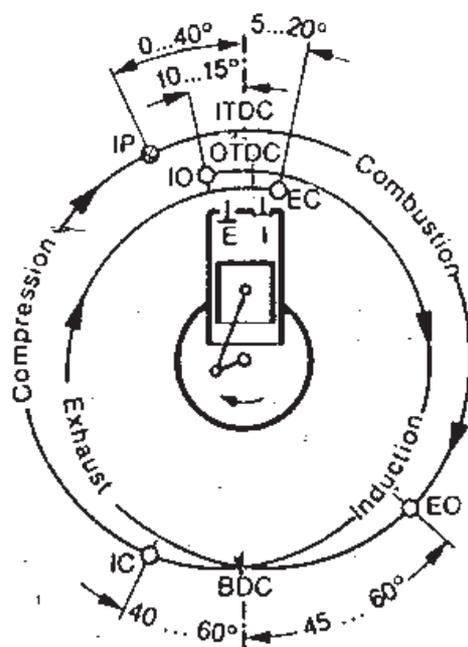


Figura 1.5: Ciclo de válvulas

1.4 Controle eletrônico de motor a combustão interna

O controle eletrônico dos motores a combustão interna compreende um conjunto de subsistemas. Os principais são o sistema de injeção de combustível e o controle de ignição. O sistema de injeção de combustível é responsável por controlar a quantidade ideal de combustível para cada condição de operação do motor. O sistema de controle de ignição atua de forma integrada com o sistema de injeção de forma que o motor trabalhe de forma otimizada, ou seja, minimizando o consumo de combustível e a emissão de poluentes,

maximizando o desempenho, dirigibilidade e vida útil.

Para que o sistema de controle eletrônico possa gerenciar o funcionamento do motor, é necessário que este receba sinais de sensores indicando a condição de funcionamento do motor em um dado instante. Esses sinais são processados por uma unidade eletrônica, e então sinais eletrônicos são enviados para atuadores de forma que o motor opere de acordo com as especificações desejadas.

A seguir serão descritos os principais subsistemas de gerenciamento eletrônico, indicando as grandezas medidas e os modos de operação.

1.4.1 Sistema de controle de ignição

A função do sistema de ignição é inicializar a combustão da mistura comprimida através de uma centelha em um instante adequado. Nos motores de ignição por centelha, esta função é assumida pelas velas de ignição que formam um arco elétrico de curta duração entre os seus eletrodos. Uma falha na ignição irá propiciar que os gases que não tiveram combustão entrem no catalizador, danificando-o ou mesmo destruindo-o devido ao sobre aquecimento quando estes gases queimam dentro dele. Além disto, causará uma diminuição no torque do motor e poderá ainda aumentar a concentração de emissões de gases nocivos.

É necessário um arco elétrico com uma energia de aproximadamente 0,2 mJ para iniciar a queima de uma mistura estequiométrica, enquanto que pode-se precisar de 3 mJ para misturas ricas ou pobres. Se a energia de

ignição for inadequada, não haverá a queima da mistura. Este é o motivo pelo qual o sistema deve suprir energia de ignição com grande margem de segurança para sempre assegurar a queima da mistura ar-combustível, mesmo sob condições adversas. Uma pequena quantidade de mistura passando pelo arco é suficiente para iniciar todo o processo. Esta pequena quantidade ignita e propaga a chama para o restante da mistura no cilindro [12].

O instante quando a faísca da vela deverá ocorrer é medido em relação ao PMS do pistão e é chamado de ângulo de avanço, como mostrado na figura 1.6, onde θ é um determinado ângulo de avanço.

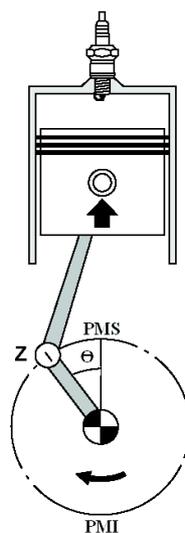


Figura 1.6: Ângulo de avanço [5]

O ângulo de avanço deve ser selecionado de tal forma que os seguintes objetivos sejam atingidos: Máxima potência do motor, máxima economia de combustível, evitar a detonação e garantir emissões mais limpas [11].

É impossível atender todos os requisitos acima simultaneamente. Um compromisso deve ser obtido para cada caso. O ponto mais favorável para o centelhamento depende de diversos fatores, tais como: rotação, combustível e em particular das condições de operação (Partida a frio, a plena carga, carga parcial, etc...).

O primeiro fator que influência no avanço de ignição é a velocidade angular do motor. Observando-se somente as variações de rotação do motor e mantendo a mistura constante, o tempo de queima da mistura é constante. Assim, para cada velocidade diferente do motor, deve-se dar um avanço diferente de ignição de modo a garantir que toda a mistura tenha sido queimada quando o pistão atingir o PMS. O segundo fator que influência no avanço do ponto de ignição é a variação da carga mecânica que o motor está tracionando. Quando o motor recebe carga mecânica, a mistura deve ser enriquecida, ou seja, adiciona-se mais combustível. Com isso o tempo de queima da mesma é alterado e, conseqüentemente, é alterado o ponto de ignição. Quanto maior a carga mecânica, maior o enriquecimento e maior o avanço.

O ângulo de ignição é avançado com o objetivo de aumentar o trabalho mecânico realizado, acarretando maior temperatura e pressão no cilindro. Porém, existe um grande obstáculo que limita o desempenho dos motores de combustão interna, a auto-ignição da mistura ar-combustível. Este fenômeno de auto-ignição leva ao fenômeno da detonação [2].

A combustão normal ocorre quando a mistura ar-combustível é ignitada

pela centelha e a chama se propaga do ponto de ignição até as paredes do cilindro. O fenômeno da detonação ocorre quando a temperatura e/ou pressão da mistura não queimada excede o valor crítico, causando a auto-ignição da mistura em diferentes pontos. Isto produz ondas que se propagam em direção oposta a frente de onda iniciada pela vela, como mostrado na figura 1.7. Este choque de ondas gera um rápido aumento da pressão dentro do cilindro.

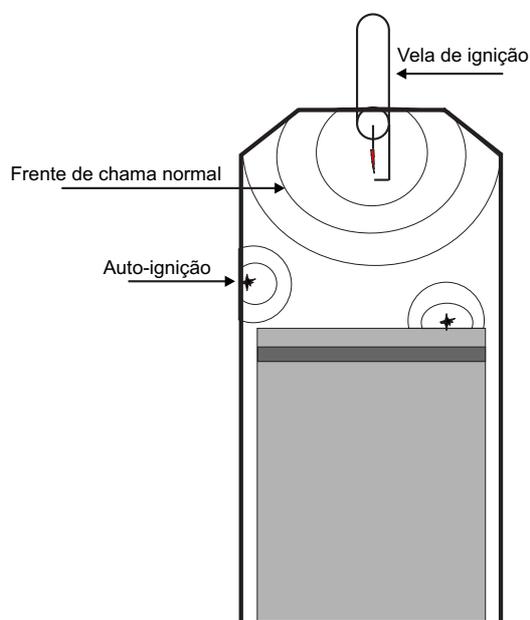


Figura 1.7: Auto ignição dentro do cilindro

A figura 1.8 mostra a pressão na câmara de combustão para diferentes ângulos de avanço de ignição. Para um pequeno ângulo de avanço (Ponto Zc), obtiveram-se uma baixa pressão na câmara de combustão e conseqüentemente um baixo rendimento do motor. No entanto, um aumento deste ângulo além

do ponto ótimo(ponto Z_a) pode levar ao fenômeno da detonação, como mostrado na curva 2 [11].

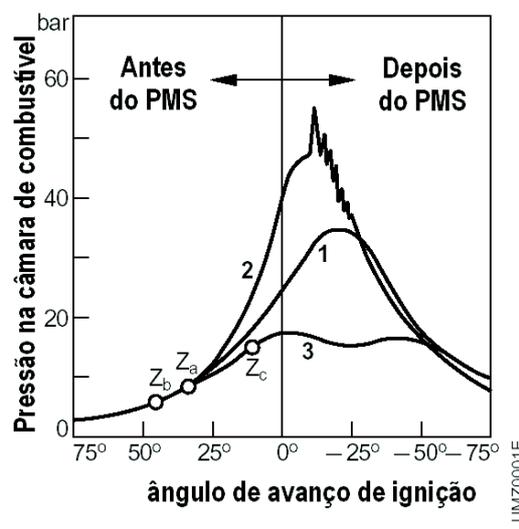


Figura 1.8: Ocorrência de detonação

A detonação é muito prejudicial ao funcionamento do motor, fazendo com que o mesmo perca potência. Em casos extremos pode levar a destruição da câmara de combustão, furos na cabeça do pistão ou mesmo a fusão do pistão com o cilindro.

A tendência da detonação depende de uma série de fatores, como por exemplo a configuração da câmara de combustão, da mistura ar combustível, e da qualidade do combustível.

O sistema indutivo de ignição nos motores de ignição por centelha deve gerar alta tensão o suficiente para criar o arco voltaico na vela de ignição, sendo este arco elétrico responsável por iniciar a queima do combustível. Os

componentes de um sistema de ignição são os drivers, as bobinas e as velas de ignição

A bobina de Ignição consiste de um autotransformador e tem a função de gerar uma alta tensão para produzir um arco elétrico no momento do centelhamento.

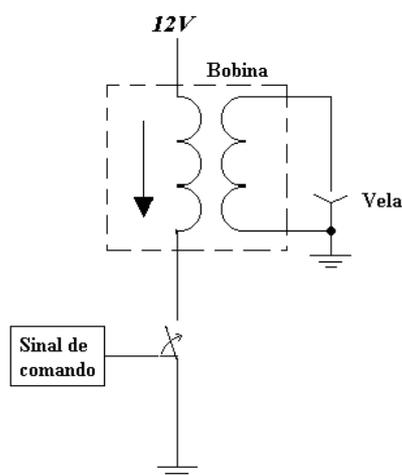


Figura 1.9: Diagrama esquemático do sistema de ignição

A figura 1.9 mostra o esquemático simplificado de um sistema de ignição. Uma chave de comando fecha o circuito primário fazendo passar corrente elétrica fornecida pela bateria no enrolamento primário do transformador. Esta corrente, inicialmente, é zero e cresce exponencialmente até atingir o valor máximo. Neste instante, que deve coincidir com o ponto de ignição, a chave de comando se abre e toda a energia armazenada no primário da bobina de ignição é rapidamente transferida para o secundário. A variação de corrente no tempo produzido pela abertura da chave e a relação de espiras

da bobina, produz uma alta tensão nos eletrodos da vela da ignição. Devido a esta alta tensão aparece um arco elétrico que inicia o processo de queima do combustível. A figura 1.10 mostra as formas de ondas nos principais pontos do circuito de ignição.

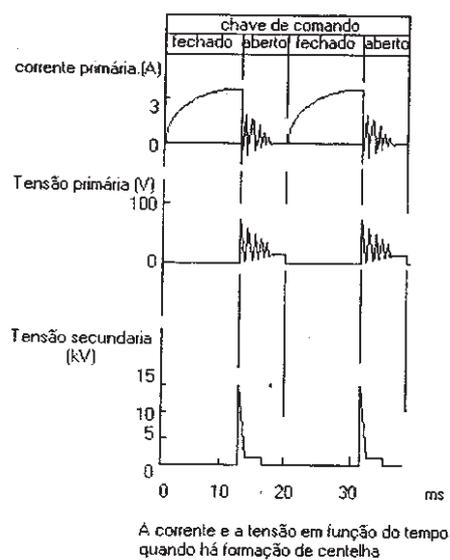


Figura 1.10: Tensão do transformador de ignição

Como comentado anteriormente, para haver a queima da mistura ar-combustível é necessário uma energia mínima no arco elétrico produzido pela vela. Esta energia é função da corrente no primário da bobina, dado pela equação:

$$w = \frac{1}{2} L_p I_p^2 \quad (1.1)$$

Portanto, conhecendo a indutância do primário (L_p) pode-se calcular o tempo da chave ligado (normalmente chamado de tempo de permanência) necessário para um determinado nível de energia no arco elétrico.

1.5 Sistema de injeção eletrônica

Devido ao aumento do rigor das leis ambientais e à rápida evolução dos motores dos automóveis, o velho carburador já não supre as necessidades atuais no que se refere à poluição, economia de combustível, potência dos veículos, resposta rápida à aceleração, etc... Neste sentido desenvolveu-se o sistema de injeção eletrônica que controla a dosagem precisa de combustível proporcionando ao motor melhor rendimento com mais economia e menor contaminação do meio ambiente em todos os regimes de operação do motor.

Para atingir esse objetivo, a central eletrônica deve receber informações sobre as condições de funcionamento do motor através de sensores instalados estrategicamente. Estes sensores medem variáveis do motor como pressão no tubo de admissão, temperatura do ar aspirado, temperatura do líquido de arrefecimento, rotação do motor, entre outras.

A figura 1.11 mostra o diagrama esquemático de um sistema de injeção eletrônico de combustível com seus componentes principais:

A bomba elétrica bombeia o combustível proveniente do tanque para uma linha de combustível, a qual estão conectados os bicos injetores. Para que a massa de combustível injetada no cilindro seja proporcional ao tempo de

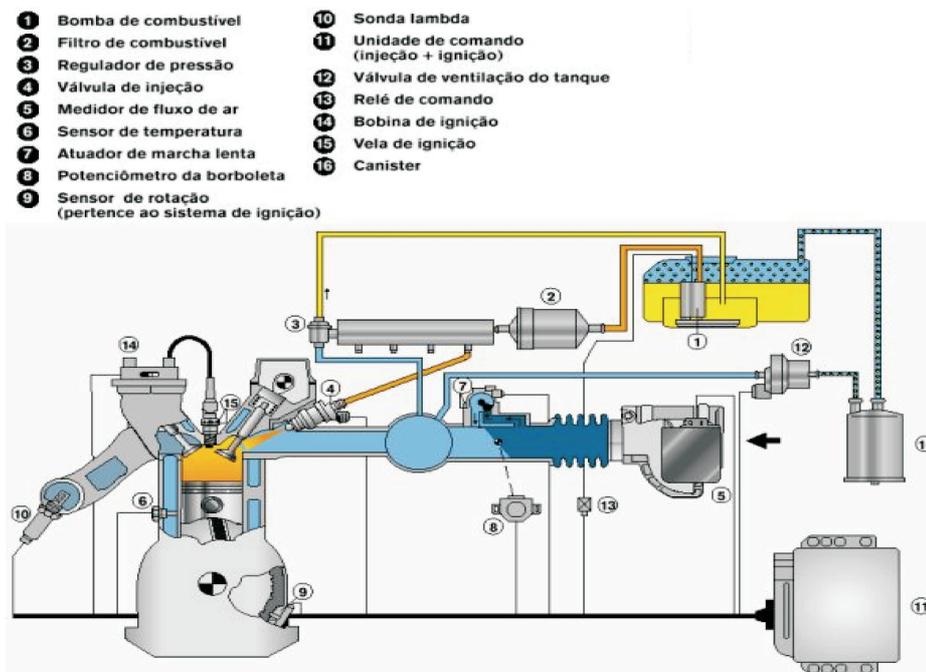


Figura 1.11: Diagrama esquemático de um sistema de gerenciamento eletrônico para motores

abertura do eletro-injetor a pressão da linha de combustível deve ser mantida constante. A estabilização na linha é realizada através de um regulador de pressão. O regulador de pressão é do tipo mecânico, não recebendo nenhum sinal elétrico para seu funcionamento, como mostrado na figura 1.12.

O regulador é um dispositivo diferencial de membrana. O combustível pressurizado pela eletro-bomba exerce uma força sobre uma membrana, na qual existe uma mola fazendo pressão contrária. Quando a pressão da linha de combustível supera a pressão da mola, uma válvula de retorno se abre,

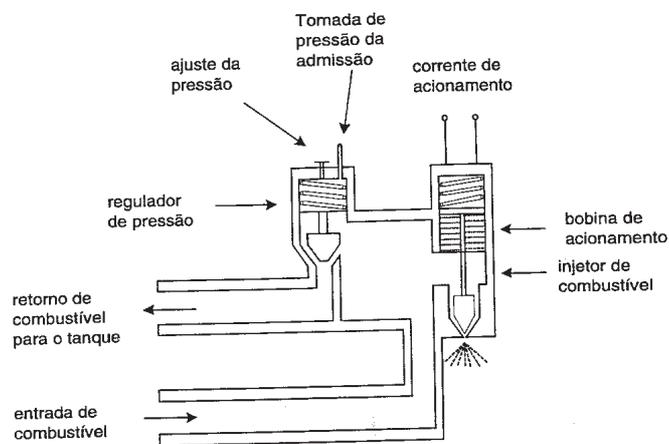


Figura 1.12: Regulador de pressão do combustível

permitindo que o combustível excedente retorne ao tanque de combustível, aliviando a pressão da linha. Quando essa pressão cai abaixo da pressão regulada, a válvula se fecha, mantendo assim a pressão da linha em um valor estabilizado.

Existe, também, uma tomada de pressão do tubo de admissão que age sobre a mola reduzindo sua pressão. Dessa forma é mantido constante o diferencial de pressão existente entre a linha de combustível e o ambiente de injeção (coletor de admissão), garantindo que a vazão de combustível do eletro-injetor, dependa somente do tempo de injeção.

Há também um parafuso de ajuste de pressão da mola sobre o diagrama, que pode, através da atuação sobre esse parafuso, alterar o valor da pressão estabilizada.

A válvula injetora de combustível, ou simplesmente eletro-injetor, tem

por função entregar no tubo de admissão a exata quantidade de combustível necessária ao funcionamento do motor, de forma pulverizada ou atomizada, facilitando assim a evaporação do mesmo.

1 Pino, 2 Agulha da válvula, 3 Armadura, 4 Mola de retorno, 5 Bobina indutora. 6 Conector elétrico, 7 Filtro de combustível.

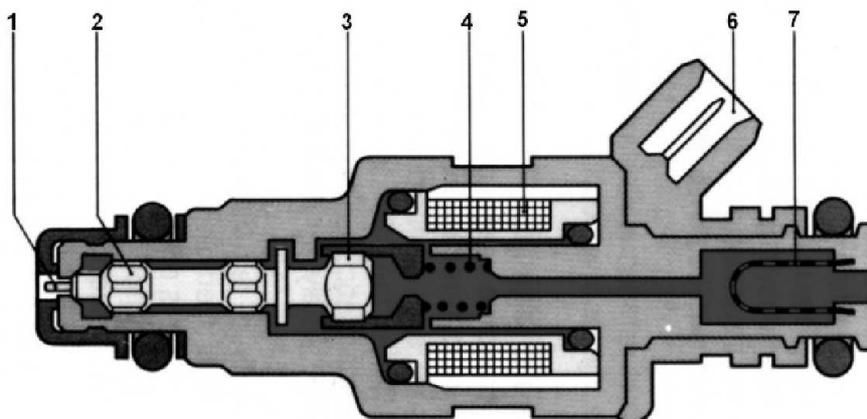


Figura 1.13: Detalhes contrutivos de um bico injetor de combustível

O eletro-injetor é uma válvula normalmente fechada e do tipo liga/desliga. Contém uma mola que mantém o obturador da válvula fechado, não permitindo a passagem do combustível. As figuras 1.13 e 1.14 mostram, respectivamente, os detalhes contrutivos e uma foto de um bico injetor típico .

O bico injetor de combustível, quando aberto, apresenta um diâmetro de abertura para a passagem de combustível constante. Com uma pressão constante na linha de combustível que alimenta a válvula injetora, o fluxo de combustível que passa pelo injetor será constante e variará em função do



Figura 1.14: Foto do bico injetor de combustível [5]

tempo de abertura do bico. Dessa forma, para controlar o fluxo de combustível injetado no motor, basta controlar o tempo de abertura do bico injetor, ou seja, o ciclo de trabalho do sinal de acionamento.

A frequência do pulso de acionamento do eletro-injetor varia em função da velocidade de rotação do motor, e o ciclo de trabalho varia em função das condições instantâneas de funcionamento, do conjugado, da temperatura, da posição da borboleta, etc...

Controle da mistura ar-combustível

Quando se dá a partida no motor, o movimento de descida do pistão produz no coletor de admissão um vácuo, que aspira o ar da atmosfera. Este ar

aspirado passa pelo sensor de fluxo de ar e pela borboleta de aceleração antes de chegar aos cilindros do motor. A quantidade de ar aspirado é controlado pela posição da borboleta de aceleração.

Medindo a massa de ar aspirado, a central eletrônica determina o tempo de abertura dos eletro-injetores para injetar a quantidade de combustível ideal para o regime de operação do motor. A figura 1.15 mostra o diagrama em blocos do controle em malha fechada da mistura ar-combustível.

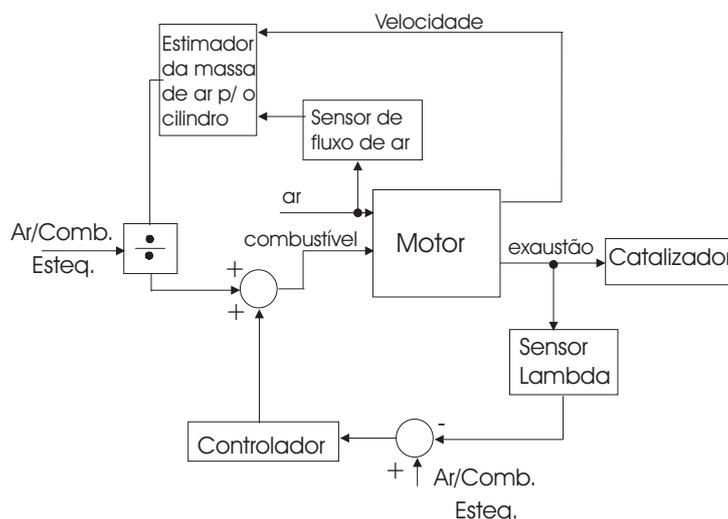


Figura 1.15: Controle da mistura ar-combustível em malha fechada

O combustível deve ser injetado de forma pulverizada para proporcionar uma mistura ar/combustível homogênea, o que facilita a queima da mesma, melhorando o desempenho do motor e reduzindo os poluentes no escapamento.

O motor requer uma razão específica da mistura ar-combustível. A razão

ideal da mistura ar-combustível é conhecida como razão estequiométrica ou razão de combustão completa. Para a gasolina, a razão estequiométrica é igual a 14,7:1. Isto significa que para cada 1 quilograma de combustível, 14,7 quilogramas de ar são necessários para uma mistura estequiométrica. Para mistura brasileira, com 20% de álcool, a razão estequiométrica é de 13,3:1. Para se detectar o quanto a mistura ar-combustível desvia do valor estequiométrico, define-se o coeficiente de ar lambda (λ), como sendo a relação entre a mistura ar-combustível empregada e a mistura estequiométrica.

Assim, a mistura empregada pode ser classificada da seguinte forma:

- $\lambda < 1,0 \Rightarrow$ mistura rica (deficiência de ar);
- $\lambda = 1,0 \Rightarrow$ mistura estequiométrica;
- $\lambda > 1,0 \Rightarrow$ mistura pobre (excesso de ar).

Quando a mistura estequiométrica é alcançada, todo o combustível é queimado e as emissões dos gases poluentes são reduzidas ao mínimo. Se a mistura é muito rica, a emissão dos gases aumenta e o consumo aumenta também. Se a mistura estiver pobre, o motor estará rodando mais economicamente porém o motor terá uma baixa potência e terá um sobre aquecimento no sistema de exaustão. A emissão de gases de escape será discutida na seção 1.7.

As estratégias de controle de injeção de combustível tem o objetivo de fornecer ao motor a quantidade de combustível correta e no momento certo, em função das condições de operação do motor.

Para que o sistema de injeção consiga dosar a exata quantidade de combustível necessária para manter a relação estequiométrica, primeiro deve-se determinar a massa de ar aspirada pelo sistema.

Para a obtenção da massa de ar aspirada, pode-se utilizar sensores de fluxo de ar como o anemômetro de fio quente, ou utilizar o método indireto. No método indireto, usa-se a equação geral dos gases perfeitos para o cálculo da massa de ar, $PV = nRT$, onde V é um volume conhecido (volume do cilindro), T é a temperatura do ar medida através de um sensor de temperatura, R é uma constante conhecida e P é a pressão do ar no tubo de admissão na fase de aspiração, que é medida através de um sensor de pressão absoluta. Assim, se pode calcular n , que é o número de moles do gás aspirado. Conhecida a composição do ar, pode-se então calcular a massa de ar aspirada por cada cilindro e então, é determinado a massa de combustível que deve ser injetada para manter a razão estequiométrica. A partir desta massa de combustível, é determinado o tempo de abertura do bico injetor.

A mistura ar/combustível deve ser adaptada para as diversas condições de funcionamento do motor. Em outras palavras, o tempo de injeção base sofre variações em função dos regimes de funcionamento do motor, fazendo a relação ar/combustível oscilar ao redor do valor estequiométrico.

Durante a partida a frio, devido a baixa velocidade do motor, ocorre uma baixa turbulência do ar fazendo com que a mistura do ar com o combustível não ocorra satisfatoriamente. Além disto, as baixas temperaturas dificultam

a evaporação do combustível e provocam a formação de gotas de combustível nas paredes do cilindro e do tubo de admissão. Para compensar esses fenômenos e facilitar a partida do motor a frio, um combustível adicional deve ser injetado formando uma mistura mais rica.

A fase de aquecimento é uma seqüência da partida a frio e da pós partida. O motor necessita de combustível extra por ainda haver formação de gotas e a dificuldade de evaporação do combustível a baixas temperaturas. Dessa forma, o enriquecimento da mistura deve decrescer com o aumento da temperatura.

Se a válvula borboleta é aberta abruptamente, aceleração rápida, a mistura é momentaneamente improdutiva e um curto período de enriquecimento da mistura é necessário para uma boa resposta à transição.

Como o veículo opera na maior parte do tempo na condição de cargas parciais, deve-se então buscar, nesta condição, a máxima economia de combustível e o mínimo de emissão de gases poluentes. Isto é conseguido com a realimentação do sinal da sonda lambda, como mostrado na figura 1.15.

Com o sistema em malha fechada, a massa de ar-combustível é corrigida em função do sinal da sonda lambda. Assim, a sonda lambda mede a quantidade de oxigênio existente nos gases emitidos pela combustão, informando ao sistema de controle de injeção se a mistura ar-combustível está rica, pobre ou em equilíbrio estequiométrico de modo a fazer a correção do tempo de injeção.

Na fase de plena carga deve-se buscar a máxima potência, enriquecendo a mistura. Esse enriquecimento depende da velocidade do motor e deve proporcionar o máximo de conjugado.

Na marcha lenta, deve-se manter uma velocidade que seja suficiente para o gerador suprir as cargas elétricas. Para isso, usa-se um controlador da velocidade de marcha lenta em malha fechada.

Com o motor em alta rotação e válvula-borboleta fechada ou próxima do fechamento, a central eletrônica corta o fornecimento de combustível ao motor, objetivando a economia de combustível. Esta estratégia é chamada de "Cut-off". O procedimento de corte de combustível também é utilizado para proteger o motor de rotações excessivas.

A adaptação da mistura em altitudes elevadas é necessária, uma vez que, em altas velocidades, a densidade do ar é baixa e a mistura deve ser empobrecida para compensar a menor massa de ar.

1.5.1 Controle por mapeamento

Uma exigência básica para qualquer sistema de controle é que se conheça o sistema a ser controlado. No caso dos motores de combustão interna, o conhecimento do sistema a ser controlado vem muito de um processo experimental denominado mapeamento ou processo de calibração. Este processo é realizado em uma bancada dinamométrica, e a partir das curvas de torque do motor, potência, consumo específico e níveis de emissões desejados, monta-se tabelas de carga versus rotação versus Ângulo de avanço, carga versus

rotação versus tempo de injeção, entre outras como temperatura do motor versus tempo de injeção e etc. Estas tabelas são armazenadas na memória da central eletrônica que são recuperadas ponto a ponto e interpoladas de acordo com a condição de operação do motor. A figura 1.16 ilustra um mapa de ângulo de avanço de ignição em função da carga e rotação do motor.

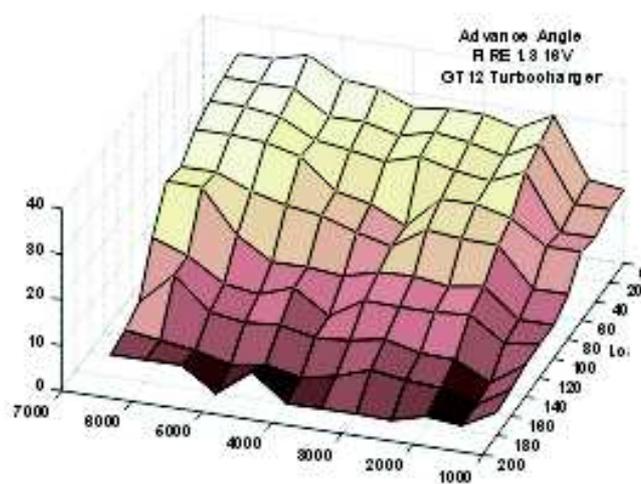


Figura 1.16: Mapa do ângulo de avanço em função da carga e rotação do motor

1.6 Sensores Utilizados no sistema de injeção e ignição eletrônica

É através dos sensores que a central eletrônica adquire informações necessárias para o controle do motor. Será feita aqui uma breve explanação sobre os principais sensores usados em sistemas eletrônicos de ignição e injeção de combustível em motores de combustão interna.

1.6.1 Sensor de quantidade de massa de ar

Uma das principais variáveis para controle do motor é a massa de ar aspirada pelo cilindro. É com base nessa massa de ar e no estado atual do motor que a ECU calcula a massa de combustível a ser injetada no cilindro, ou seja, o tempo de injeção. Uma forma de medir a massa de ar aspirada é através do sensor de massa de ar de fio quente, o anemometro de fio quente. Este consiste em um fino fio de platina esticado no canal por onde passa todo o ar aspirado. Esse fio de platina faz parte de um circuito em ponte Wheatstone, que fica ligado à entrada de um amplificador de instrumentação como mostrado na figura 1.17[6].

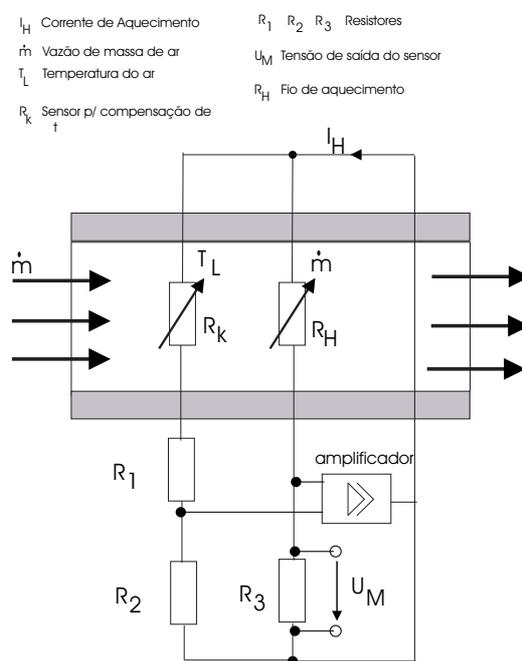


Figura 1.17: Anemômetro de Fio Quente

A vantagem da utilização deste tipo de sensor reside no fato de oferecer baixa resistência à passagem do ar pela tubulação de admissão, não possuir elementos mecânicos em movimento e o cálculo da massa de combustível ser direto, não exigindo processamento devido à variações de altitude e temperatura do ar.

1.6.2 Sensor de posição da borboleta

A posição da borboleta é uma das informações utilizadas para cálculo da quantidade de combustível injetada. É através do movimento da borboleta que o tempo base de injeção é corrigido em função da aceleração e desaceleração do motor.

A posição da borboleta é medida através de um potenciômetro mecanicamente acoplado ao eixo da válvula borboleta. Ao apertar o pedal do acelerador, abre-se a válvula borboleta, defletindo então o cursor do potenciômetro. Polarizando adequadamente o potenciômetro, este fornecerá uma tensão elétrica proporcional ao ângulo de abertura da borboleta, como mostrado na figura 1.18

1.6.3 Sensor de posição angular e rotação da árvore de manivela

O sinal deste sensor é de fundamental importância no sistema de injeção e ignição eletrônica. É com base na informação deste sinal que é sincronizado o ângulo de ignição e fase de injeção com o movimento alternativo dos pistões.

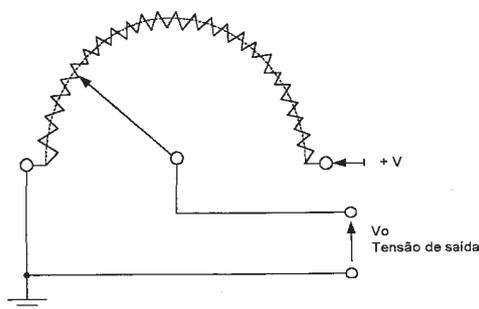


Figura 1.18: Esquema do sensor de posição da borboleta

Além disto ele informa também a rotação do motor.

Este é um sensor de relutância variável constituído de um cartucho hermético, como mostrado na figura 1.19. Ele é fixado tangencialmente à polia do eixo comando de válvulas, onde estão presentes um ímã permanente e um indutor. Através do deslocamento relativo dos dentes da roda fônica é gerado um sinal alternado por indução magnética de frequência proporcional à rotação do eixo de comando de válvulas. Já a amplitude deste sinal depende da rotação do motor e da distância do sensor à roda fônica.

A roda fônica (Número 7 da figura 1.20) possui 58 dentes e um espaço vazio constituído por uma falha de dois dentes (número 6 da figura 1.20). Esta falha ao passar pelo sensor gera um ciclo diferenciado dos demais, como mostrado no número 5 da figura 1.20. Este ciclo diferenciado é uma referência para o sincronismo do sistema eletrônico, pois a falha dos dois dentes da roda fônica e o sensor são posicionados de modo que, quando a falha passar pelo sensor, 20 dentes depois, os pistões 1 e 4 estarão no ponto morto superior

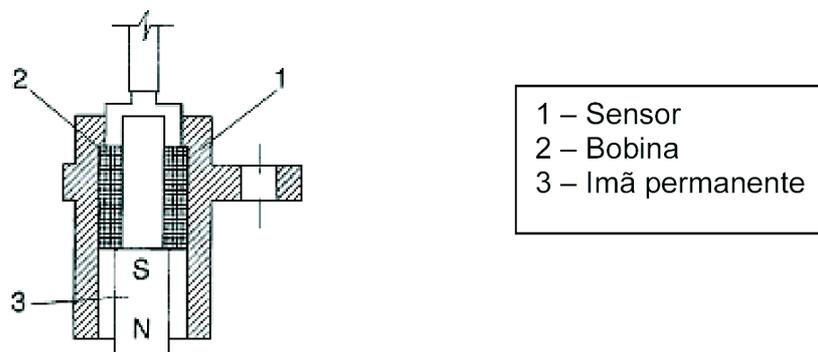


Figura 1.19: Sensor de rotação

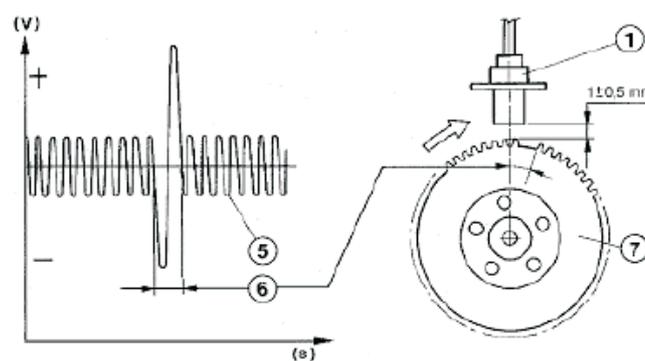


Figura 1.20: Sinal emitido pelo sensor de rotação

(PMS).

1.6.4 Sensor de pressão no coletor de admissão

O sensor de pressão no coletor de admissão tem a função de informar à central as variações de pressão no coletor de admissão e/ou a pressão barométrica. Como mostrado anteriormente, a pressão do coletor é utilizada para determinar a densidade do ar no cálculo de massa de combustível a ser inje-

tado. Em outro caso, a pressão no coletor é utilizada para corrigir o avanço de ignição em função da carga, visto que este é uma função da rotação e da pressão no coletor. Este sensor também pode ser utilizado como um sensor de altitude, de modo a corrigir as variações de pressão atmosférica em função da altitude em que o veículo se encontra.

Dois tipos de sensores de pressão são mais utilizados: strain gage e capacitivos.

Os sensores do tipo strain gage são formados por quatro elementos resistivos (R_1, R_2, R_3, R_4), os quais formam uma ponte de wheatstone [6], como mostrado na figura 1.21. Tais resistores tem seus valores alterados devido à deformação do diafragma, causado pela variação de pressão no coletor de admissão. A tensão de saída e_{ac} é linearmente proporcional a pressão no coletor e é dado pela equação 1.2.

$$e_{ac} = \left(\frac{R_1}{R_1 + R_4} - \frac{R_2}{R_2 + R_3} \right) E_{ex} \quad (1.2)$$

Os sensores do tipo capacitivo, baseiam-se no princípio de funcionamento de um capacitor constituído por duas placas paralelas de área A , distantes entre si de uma distância l , e separados por um dielétrico, com a constante dielétrica ϵ_r . A capacitancia C varia de acordo com a equação 1.3.

$$C = \frac{\epsilon_r A}{d} \quad (1.3)$$

Neste tipo de sensor, a pressão que se quer medir, pressão do coletor,

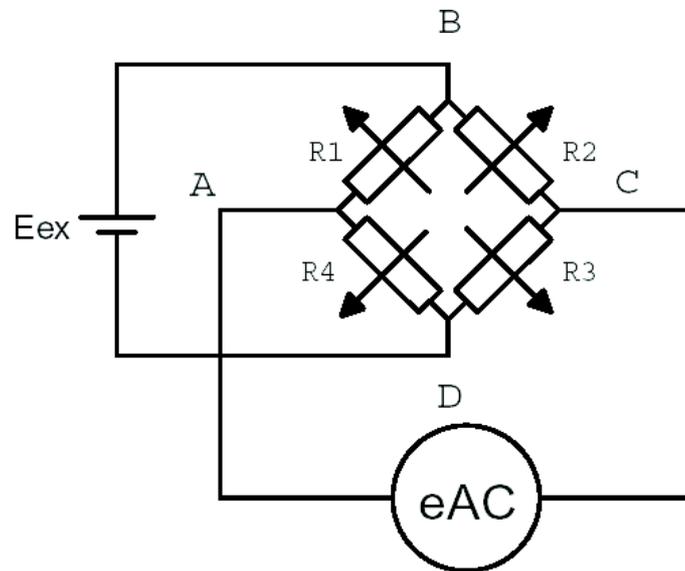


Figura 1.21: ponte de wheatsonte

varia a distância das placas condutoras fazendo variar a capacitância. Em aplicações automotivas, o sensor capacitivo faz parte de um sensor ressonante, cuja frequência varia em função da capacitancia C . Desta forma, a variação da pressão causará uma variação da frequência do sinal recebido pela central.

1.6.5 Sensor de temperatura da água e ar aspirado

A informação da temperatura do ar é necessário para se determinar a densidade do ar, utilizado para cálculo da massa de ar que o motor está admitindo, como visto na equação geral dos gases. Já a temperatura da água é indicativo da temperatura do motor, servindo como parâmetro de estratégia de controle. Como exemplo, podemos citar o enriquecimento da mistura ar/combustível quando o motor estiver partindo a frio.

Os sensores de temperatura tipicamente usados em aplicações automotivas são semicondutores conhecidos como termistores. Os termistores são resistores cuja resistência varia em função da temperatura. Existem dois tipos de termistores: O tipo PTC(Coeficiente de temperatura positivo) e o NTC(Coeficiente de temperatura negativo). No termistor tipo PTC, sua resistência varia no mesmo sentido da variação da temperatura, ou seja, se a temperatura aumenta, a resistência também aumenta. No termistor NTC, ocorre o inverso, pois seu coeficiente térmico é negativo conforme pode ser visto na figura 1.22.

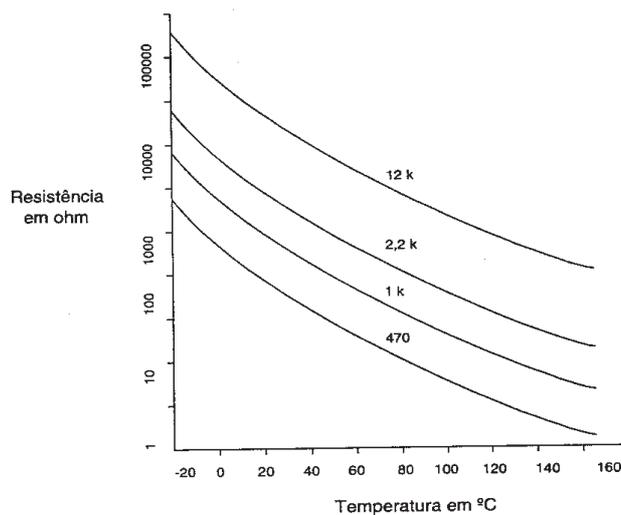


Figura 1.22: Variação da resistência em função da Temperatura do Sensor de temperatura

O sensor de temperatura deve ser conectado a um circuito capaz de converter a variação de resistência em variação de tensão. É possível construir esse circuito através de dois métodos: fonte de tensão e fonte de corrente

constante.

1.6.6 Sensor de oxigênio dos gases da exaustão

A quantidade de oxigênio presente nos gases de exaustão é usada como medida indireta da relação ar/combustível na admissão. Para uma mistura rica, os gases de exaustão terão baixa concentração de oxigênio, pois todo ele foi queimado no cilindro. Para uma mistura pobre, os gases da exaustão apresentarão um excesso de oxigênio.

O sensor usado para fornecer essa variável ao sistema de controle do motor é chamado de sensor de oxigênio dos gases de exaustão (EGO sensor), também conhecido como sonda lambda. Os sensores de oxigênio são baseados nos materiais óxidos ativos e podem ser de dois tipos: Oxido de zircônio (ZrO_2) e Oxido de titânio (TiO_2) [16].

O sensor consiste basicamente de uma peça de ZrO_2 com dois finos eletrodos de platina. Um lado desse conjunto fica exposto aos gases da exaustão, e o outro lado exposto ao ar ambiente, como mostrado na figura 1.23.

O ZrO_2 tem uma tendência de atrair os íons de oxigênio que se acumulam na superfície dos eletrodos. O eletrodo no lado do ar ambiente (referência) está exposto a uma concentração de íons de oxigênio maior do que o eletrodo do lado dos gases da exaustão. A diferença de tensão gerada entre mistura rica e mistura pobre torna-se insignificante quando a temperatura do sensor é baixa e é significativa para temperaturas acima de $300^\circ C$.

Como os ions de oxigênio tem carga negativa (eletrons livres), o eletrodo

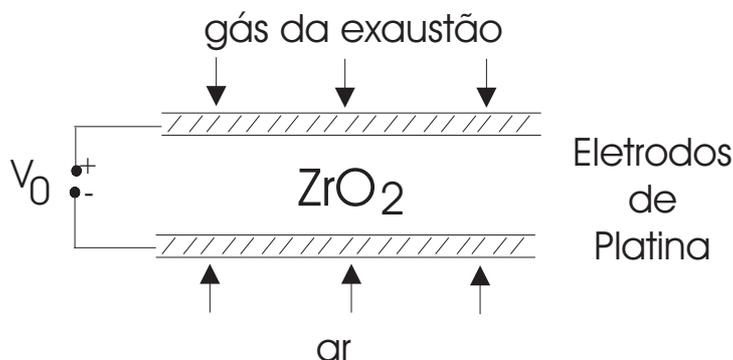


Figura 1.23: Sonda Lambda

de referência ficará eletricamente mais negativo que o eletrodo em contato com os gases de exaustão. Portanto, o valor de referência de potencial V_0 depende da diferença de concentração do oxigênio nos dois eletrodos.

A característica de saída deste sensor é do tipo chaveada. Para misturas ricas, lambda menor que um, a tensão de saída é aproximadamente 900 milivolts. Para misturas pobres, lambda maior que 1, a tensão de saída fica em torno de 50 milivolts. A transição brusca entre a faixa pobre e rica ocorre em torno do valor estequiométrico, como mostrado na figura 1.24.

Além da concentração de oxigênio nos gases de exaustão, a temperatura do sensor, também é um fator importante, uma vez que esta influencia na condutividade dos ions de oxigênio. Assim, a tensão fornecida como uma função do lambda é fortemente influenciada pela temperatura. Além disso, o tempo de resposta para uma mudança de tensão devido à uma alteração na composição da mistura também depende da temperatura. Para temperaturas

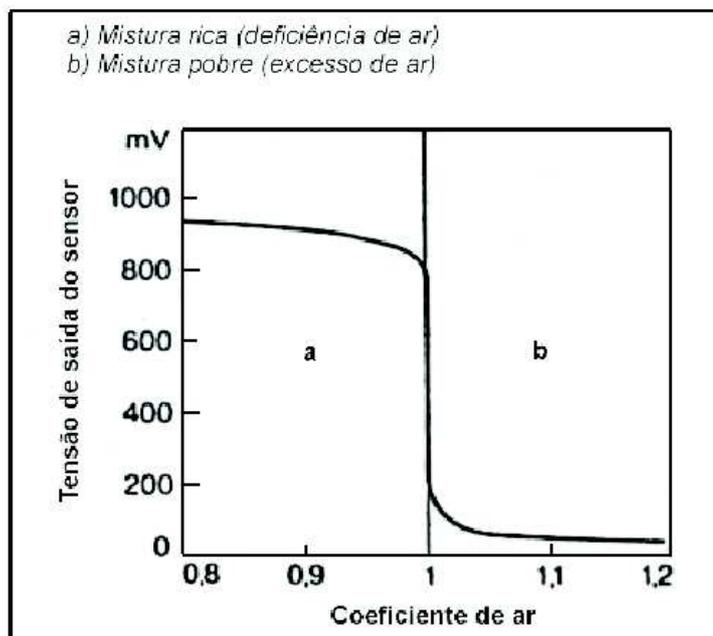


Figura 1.24: Sonda Lambda

abaixo de 300°C o tempo de resposta é da ordem de segundos. Ao passo que, em condições de temperatura ideal, em torno de 600°C , o sensor responde em menos de 50 ms. Por isso, para temperaturas abaixo da temperatura de operação, por volta de 350°C , a informação deste sensor é inválida.

1.7 Emissões de poluentes e consumo de combustível

A exaustão do motor de combustão interna ciclo Otto consiste dos produtos da combustão da mistura ar-combustível. No Brasil é utilizada uma gasolina única no mundo, pois trata de uma mistura de 76% de gasolina e 24% de álcool etílico (etanol). Outro combustível utilizados nos veículos com

motores de ciclo Otto no Brasil é o álcool hidratado (96% etanol e 4% de água).

Admitindo a gasolina com composição média de hidrocarbonetos, representada por C_8H_{18} e supondo o ar composto de 21% de O_2 e 79% de N_2 , pode-se obter a equação da combustão da gasolina:



Para o álcool etílico C_2H_5OH , tem-se:



Considerando combustão perfeita conforme equações 1.4 e 1.5, os gases de exaustão consistiriam apenas de dióxido de carbono (CO_2), água (H_2O) e nitrogênio (N_2), não considerado prejudiciais ao meio ambiente, embora o CO_2 esteja relacionado à degradação da camada de ozônio, o que tem influência no efeito estufa.

Mas como a combustão não é perfeita, além de CO_2 , H_2O e N_2 , os gases de exaustão contém monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrogênio denotados por NO_x , hidrocarbonetos não queimados (HC), entre outros como aldeído originados a partir da combustão do álcool e óxidos de enxofre vindo do processo de refinamento da gasolina [16], [5].

A seguir serão apresentados os principais gases poluentes lançados ao meio ambiente pelos veículos automotivos e seus efeitos nocivos, além da variação

na emissão destes gases e do consumo de combustível em função da mistura ar-combustível, λ , e do ângulo de avanço de ignição, a_z .

1.7.1 Emissão de CO

O monóxido de carbono é produto da combustão incompleta da mistura, e portanto, fortemente influenciada pela razão ar-combustível, $\lambda < 1$, como mostrado na figura 1.25. A concentração de CO no cilindro é alta durante a combustão, enquanto que na subsequente fase de expansão, uma porção é oxidada formando CO_2 [11], [5].

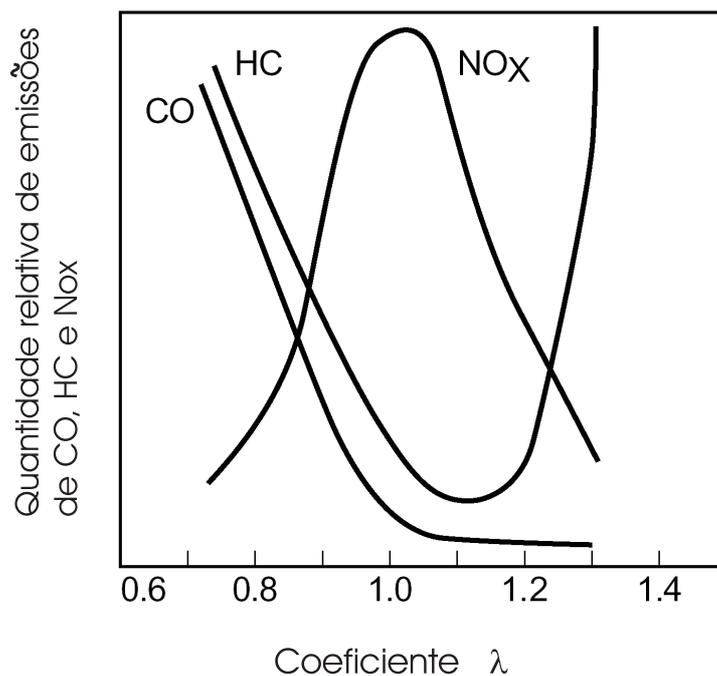


Figura 1.25: Emissão de CO , HC e NO_x em função de λ

Com relação ao ângulo de avanço, este tem pouca influência na emissão

de CO , conforme pode ser visto na figura 1.26, onde estão dispostas as curvas de emissão para diferentes valores do ponto de ignição.

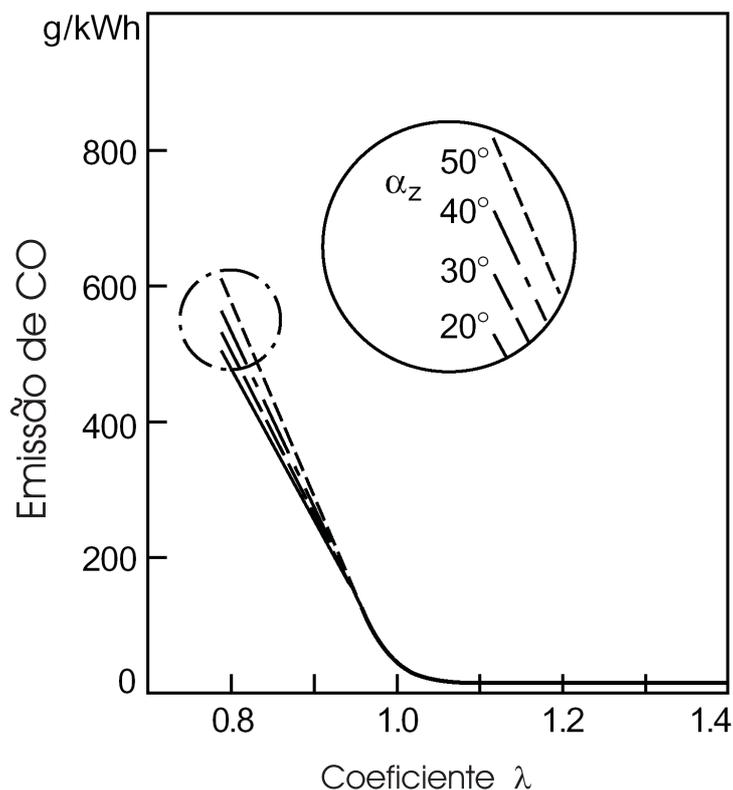


Figura 1.26: Emissão de CO em função do λ e do ângulo de avanço

O monóxido de carbono é um gás incolor e inodoro. Esse gás é tóxico devido a sua alta afinidade com a hemoglobina do sangue, o que causa a falta de oxigênio no organismo.

1.7.2 Emissão de HC

Como no caso do CO , deficiência de ar leva à combustão incompleta da mistura ar-combustível, e portanto, à emissão de hidrocarbonetos não quei-

mados e parcialmente queimados. Desta forma, a emissão de HC , ocorre na faixa de mistura rica e diminui à medida que λ aumenta. Porém, na faixa de mistura pobre a emissão de HC aumenta novamente, ficando mínima em torno de $\lambda = 1,1$, conforme mostrado na figura 1.25. Esse aumento na emissão na região de mistura muito pobre é devido às áreas da câmara de combustão que não estão incluídas, ou parcialmente incluídas, na combustão [11]. Essas regiões correspondem às camadas de fronteiras, próximas às paredes do cilindro, onde a chama é extinta por resfriamento, devido à baixa temperatura da câmara de combustão.

Em adição à combustão incompleta, outra fonte de emissão de HC é o que se chama de *blow-by*, processo no qual a mistura nova escapa para o cárter através das folgas entre o cilindro e o pistão; porém, através do respiro do cárter para a admissão, esses hidrocarbonetos retornam para a câmara de combustão. Outra fonte importante de HC não queimado são as perdas por evaporação no tanque de combustível.

Com relação à ignição, o aumento na emissão de HC é proporcional ao ângulo de avanço, já que as reações na fase de expansão e exaustão são desfavorecidas devido à baixa temperatura de exaustão [11]. Esta tendência só é revertida na faixa de mistura muito pobre, onde a velocidade de combustão é tão baixa que, com o atraso da ignição, a combustão não está completa quando a válvula de exaustão abre. A figura 1.27 ilustra a emissão de HC em função do ângulo de avanço.

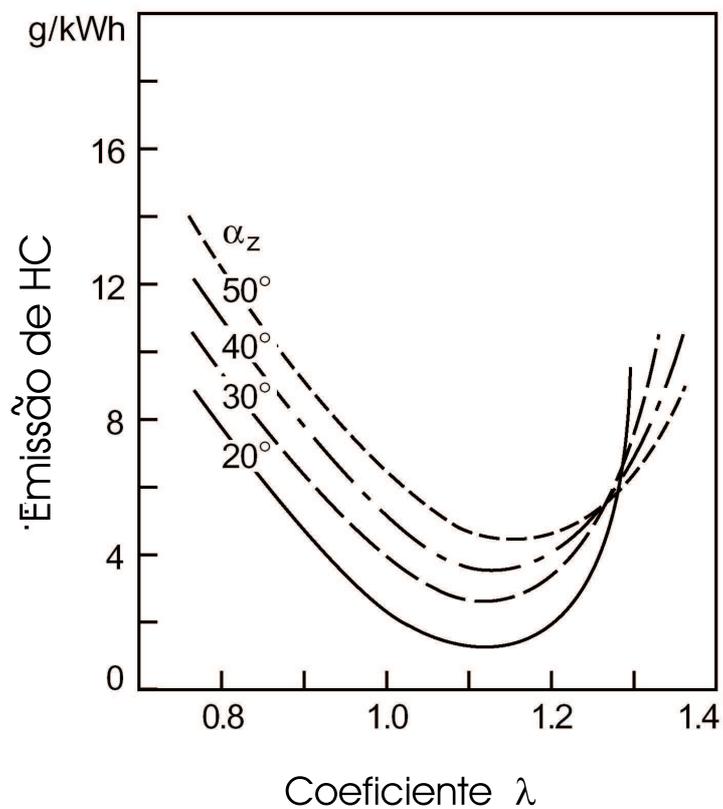


Figura 1.27: Emissão de *HC* em função do λ e do ângulo de avanço

O gás de exatão contém uma variedade de hidrocarbonetos com características diferenciadas:

Hidrocarbonetos saturados (parafinas): são praticamente inodoros, têm um efeito narcótico e causam leve irritação nas mucosas.

Hidrocarbonetos insaturados (olefina e acetileno): têm um suave cheiro e em alguns casos podem levar à irritação das mucosas.

Hidrocarbonetos aromáticos: têm cheiro característicos. São mais co-

nhecidos como toxinas com efeito narcótico, em parte carcinogênio (benzopireno). Aldeídos (formaldeídos) têm um odor pungente e irritam os olhos e nariz, mesmo em baixas concentrações.

1.7.3 Emissão de NO_x

A dependência da emissão de NO_x com relação ao fator λ é exatamente o inverso da emissão de HC , como pode ser visto na figura 1.25, sendo que, na faixa de mistura rica, o aumento de NO_x emitido ocorre com o aumento de λ devido ao aumento da concentração de oxigênio. Na faixa de mistura pobre, a emissão de NO_x diminui com o aumento de λ , pois nesta faixa, mesmo com o aumento da concentração de oxigênio a temperatura da câmara de combustão diminui. A emissão de NO_x máxima ocorre com a mistura levemente empobrecida, localizada em torno de $\lambda = 1,05$ [11].

O aumento do ângulo de avanço leva a um aumento da temperatura da câmara de combustão causando um aumento na emissão de NO_x em toda faixa de λ , como mostrado na figura 1.28. As altas temperaturas movem o equilíbrio químico para a formação de NO_x e, sobretudo, aumenta sua velocidade de formação.

O óxido nítrico (NO) é um gás incolor e na presença de ar (oxigênio), se oxida formando NO_2 . O NO_2 é considerado como sendo uma severa hemotoxina, pois sua combinação com a hemoglobina causa rápida paralisia central. Causa, também, uma pronunciada irritação no sistema respiratório e danos ao tecido pulmonar. NO e NO_2 são comumente designados conjuntamente

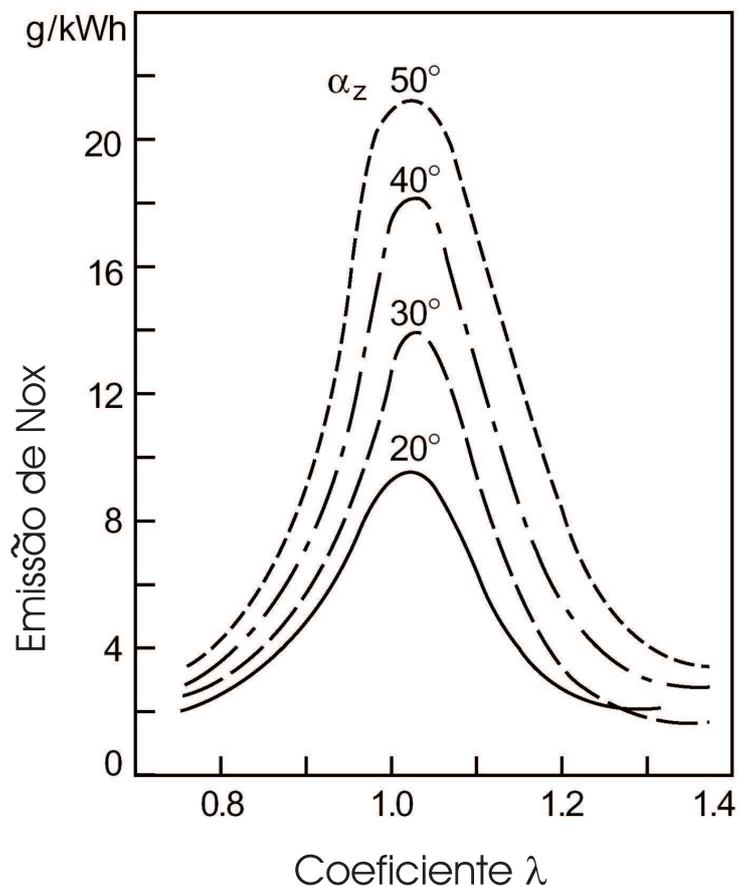


Figura 1.28: Emissão de NO_x em função do λ e do ângulo de avanço

como NO_x . Além dos danos já citados, NO_x pode afetar o meio ambiente, como por exemplo, através da contribuição na chuva ácida.

Além do fator λ e do ângulo de avanço de ignição, características construtivas, como taxa de compressão, forma da câmara de combustão, tempo de abertura de válvulas, entre outras; também podem influenciar a emissão de gases poluentes. As condições de operação como velocidade de rotação e carga do motor, também interferem na emissão de poluentes.

1.7.4 Consumo de combustível

A influência do ângulo de avanço no consumo de combustível é o oposto do que foi visto para a emissão de poluentes. O adiantamento da ignição implica em diminuir o consumo de combustível e aumento de torque. Portanto, o controle de avanço deve estabelecer um compromisso entre o rendimento do motor e a emissão de poluentes [5]. A figura 1.29 ilustra o consumo específico de combustível em função de λ e a_z .

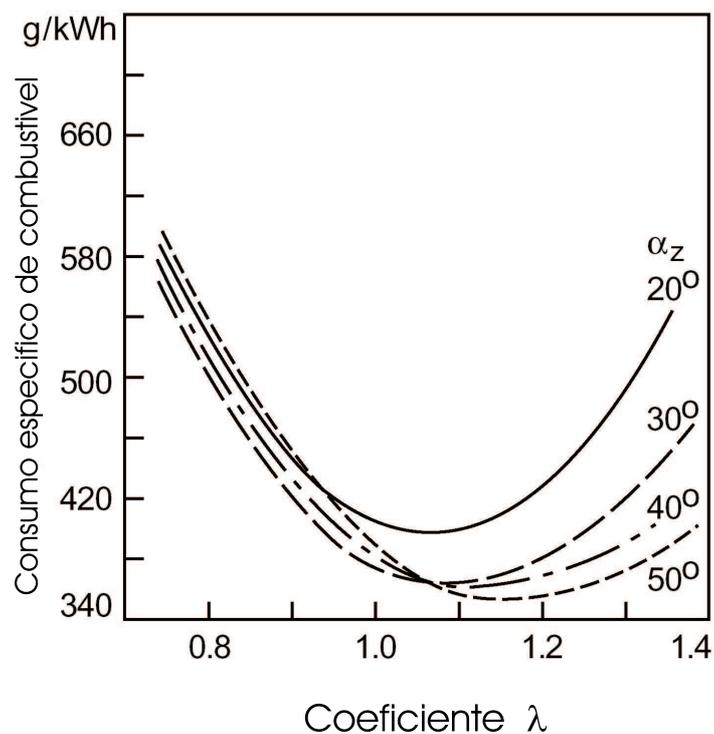


Figura 1.29: Consumo específico de combustível em função dos coeficientes λ e a_z

1.8 Central Eletrônica Motec

Hoje, um dos principais fabricantes de central eletrônica aberta é a Motec. Esta permite que o usuário altere diversos parâmetros como tempo de injeção, ângulo de ignição, calibração de sensores, etc... Ela é bem versátil, permitindo a ser adaptado a qualquer tipo de motor e possui um software para fazer a interface com o usuário. Será mostrado nesta seção algumas características da central eletrônica da Motec modelo M4.

1.8.1 Calibração de tabelas

O Central eletrônica da Motec possui tabelas de calibração que informam como a saída deve se comportar de acordo com os sinais provenientes dos sensores instalados no motor. Por exemplo a tabela de calibração de combustível determina o tempo base de injeção em função da rotação e carga. Uma tabela típica é mostrada na figura 1.30 e o gráfico 3D referente a tabela é mostrado na figura 1.31.

LOAD	RPM															
	0	500	1000	1500	2000	2500	3000	3500	4000	4500	5000	5500	6000	6500	7000	
100	38.0	40.0	41.0	43.0	45.5	55.0	53.0	55.0	56.5	58.0	59.5	60.5	62.0	64.0	62.0	
90	38.0	39.0	40.0	42.0	42.0	50.0	50.5	51.0	52.5	52.5	55.5	57.5	59.5	61.5	59.5	
80	38.0	39.0	39.5	41.5	40.5	45.5	48.0	45.5	46.5	49.0	51.5	53.5	55.5	56.0	55.5	
70	38.0	38.5	39.0	40.0	38.5	42.5	43.5	43.0	43.0	43.5	46.5	44.5	44.0	44.5	44.0	
60	38.0	38.0	39.0	39.5	37.5	38.0	41.0	41.0	41.5	41.0	43.5	42.5	41.5	42.0	41.5	
50	38.0	38.0	38.5	39.0	37.0	36.0	39.0	39.5	39.0	40.0	41.0	39.0	38.0	38.0	38.0	
40	32.0	31.5	32.0	33.0	32.0	31.0	33.0	34.0	33.5	34.5	35.5	34.5	33.5	33.5	33.5	
30	25.5	26.0	25.5	27.0	26.0	27.0	28.0	29.0	28.5	28.0	28.0	28.0	28.0	27.0	28.0	
20	20.5	21.0	29.5	20.5	21.5	22.5	22.5	25.5	27.5	27.0	26.0	27.0	26.0	25.0	26.0	
10	18.0	17.5	17.0	18.5	18.5	19.5	19.5	22.0	24.0	24.5	24.5	24.5	24.5	22.5	24.5	
0	14.0	14.0	14.5	15.0	15.5	16.5	18.0	20.0	20.0	21.0	20.5	20.0	20.0	19.5	20.0	

Figura 1.30: Tabela típica do tempo base da injeção de combustível

A central determina a quantidade de combustível a ser injetada calculando

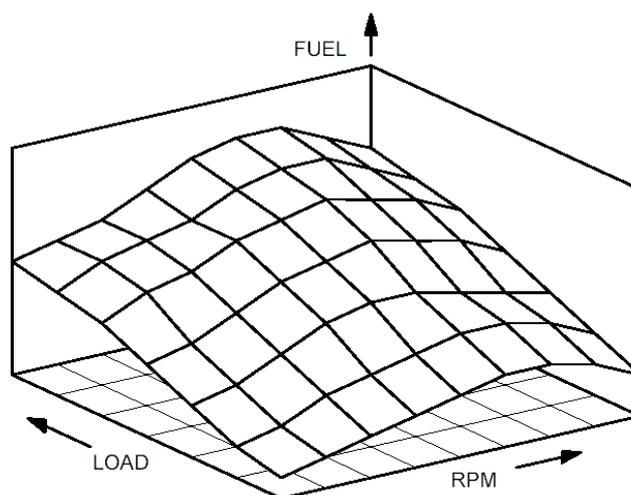


Figura 1.31: Gráfico típico do tempo base da injeção de combustível

a rotação e a carga, então é extraído o valor correspondente da tabela de calibração. Caso os valores de rotação e carga não forem exatamente os valores encontrados na tabela, é feita uma interpolação linear.

1.8.2 Entradas e saídas

A central eletrônica da motec analisa os sinais provenientes dos sensores, e então controla os injetores de combustível, o sistema de injeção e outros componentes auxiliares de acordo com a calibração e dados salvos na memória do programa. A figura ?? mostra o diagrama de uma central da motec.

O sensor de rotação do motor é utilizado para determinar a rotação do motor e a posição dos cilindros. Este é interligado no módulo nas entradas REF e SYNC. Além deste é utilizado também os sensores de pressão na linha de entrada, posição da borboleta, temperatura do motor e temperatura do ar

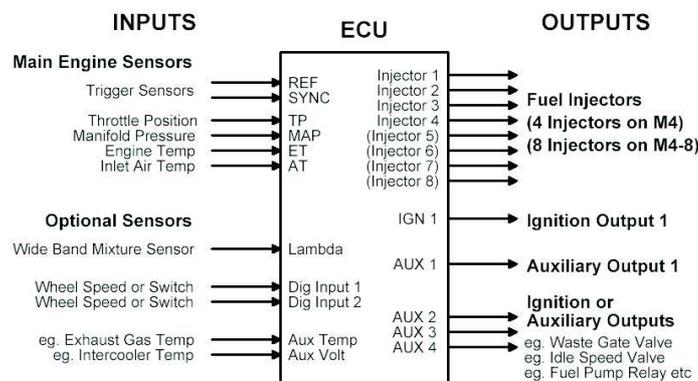


Figura 1.32: Diagrama da central eletrônica modelo M4

de entrada. Estes possuem tabelas de calibração que podem ser configuradas.

Para este modelo, a motec disponibiliza até 4 saídas de injeção e 4 de ignição contando com as saídas auxiliares, que podem ser utilizadas como saídas de ignição.

1.8.3 Software

O software pode ser executado em um microcomputador PC em ambiente dos, conforme visto na figura (referenciar a figura da pagina 11) (Colocar figura da pagina 11)

O programa é usado para calibração, parametrização e diagnostics. Além disto, ele permite: 1) Salvar os dados de calibração no HD 2) Transferir qualquer dado de calibração do pc para a central 3) Visualizar em 3D os gráficos de calibração 4) Monitorar todas as variáveis dos sensores e os parâmetros do sistema

A figura 1.33 apresenta uma tela de calibração de injeção de combustível.

É possível monitorar todas as variáveis em uma mesma painel.

The screenshot shows the Motec software interface with various engine parameters and a fuel table. Callouts highlight specific features like 'Table Name', 'Table Units', 'Load Indicator', and 'RPM Indicator'.

960F Target		Customer / Engine Description				ECU Connect U4.60				
RPM	2420	TP	23.5 %	ET	84.0 °C					
Effcy	23.5	MAP	101.0 kPa	AT	26.0 °C					
Load	23.5	EMAP	1000 a	EGT 1	0 a					
Lambda	1.20 1.20	Bat U	15.3 U	Diag Errors	12					
F U E L		Pulse W	3.1 mSec	Duty Cyc	Number of Diagnostic Errors	leg				
IGNITION		Advance	37.6 BTDC	Dwell	0.0 mSec	LA Ctrl1 OFF				
Fuel Main		(% of IJPU)			Trim	0.0 %	RPM Indicator			90
	RPM	1000	1250	1500	1750	2000	2250	2500	2750	3000
40	30	32.0	38.0	42.0	43.0	42.0	37.0	33.0	30.0	41.0
20	15	30.5	36.5	38.5	38.0	33.0	31.0	28.0	28.0	31.5
%	10	30.0	34.5	35.5	34.0	31.0	28.0	26.0	27.0	29.5
	5	26.5	29.0	30.5	30.0	29.0	25.0	22.0	21.5	23.5
	0	23.0	25.0	25.0	23.0	22.0	21.0	20.0	19.0	18.0
		16.0	16.0	17.5	17.0	16.5	16.0	16.0	15.5	15.0

F1-Help F3-Diag F5-Ign F6-EOI F9-Func PgUp/Dn-Adj Enter-Set Esc-Screen/End

Figura 1.33: Painel principal do software

Como pôde ser visto, a Motec disponibiliza para o usuário alterar diversos parâmetros do sistema de injeção e ignição. Porém, fica limitado em alteração destes parâmetros. Se for necessário por exemplo, mudança na estratégia de controle, seria necessário alterar o programa, o que não é disponível para o usuário final.

Capítulo 2

Descrição do DSP TMS320LF2407A

2.1 Introdução

Este capítulo traz uma breve apresentação do processador de sinais (DSP) TMS320LF2407A da família 2000 da Texas Instruments, utilizado neste trabalho. Trata-se de um DSP de ponto fixo de 16 bits que agrega diversos periféricos. A alta capacidade de cálculos, aliada à versatilidade e baixo custo, torna este dispositivo ideal para aplicações automotivas.

2.2 Características do TMS320LF2407A

O DSP TMS320LF2407 combina sua capacidade de processamento de sinais em tempo real com vários periféricos on-chip para criar uma ótima solução em controle de sistemas. Este dispositivo proporciona desempenho de alta velocidade, flexibilidade e baixo custo [8], [9]. Suas principais características são:

- Desempenho de 40 MIPS;
- 32K words de memória Flash on-chip;
- 544 words de memória de duplo acesso DARAM on-chip;
- 2K words de memória de simples acesso SARAM on-chip;
- Dois módulos gerenciadores de eventos (EV) cada um contendo: 2 timers de 16 bits de propósito geral, 8 saídas de Pulse Width Modulation (PWM) de 16 bits e 1 interface para encoders;
- Interface para memória externa: 64K de programa, 64K de dados e 64K de I/O;
- Módulo de Watchdog Timer (WD);
- Conversor analógico digital (ADC) de 10 bits com 16 canais multiplexados;
- Módulo de comunicação CAN;
- Interface de comunicação serial (SCI);
- Interface serial para periféricos com 16 bits (SPI);
- até 40 pinos de I/O programáveis;
- Interface JTAG.

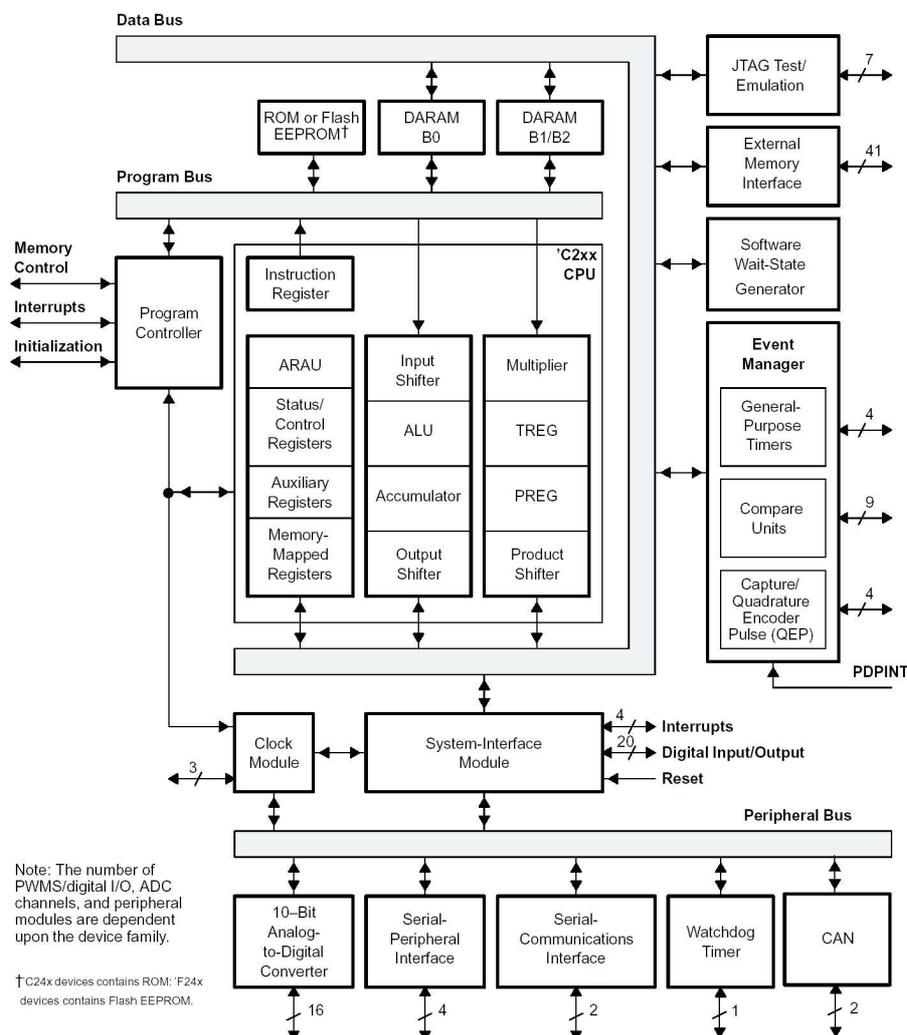


Figura 2.1: Arquitetura interna do DSP TMS320C2407A

A figura 2.1 mostra uma visão geral da arquitetura do DSP TMS320C2407A, onde se pode observar a CPU, as memórias, os barramentos e os periféricos. A arquitetura do DSP se baseia na arquitetura Harvard modificada, onde temos barramentos diferentes para memórias de dados, programa e I/O, o que permite acesso simultâneo aos três espaços de memória. Este paralelismo

permite que várias operações aritméticas e lógicas sejam feitas em apenas um ciclo de máquina. O sistema inclui também mecanismos de controle para gerenciamento de interrupções, repetição de operações e chamadas a funções. Neste capítulo serão abordados aspectos da CPU, memórias e interrupções, o conversor analógico digital (ADC), o gerenciador de eventos (EV) e a interface de comunicação serial (SCI).

2.3 Memórias

O DSP possui três espaços de memória, programa, dados e I/O. Neles podem estar endereçados os módulos de memória on-chip, memória externa, registradores. A figura 2.2 apresenta os mapas de memória.

Como se pode observar na figura 2.2 os módulos de memória mapeados em cada endereço podem ser alterados de acordo com o nível lógico do pino MP/MC e dos bits de status CNF e DON do DSP. Por exemplo, os 32K words de flash on-chip, endereços 0x0000 a 0x7FFF do espaço de programa, podem ser mapeados como memórias externa dependendo do nível lógico no pino MP/MC. Com este pino em nível lógico 1 o DSP está rodando no modo micro controlador, buscando as instruções na memória flash on-chip. Caso contrário, este espaço de endereçamento será direcionado para a memória externa, de onde serão obtidas as instruções do programa, fazendo o dispositivo rodar no modo micro processador. Os outros módulos de memória podem também ser mapeados em diferentes lugares dependendo de determinados

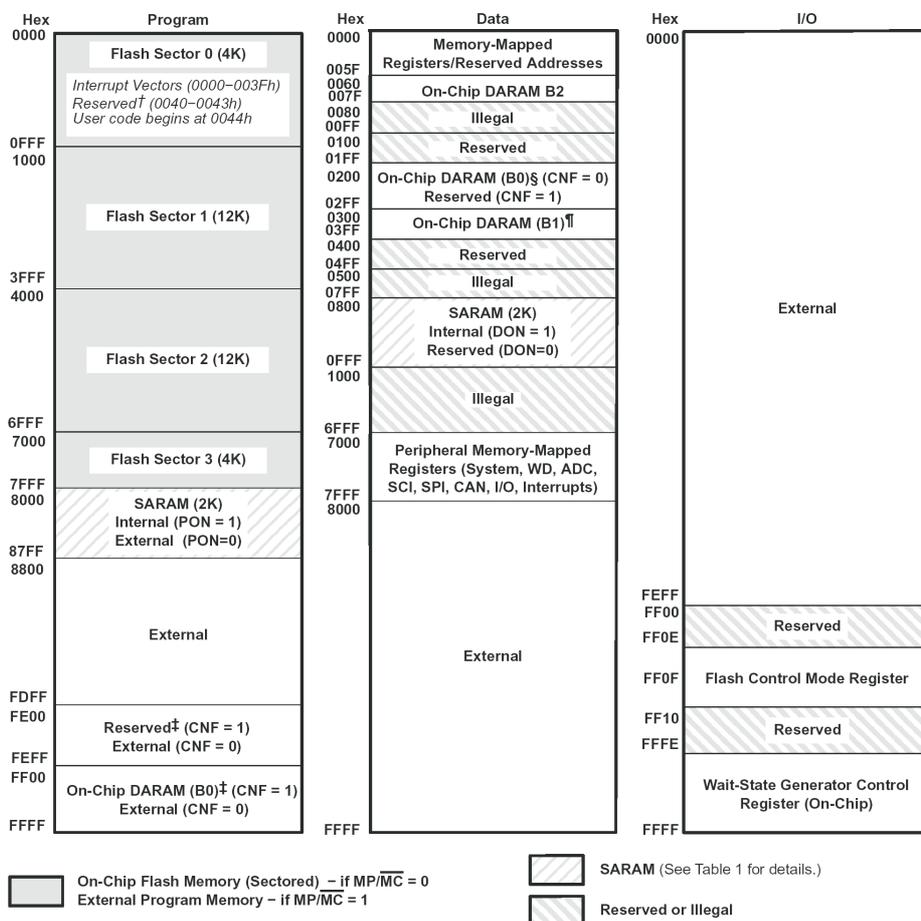


Figura 2.2: Mapas de memória do DSP: programa, dados e I/O

bits de status do DSP.

O módulo de memória on-chip DARAM pode ser acessado duas vezes por ciclo, o que aumenta a velocidade da CPU. É geralmente usado para armazenar dados, porém, se necessário pode ser parcialmente mapeado na memória de programa. Já o módulo SARAM só permite acessos simples, podendo também ser mapeado como programa ou dados. A memória flash é

não volátil e geralmente utilizada para armazenar programas, sendo possível reprogramá-la caso seja necessário.

Pode-se observar também na figura 2.2 que muitos registradores do sistema são mapeados na memória de dados. Isso permite que estes registradores sejam acessados facilmente através de instruções que acessem a memória de dados. O DSP TMS320LF2407 proporciona também acesso para memória externa, através do módulo External Memory Interface, que fornece 16 pinos de endereço, 16 de dados e os sinais relevantes de controle para selecionar o espaço de endereçamento desejado.

O espaço de endereçamento de I/O é utilizado para interfaces com periféricos externos, e inclui também alguns registradores do sistema.

2.4 Central Processing Unit - CPU

A unidade de processamento central (CPU) é a porção do processador responsável pelas operações aritméticas, operações lógicas booleanas, assim como, pela geração de endereços para memória de dados, programa e I/O. A CPU contém uma unidade lógica aritmética (CALU) de 32 bits, um multiplicador paralelo de 16x16 bits, um acumulador de 32 bits, Unidade Deslocadora e Unidade Aritmética de Registradores Auxiliares (ARAU). A figura 2.3 apresenta uma visão geral das três primeiras unidades.

Unidade deslocadora: é utilizada para alinhar valores de 16 bits vindos da memória para serem manipulados na CALU de 32 bits. O valor

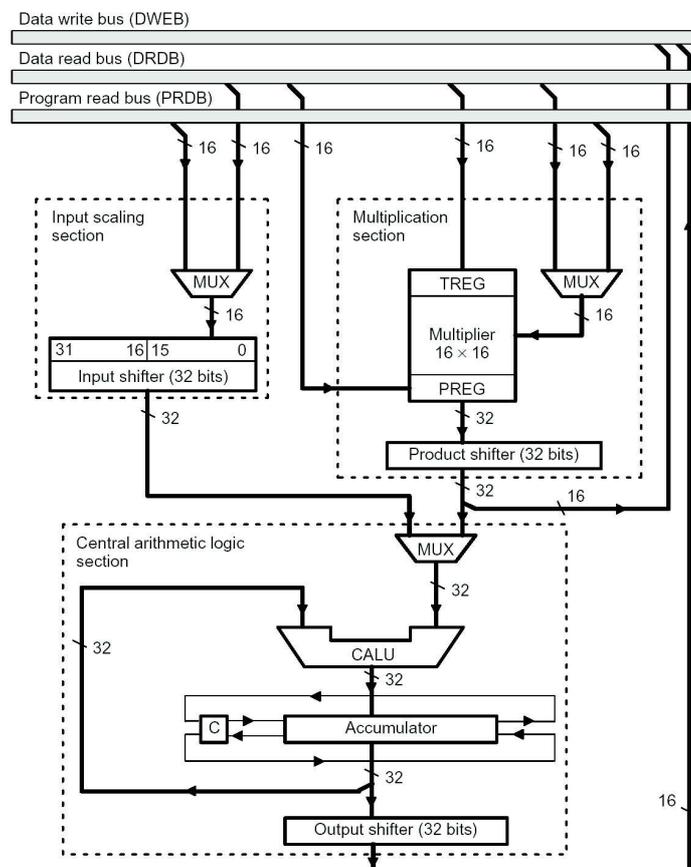


Figura 2.3: Diagrama de blocos da CALU, Multiplicador e Unidade Deslocadora

de entrada pode vir tanto da memória de dados quanto da memória de programa. O deslocamento pode ser com ou sem extensão de sinal, dependendo dos registradores de status do sistema (ST0 e ST1).

Unidade multiplicadora: recebe dois valores de 16 bits na entrada e gera um resultado de 32 bits, com ou sem sinal, em apenas um ciclo de máquina. O registrador TREG armazena um dos valores a serem multiplicados, enquanto o outro deve vir da memória de programa ou de

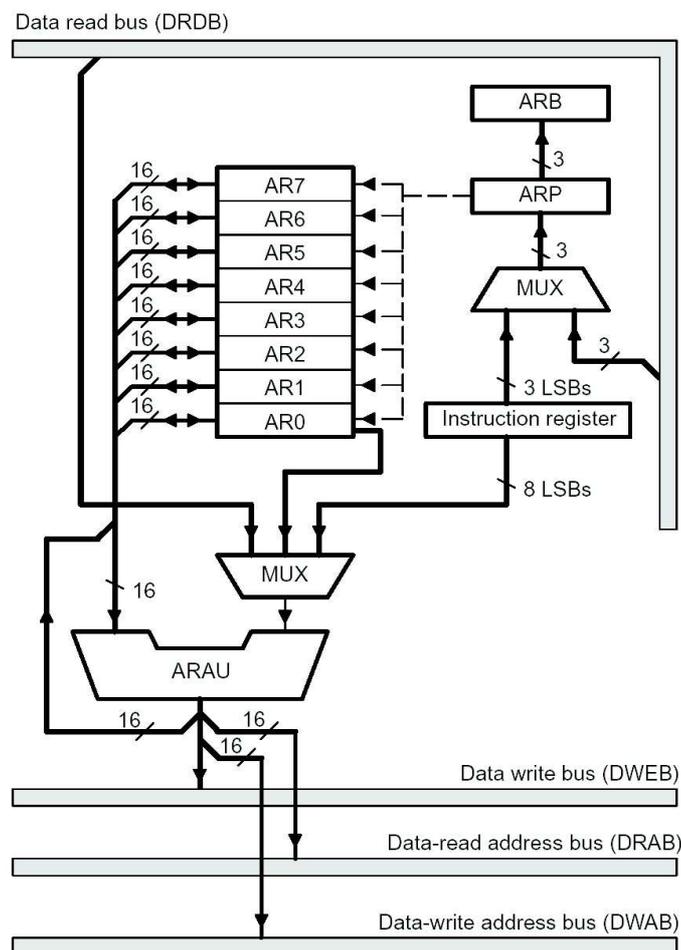


Figura 2.4: Diagrama de blocos da ARAU

dados. O registrador PREG (32bits) recebe o resultado da multiplicação, podendo ser também carregado diretamente com um valor da memória de dados. Em sua saída existe um deslocador (pscale) que atua sobre o valor de PREG quando este é enviado para a memória ou para a CALU.

A unidade central de lógica e aritmética (CALU): realiza as funções lógicas e aritméticas do sistema. Seus valores de entrada podem vir da unidade deslocadora ou da unidade multiplicadora. Ela realiza as operações de: soma de 32 bits, subtração de 32 bits, lógica booleana, deslocamento, rotação e teste de bits. Estas operações dependem dos bits de status (ST0 e ST1) do DSP, que possibilitam comportamentos diferentes quanto à extensão de sinal e overflow. A saída do acumulador possui outro deslocador que implementa deslocamentos à esquerda de 0 a 7 bits.

A unidade aritmética de registradores auxiliares (ARAU): é independente da CALU e sua principal função é realizar operações em oito registradores auxiliares (AR0 até AR7) em paralelo com operações ocorrendo na CALU. A figura 2.3 apresenta a ARAU. Os oito registradores auxiliares proporcionam um endereçamento indireto flexível e poderoso, podendo acessar qualquer endereço do espaço de memória de dados. A ARAU permite incrementar ou decrementar um dos AR, somar ou subtrair um valor constante a um AR e comparar o AR0 com o AR corrente. ARP corresponde a 3 bits do registrador de status ST0, e indica o registrador auxiliar corrente do sistema. Com esta unidade podem ser realizadas várias operações sobre ponteiros de forma bastante eficiente. Mas os AR podem ser também utilizados com outras finalidades, como armazenar valores ou atuar como contadores.

2.5 Interrupções no TMS320LF2407A

Devido ao fato da impossibilidade da CPU gerenciar todas as interrupções advindas dos periféricos, existe um controlador de interrupções, denominado PIE (expansão de interrupções dos periféricos), ilustrado na figura 2.5.

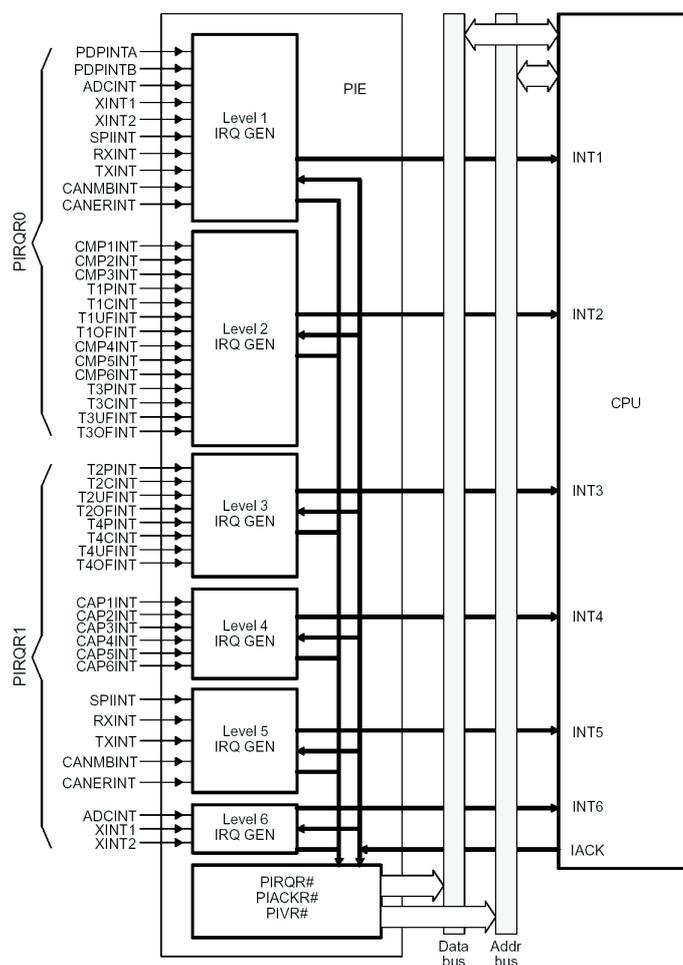


Figura 2.5: Diagrama esquemático das interrupções

A CPU suporta um pedido de interrupção sem máscara (NMI) e seis

níveis de interrupções com máscaras e prioridade pré-definida(INT1-INT6). Todas as fontes de interrupções devem se acomodar nestes seis níveis. O dsp 2407 possui muitos periféricos, e cada um é capaz de fazer um ou mais pedidos de interrupção em resposta a vários eventos. O controlador PIE prioriza as interrupções de acordo com uma determinada hierarquia. Existe um bit flag de interrupção (IF) e um bit enable de interrupção (IE), localizado no periférico, para cada um dos eventos que podem causar um PIRQ (Pedido de interrupção de periférico). Se um PIRQ ocorre e o bit IF correspondente aquele evento e o bit enable estão habilitados, então o periférico gera um pedido de interrupção para o PIE. A interrupção INT1 tem maior prioridade. Assim os pedidos de interrupção de periféricos conectados ao bloco Level 1, tem prioridade em relação as demais. Alguns periféricos têm a capacidade de solicitar interrupções com alta ou baixa prioridade. O pedido de interrupção, que vai para CPU, habilita o flag correspondente no registro de flag de interrupção (IFR), localizado na CPU. Se o bit correspondente do registro máscara de interrupção (IMR) da CPU está habilitado, a CPU para o processamento em curso e inicialmente, mascara todas as outras interrupções, desabilitando o bit INTM. O endereço da próxima instrução a ser executada é guardado na pilha e inicia-se a rotina de serviço de interrupção geral para aquele nível de prioridade de interrupção.

2.6 Gerenciador de Eventos

O gerenciador de eventos (Event Manager - EV) é um bloco fundamental, pois é capaz de gerenciar todo o sistema através dos TIMERS e dos comparadores. O DSP TMS320LF2407A possui dois gerenciadores de eventos idênticos, o EVA e o EVB. A figura 2.6 mostra o diagrama de blocos do gerenciador de eventos. Cada EV possui as seguintes configurações:

- Dois contadores de uso geral;
- Três unidades comparadoras;
- Circuitos geradores de ondas PWM(Pulse-Width modulation);
- Três unidades de captura;
- Circuito de Quadrature Encoder Pulse (QEP).

Nas próximas seções estes módulos serão discutidos de maneira breve, com o intuito de dar apenas uma visão geral de suas funcionalidades. As discussões serão baseadas sempre no EVA, porém são aplicáveis de maneira idêntica ao EVB, bastando para isso trocar os nomes dos registradores.

2.6.1 Contadores de uso geral - Timers

Os timers de propósito geral do DSP possuem várias aplicações,tais como, gerar períodos de amostragem em sistemas de controle, estabelecer uma base de tempo para operação do circuito de encoder, de captura e dos comparadores, e para a geração de sinais de PWM. A figura 2.7 apresenta uma visão

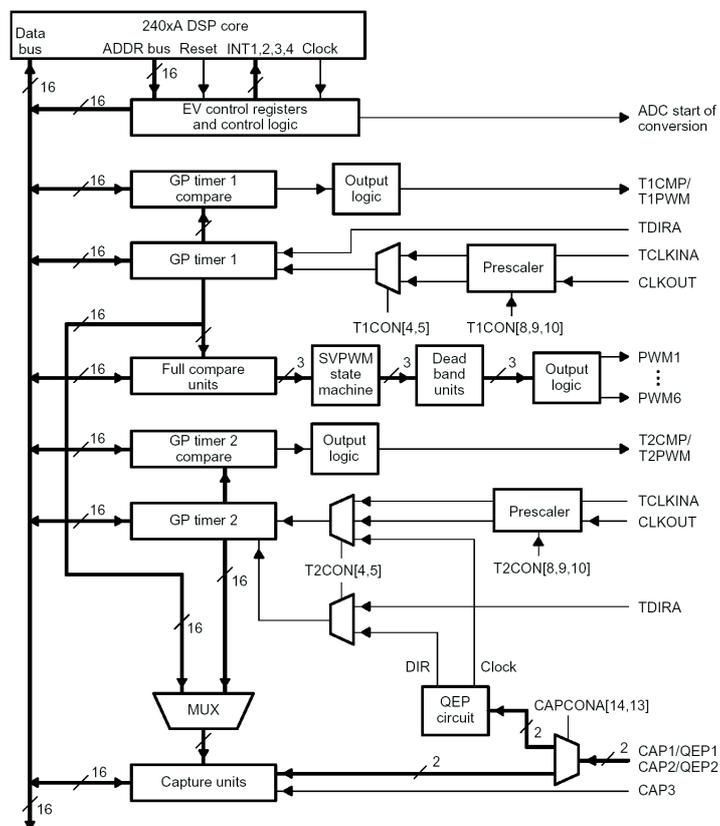


Figura 2.6: Diagrama do gerenciador de eventos

geral de um Timer. O timer pode receber como entrada o clock da CPU ou um clock externo ligado ao pino TCLKINA/B. A seguir é apresentada uma breve descrição das funções de cada registrador dos timers:

- TxCNT ($x=1,2,3,4$) é um registrador de 16 bits que guarda o valor do contador;
- TxCMPR ($x=1,2,3,4$) Registro do comparador é usado pelo bloco de comparação do Timer para gerar sinais de PWM de acordo com alguma

determinada estratégia;

- TxPR (x=1,2,3,4) Registro do período, contém o valor do período, ou seja, o valor máximo que TxCNT deve atingir em seus modos de contagem;
- TxCON (x=1,2,3,4) é um registro de controle onde são configuradas as várias funcionalidades do módulo, como o divisor do clock, o modo de contagem, qual a fonte do clock, entre outras;
- GPTCONA/B especifica a ação a ser tomada pelo Timer nos diferentes eventos, como por exemplo, disparar uma conversão do ADC a cada evento de período.

Existem 4 possibilidades de modos de contagem: stop/hold, onde o valor de TxCNT fica inalterado; Continuous up, onde o TxCNT é incrementado a cada ciclo de clock até atingir TxPR, quando volta para 0 e reinicia a contagem; Directional up/down, onde a direção de contagem é determinada pela entrada TDIRA/B, fazendo este modo ser útil na operação do circuito de encoder como será visto adiante; Continuous up/down, onde o timer conta em uma direção até atingir 0x0000 ou TxPR, quando ocorre a mudança na sua direção de contagem. Estes modos de contagem são muito importantes pois disponibilizam diversas maneiras de sincronizar o sistema, sendo muito úteis também para gerar sinais de PWM.

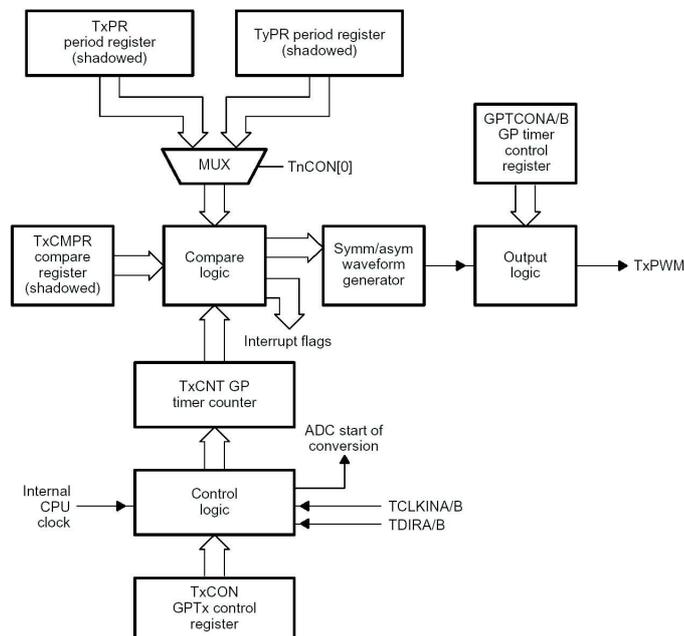


Figura 2.7: Fluxograma do Contador

A figura 2.8 representa a resposta do contador quando o modo de contagem é selecionado para Continuous up e a figura 2.9 representa a resposta do contador quando o modo de contagem é selecionado para Continuous up/down.

O modo de operação de um contador é individual e é controlado pelo registro de controle TxCON. Os bits do TxCON determinam:

- O modo de contagem.
- Se será utilizado um contador interno ou externo.
- O fator de pré-escala (1 a 1/128).

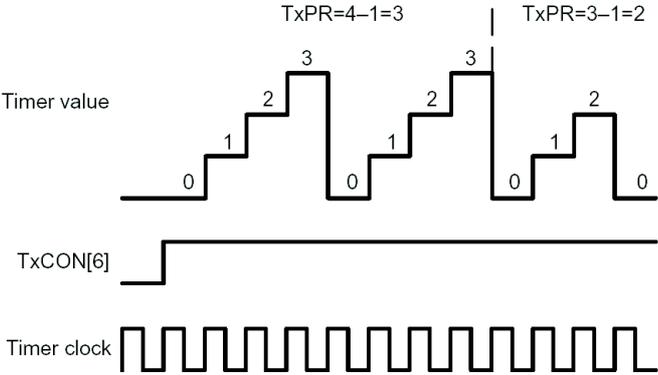


Figura 2.8: Contador no modo Continuous up

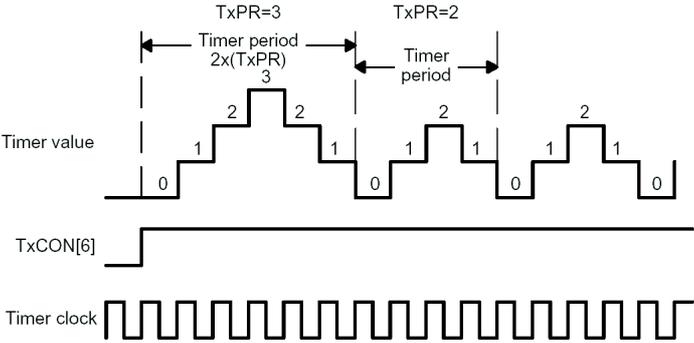


Figura 2.9: Contador no modo Continuous up/down

- Em qual condição o comparador é recarregado.
- Se a operação do comparador está ativado ou desativado.
- Qual registro de período será utilizado.

2.6.2 Unidades de comparação e circuitos de PWM

Cada um dos 2 módulos EV do DSP TMS320LF2407 possui 3 unidades de comparação, cada uma delas possuindo 2 saídas de PWM associadas. Como pode ser observado na Figura 2.6 a base de tempo para este bloco é fornecida apenas pelo TIMER1. A figura 2.10 apresenta uma visão geral deste bloco.

Cada unidade de comparação possui um registrador CMPRx que é comparado ao TzCNT de forma a comandar o circuito de PWM para gerar um sinal modulado em largura de pulso nos pinos de saída PWM_y e PWM_{y+1}. O comportamento dos sinais nestes pinos de saída é determinado pelo registrador ACTR (action control register). A ocorrência de um evento de comparação pode gerar uma requisição de interrupção ao PIE caso esteja habilitada.

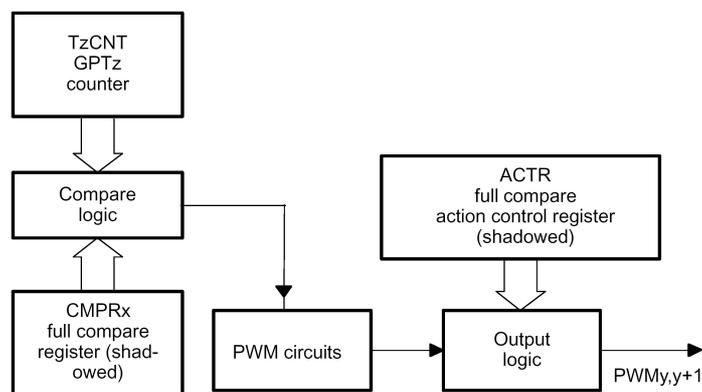


Figura 2.10: Bloco de comparação do gerenciador de evento (EV)

A figura 2.11 apresenta um exemplo de geração de um sinal de PWM. O

Timer foi configurado para rodar no modo continuous up, enquanto os pinos de saída PWMx e PWMx+1 foram configurados (através de ACTR) para gerarem sinais complementares. A lógica de comparação funciona da seguinte maneira: o sinal do pino PWMx vai para 1 sempre que o contador do Timer for maior que o valor de CMPRx, e o comportamento inverso é adotado pelo pino PWMx+1. Pode ser associado um Dead band aos sinais, que é configurável através de registradores específicos. Esta funcionalidade é importante quando estes sinais complementares são usados para o acionamento de chaves em braços de conversores por exemplo, evitando que o tempo de abertura e fechamento das chaves gere um curto circuito.

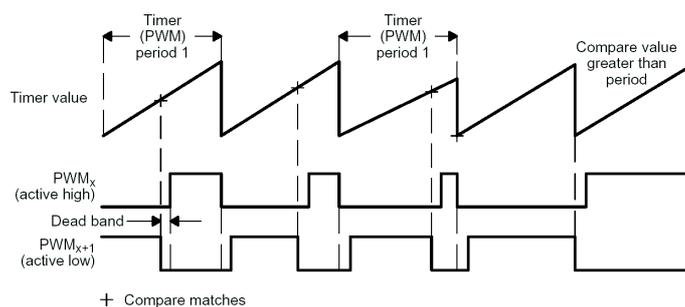


Figura 2.11: PWM Assimétrico

A geração de sinais de PWM simétrico é realizada de forma semelhante ao PWM assimétrico, como pode ser visto na figura 2.12. Neste caso que o contador deve estar configurado para contagem ascendente/descendente.

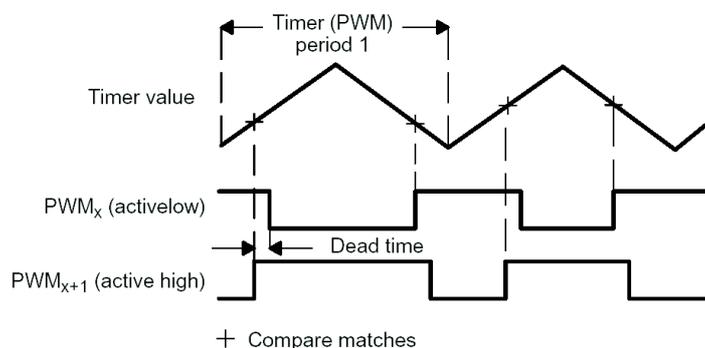


Figura 2.12: PWM Simétrico

2.6.3 Unidade de captura

As unidades de captura são utilizadas para capturar transições em sinais de entrada. Cada gerenciador de eventos possui 3 pinos que possibilitam a entrada destes sinais.

A figura 2.13 apresenta uma visão geral do bloco de captura. Os sinais dos 3 pinos de entrada CAP1, CAP2 e CAP3 (para o EVB são CAP4,5 e 6) são enviados para o detector de transição, que armazena o valor do timer em uma FIFO de 2 níveis toda vez que uma transição ocorre. Esta FIFO armazena os dois últimos valores do timer obtidos pelo módulo, e pode ser acessada diretamente por software para manipulação destes valores. O registrador CAPCONA configura toda a operação do módulo: determina qual dos 2 timers do EV será usado; determina quais pinos de entrada estão habilitados; determina quais transições dos sinais serão capturadas (subida, descida ou ambas); e determina se o evento de captura do CAP3 vai iniciar

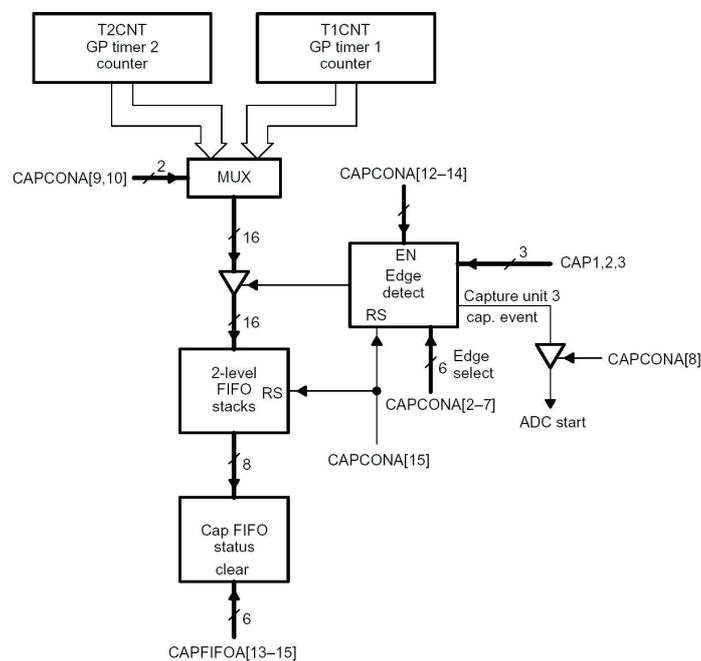


Figura 2.13: PWM Assimétrico

a conversão do ADC.

Toda vez que uma transição é capturada o valor mais antigo da FIFO é descartado e o novo valor obtido do timer é armazenado. Ao mesmo tempo é setado o flag de interrupção do módulo e caso esteja habilitado, uma requisição de interrupção é enviada ao PIE.

2.6.4 Quadrature Encoder Pulse (QEP)

Este módulo é capaz de decodificar um sinal gerado por um encoder de modo a obter informações sobre a posição e a velocidade de um motor. Possui dois pinos de entrada CAP1/QEP1 e CAP2/QEP2 que também são utilizados

pelo módulo de captura. Portanto, quando o QEP está habilitado, as funções de captura dos pinos CAP1 e CAP2 devem ser desabilitadas.

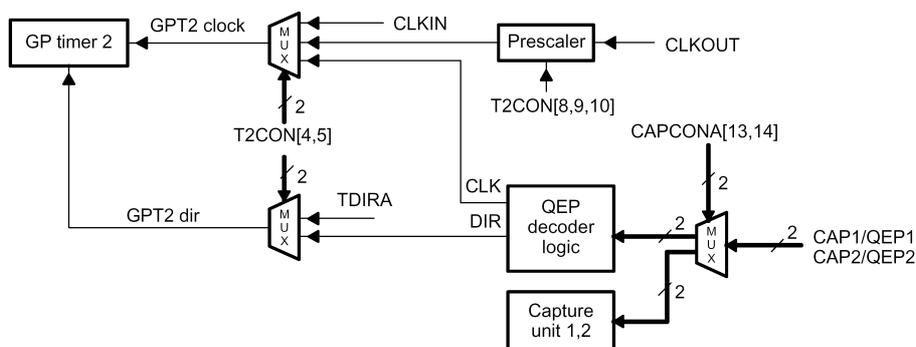


Figura 2.14: Visão geral do módulo QEP

A figura 2.14 apresenta uma visão geral do módulo. O registrador CAPCONA determina qual dos módulos utilizará os pinos CAP1/QEP1 e CAP2/QEP2. A base de tempo do módulo é dada pelo TIMER2, que deve ser configurado (através do T2CON) para rodar no modo directional up/down, com o circuito de QEP fornecendo o clock de entrada. A figura 2.15 apresenta um exemplo de decodificação dos sinais de entrada.

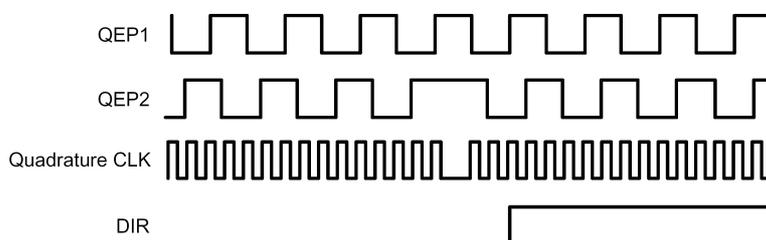


Figura 2.15: Sinais de um encoder

A decodificação se baseia no fato de que os dois sinais gerados por um encoder são seqüências de pulsos com freqüência variável e diferença de fase de 90°. A direção de rotação pode ser determinada pela detecção de qual dos dois sinais está adiantado na seqüência de pulsos. Esta funcionalidade é implementada pela lógica de decodificação do módulo, que gera um sinal de direção para ser enviado ao TIMER2. O decodificador gera também um sinal de clock para o TIMER2 a partir das transições capturadas nos sinais de entrada. Deste modo, o TIMER2 conta os pulsos dos sinais de entrada, possibilitando a determinação da posição angular. Já a velocidade de contagem pode ser utilizada para a determinação da velocidade angular.

2.7 Conversores Analógico/Digital

A plataforma TMS320F2407 oferece um conversor A/D como mostrado na figura 2.16. Possui as seguintes características:

- Conversor A/D de 10 bits;
- Tempo de conversão de 375ns;
- 16 entradas multiplexadas;
- 16 registros que armazenam os valores convertidos;
- 2 seqüenciadores de 8 estados (SEQ1 e SEQ2) que pode trabalhar independentes ou em cascata com seqüência 16 estado;

- Inicia a conversão por software, pelo gerenciador de eventos ou um pino externo.

Os seqüenciadores permitem a determinação de listas com as seqüências dos canais a serem amostrados através do multiplexador. Após a conversão os resultados obtidos são armazenados em ordem de amostragem nos registradores RESULTn (primeira amostragem no RESULT0, segunda no RESULT1 e assim em diante), sendo permitido amostrar o mesmo canal várias vezes.

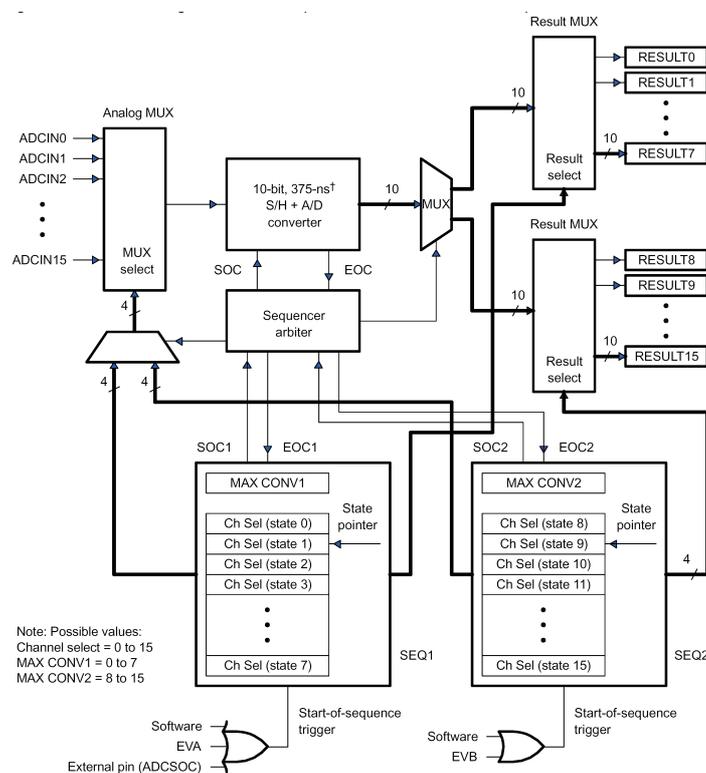


Figura 2.16: Diagrama de blocos ADC com os seqüenciadores SEQ1 e SEQ2

Os estados dos seqüenciadores indicam os números dos canais a serem amostrados (0 a 15). O estado atual do seqüenciador indica qual é o pró-

ximo canal a ser amostrado, e uma vez feita esta conversão o seqüenciador avança para o estado seguinte. Na parte inferior da Figura 3.8 estão indicadas as fontes de trigger de cada SEQ. Quando uma SEQ recebe um SOC (strat of conversion), ela parte do seu estado atual e converte o número de estados determinado no registrador MAXCONVx. Os valores amostrados vão sendo armazenados nos registradores RESULTn (0 a 7 para SEQ1 e 8 a 15 para SEQ2) na ordem em que foram amostrados, como foi dito anteriormente. Após completar a operação o SEQ pode ser zerado, voltando para o estado inicial, permanecer no estado onde parou, ou reiniciar uma nova seqüência de conversões a partir do estado inicial caso esteja no modo de operação contínuo. Uma vez iniciada uma seqüência ele não pode ser parada no meio. O programa deve esperar o fim da seqüência ou aplicar um reset levando-a para o seu estado inicial. Quando uma SEQ está sendo executada e a outra recebe um SOC, ela espera a primeira terminar para em seguida iniciar imediatamente a sua execução. Os seqüenciadores SEQ1 e SEQ2 podem também ser configurados para trabalharem no modo cascata, formando um único seqüenciador de 16 estados, como mostrado na figura 2.17. O comportamento é exatamente igual ao descrito acima para o modo independente. Esta arquitetura permite uma grande flexibilidade nas estratégias de amostragem, possibilitando a adoção de triggers gerados por vários tipos de eventos ou diretamente por software. Ao final da execução de uma seqüência é setado o flag de interrupção, que pode gerar uma requisição caso

esteja habilitado. A interrupção do ADC pode ser configurada para ter alta ou baixa prioridade. O ADC proporciona também a funcionalidade de calibração, que permite o cálculo de erros de offset de zero, midpoint ou fundo de escala. O valor calculado para o erro é armazenado em um registrador e somado automaticamente aos resultados convertidos durante o modo normal de operação.

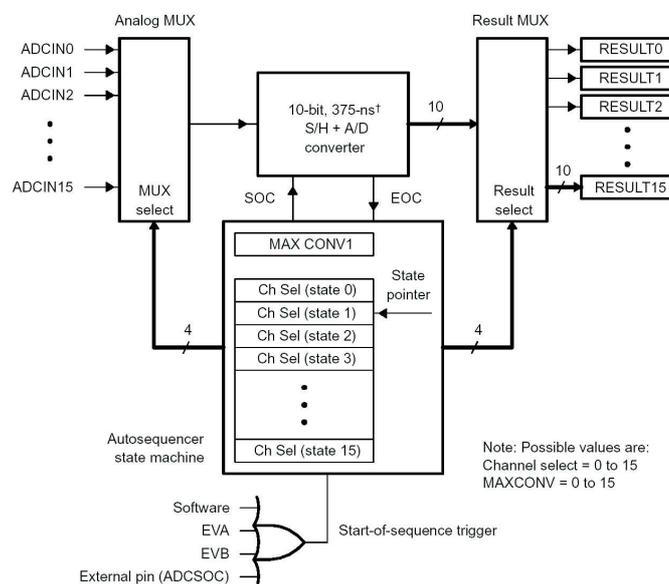


Figura 2.17: Diagrama de blocos ADC em modo cascata

No programa da central aberta, aqui implementado, utilizou-se 6 canais e início da conversão foi feito por software.

2.8 Interface serial

A interface de comunicação serial (SCI) oferece o modo de comunicação universal assíncrono transmissor/receptor (UART). A SCI também oferece dois protocolos: o modo processador idle-line e o modo multiprocessador adress-bit. Estes protocolos permitem transferência de dados eficiente entre múltiplos processadores. Suas principais características são:

- Dois pinos de I/O: SCIRXD e SCITXD;
- Taxa de dados programável de 76 bps até 2500 kbps;
- Tamanho da palavra de dados programável de 1 até 8 bits;
- Número programável de stop bits (1 ou 2);
- Clock gerado internamente;
- Quatro flags de detecção de erros: Erro de paridade, Erro de overrun, Erro de framing e Erro de detecção de break
- Operação em modos half ou full duplex;
- Funções de transmissão e recebimento com buffers duplos;
- transmissor e receptor podem funcionar por interrupções ou polling dos flags de status;
- Independência entre o transmissor e o receptor.

O diagrama de blocos da interface de comunicação serial é apresentado na figura 2.18.

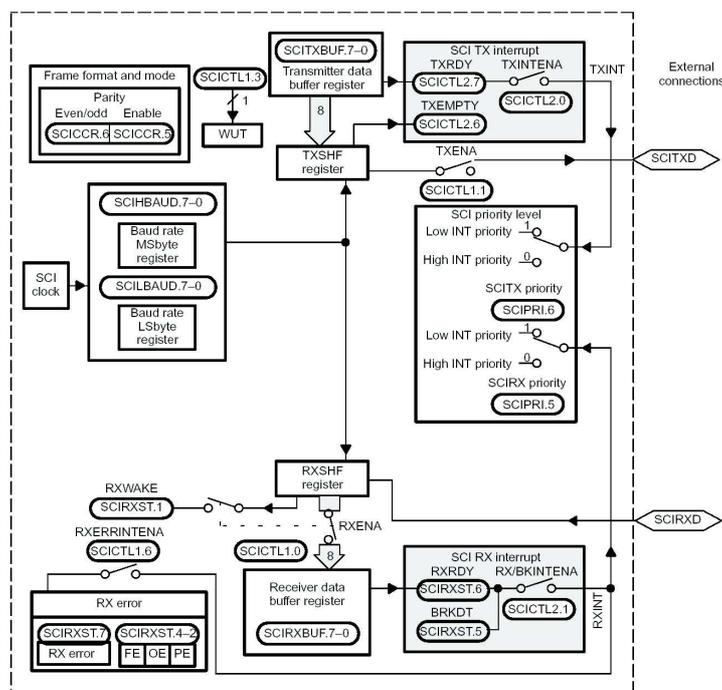


Figura 2.18: Diagrama de blocos SCI

Todos os registradores deste periférico são de 8 bits. No registrador SCITXBUF é armazenado o byte a ser enviado, que é repassado a TXSHF, responsável por enviar o byte bit a bit através do pino SCITXD. Porém esse envio só ocorre se o transmissor estiver habilitado através do TXENA. Quando SCITXBUF é liberado o flag TXRDY é acionado para indicar que uma nova palavra pode ser escrita. Uma interrupção será requisitada caso TXINTENA esteja habilitado. Esta interrupção pode ser da alta ou baixa prioridade dependendo do registrador SCIPRI. No receptor, os bits são re-

cebidos através do pino SCIRXD e armazenados em RXSHF. Após os 8 bits terem sido recebidos, o byte é enviado para SCIRXBUF se o receptor estiver habilitado através de RXENA. Quando SCIRXBUF recebe um byte o flag RXRDY é acionado para indicar que ele deve ser lido. Se a interrupção estiver habilitada através de RX/BKINTENA será gerada uma requisição. O registrador SCIRXST contém bits de status do receptor que são atualizados toda vez que um byte é recebido. Estes bits indicam a ocorrência de erros durante a comunicação. As velocidades (baud rate) de envio e recebimento são determinadas pelos registradores SCIHBAUD e SCILBAUD. A forma dos blocos de dados e os tipos de detecção de erros implementados são determinados por SCICCR. De maneira resumida, para realizar uma comunicação utilizando este módulo é necessário:

- Configurar a velocidade de comunicação através de SCIHBAUD e SCILBAUD;
- Configurar a forma do bloco de dados de maneira igual em ambos os lados da comunicação;
- Selecionar as mesmas estratégias de detecção de erro em ambos os lados da comunicação;
- Habilitar o receptor e o transmissor;
- Tratar as interrupções geradas pelo módulo escrevendo valores em SCITXBUF e lendo valores de SCIRXBUF de acordo com algum protocolo

determinado;

- Verificar os flags de erro se necessário.

Conclui-se que é bastante simples implementar uma comunicação utilizando este módulo, já que todo o sincronismo de troca de dados é implementado pelo DSP, sendo necessário apenas configurar os parâmetros da comunicação e verificar os flags de erros que eventualmente ocorrerem durante a troca de dados.

2.9 Conclusão

Neste capítulo foram abordados os aspectos básicos da CPU do DSP TMS320LF2407 e periféricos utilizados na implementação da central aberta. A alta desempenho da CPU permite uma interação em tempo real com o mundo físico. Os periféricos oferecem funcionalidades que facilitam a implementação de sistemas de controle e processamento de sinais, tornando este dispositivo muito útil em diversas áreas da engenharia.

Os módulos apresentados são adequados para a implementação de um sistema de controle digital. O ADC realiza de maneira simples a amostragem dos sinais analógicos usando seus seqüenciadores, que podem ser disparados pelos timers dos módulos EV, software e evento externo. Ao final da amostragem pode ser requisitada uma interrupção, onde os valores obtidos são manipulados através das funcionalidades da CPU. Grandes rotinas de algoritmos de controle, adaptação e condicionamento de sinais podem ser

armazenadas na memória flash do DSP, que ainda possui interface para memória externa caso seja necessário. Estas rotinas podem retornar valores para o acionamento dos atuadores do sistema, que serão usados pelo gerenciador de eventos (EV) de forma a gerar sinais de comando para a planta. O módulo de comunicação serial (SCI) permite enviar valores das variáveis para um software em PC, possibilitando deste modo, o ajuste de parâmetros do sistema de controle. Obtém-se assim um sistema de controle completo com os módulos básicos de um DSP.

Capítulo 3

Metodologia

3.1 Introdução

Visando facilitar a utilização do sistema implementado, optou-se por utilizar os mesmos sensores e atuadores presentes no sistema de gerenciamento eletrônico original [3], [4]. A central desenvolvida tem como CPU um DSP (Digital Signal Process) da Texas Instruments Inc. modelo TMS320F2407A.

O DSP tem como finalidade receber os sinais do sistema, processar e enviar sinais de comando para os atuadores, controlando assim a ignição e injeção de combustível no motor. Além disto, ele possui uma comunicação serial que possibilita receber e enviar dados para uma Interface Homem Máquina (IHM) implementada em um computador utilizando linguagem delphi. Através desta interface é possível monitorar e alterar parâmetros como ângulo de ignição, tempo de injeção e dados de calibração dos sensores.

O sistema desenvolvido pode ser dividido em três partes: O Hardware; O Software; A interface Homem Máquina. Nas seções seguintes será descrita a

metodologia usada para cada parte do projeto.

3.2 Hardware

O hardware projetado tem a função de condicionar os sinais dos sensores, fornecer potência para os sinais de comando dos atuadores e fazer a interface para comunicação serial entre o DSP e um PC. Os circuitos projetados foram divididos em módulos visando facilitar a implementação, manutenção e o aprimoramento. Estes módulos são:

- Condicionadores de sinais;
- Drives de potência;
- Interface serial.

Os condicionadores de sinais foram projetados especialmente para receber os sinais dos sensores instalados no motor e fazer a interface com o DSP. Estes sinais são:

- Posição da borboleta;
- Pressão no coletor de admissão;
- Tensão da bateria;
- Sonda lambda;
- Temperatura do ar no coletor de admissão;

- Temperatura da água de arrefecimento;
- Rotação do motor.

A arquitetura do hardware dos condicionadores de sinais é mostrado na figura 3.1 em forma de diagrama de blocos. Estes sinais são importantes para informar à CPU as diversas condições de funcionamento do motor. A partir destas informações são determinados parâmetros importantes para controle do motor como o tempo de injeção e o ângulo de avanço de ignição . Além disto, o operador pode monitorar em tempo real estes sinais que são mostrados na IHM.

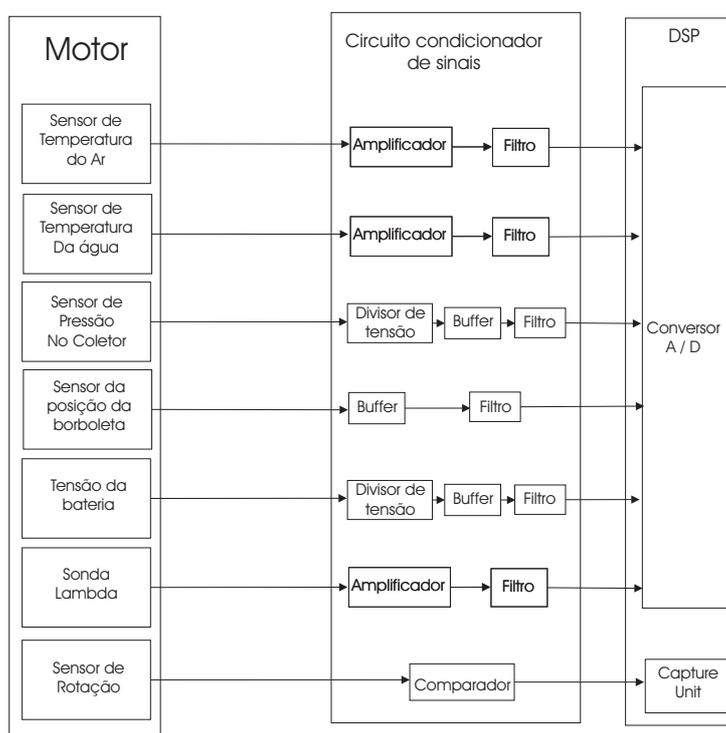


Figura 3.1: Arquitetura dos condicionadores de sinais

O DSP processa os sinais provenientes dos condicionadores de sinais e envia sinais de comando para os drives de potência. Estes condicionam os sinais provenientes da CPU antes de serem enviados aos atuadores instalados no motor, como as bobinas de ignição e bicos eletro-injetores. Estes drives são divididos em dois:

- Driver de injeção
- Driver de ignição

A figura 3.2 apresenta a arquitetura básica dos drives de injeção e ignição. Pode-se notar que o drives de ignição, que possui um MOSFET como parte integrante do seu circuito, e o drive de injeção, que possui um IGBT, recebem os sinais de PWM provenientes da CPU.

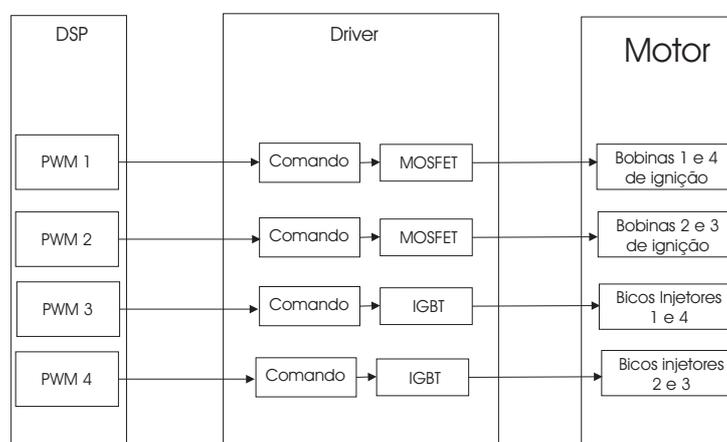


Figura 3.2: Arquitetura dos Drivers

É disponibilizada também uma comunicação entre o DSP e um computador. Esta comunicação é feita através da porta serial. O hardware faz a

interface entre o PC e o DSP, uma vez que os níveis lógicos de tensão entre os mesmos são diferentes. A figura 3.3 mostra a arquitetura desta comunicação.



Figura 3.3: Arquitetura do sistema de comunicação

A figura 3.4 apresenta uma foto do protótipo do hardware da central eletrônica desenvolvida. A figura 3.5 mostra o dinamômetro onde foram feitos os ensaios do sistema implementado. Neste capítulo será descrito com detalhes os módulos citados acima.

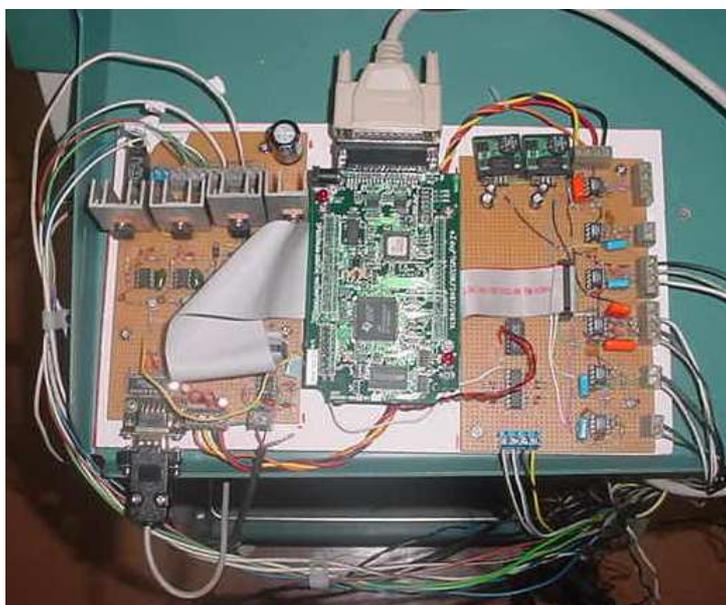


Figura 3.4: Foto do protótipo da central aberta

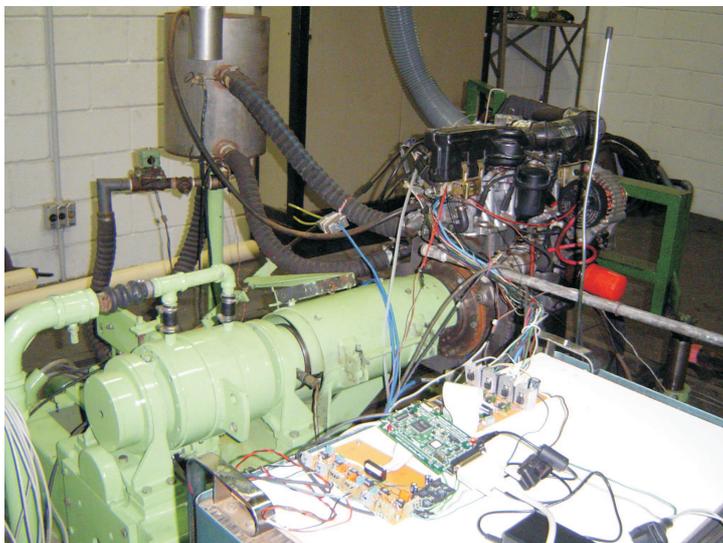


Figura 3.5: Ensaio utilizando o protótipo da central aberta

3.2.1 Condicionadores de sinais

Sinal de rotação / posição angular da árvore de manivela

A medição da rotação instantânea do motor é realizada através de um sensor indutivo como descrito no capítulo anterior.

Através deste sinal é possível sincronizar os ângulos de ignição e fase de injeção com o movimento alternativo dos pistões do motor devido à presença de uma falha equivalente a 2 dentes na roda fônica.

O sensor é posicionado próximo a roda fônica. Estes são ajustados de forma que quando a falha passar pelo sensor, sabe-se que 20 dentes depois os pistões dos cilindros 1 e 4 estão no ponto morto superior.

O sinal do sensor de rotação é levado até um comparador que transforma o sinal senoidal em uma onda quadrada, como mostrado na Figura 3.6. Este

sinal é invertido em relação ao sinal do sensor para adaptar-se melhor a lógica de processamento implementada.

Os sinais mostrados na figura 3.6 foram salvos quando o motor desenvolvia uma rotação de 1000 rpm. Pode-se notar pela figura que o sinal senoidal (a) e o sinal quadrado (b) possuem um período de aproximadamente 1 ms, com exceção do instante da falha. Ou seja, a frequência em que cada dente passa pelo sensor de rotação é 1000 Hz. Então, o eixo do motor levará 60 ms para dar uma volta completa pois são 60 dentes. Assim, a frequência de rotação será de 16,66 Hz ou 1000 rpm.

Para adequar ao nível lógico do DSP, o sinal quadrado (b) possui amplitude máxima de 3,3 volts independente do valor de pico atingido pela forma de onda do sinal do sensor (a).

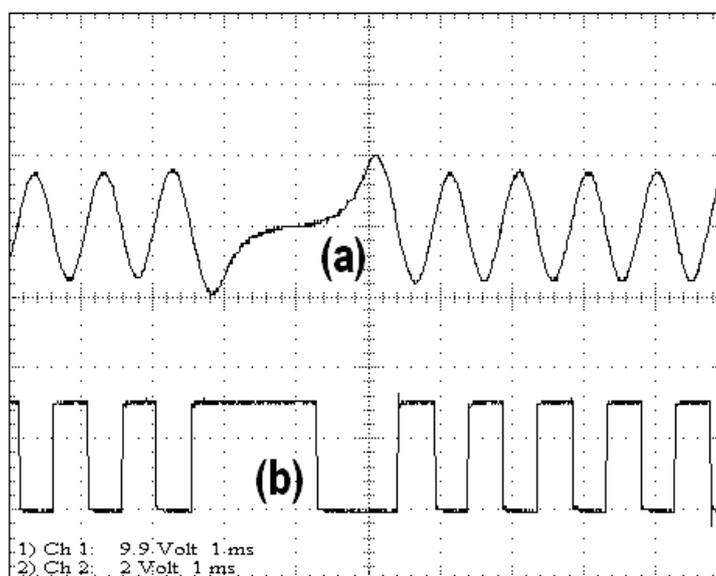


Figura 3.6: (a) Sinal proveniente do sensor de rotação (b) Sinal condicionado

Este sinal quadrado é levado até o terminal de entrada (CAP1) do DSP para sincronizar os pulsos de ignição e injeção com o movimento dos pistões e medir a velocidade de rotação do motor. O circuito condicionador do sinal de rotação é apresentado na figura 3.7.

Devido ao ruído na passagem por zero do sinal de rotação optou-se por utilizar um pequeno capacitor na entrada do circuito e um comparador com histerese. Houve também a necessidade do diodo zener para grampear o sinal em altas rotações do motor.

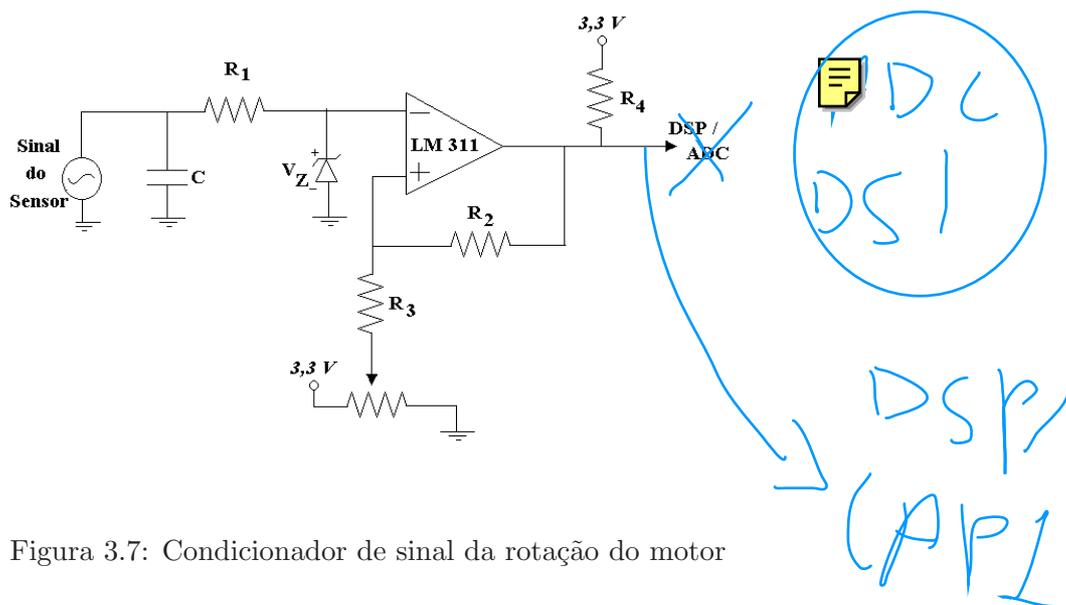


Figura 3.7: Condicionador de sinal da rotação do motor

Temperatura do ar

O sensor de temperatura do ar de aspiração é um termistor, o qual necessita de um circuito utilizando fonte de tensão ou fonte de corrente, para converter a variação de resistência em variação de tensão. Optou-se em usar neste caso um circuito fonte de corrente como mostrado na figura 3.8.

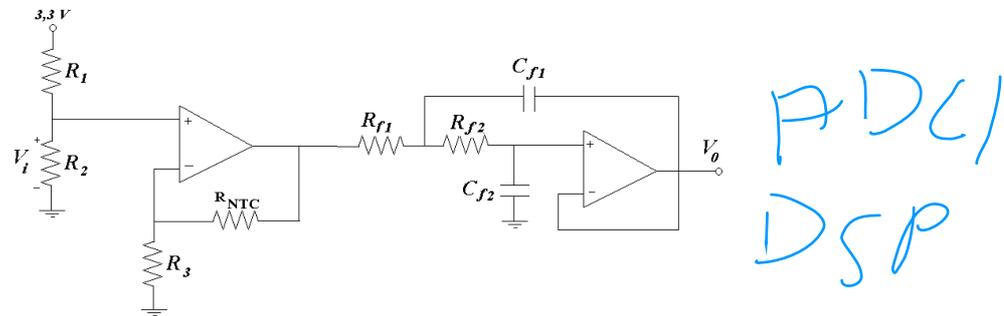


Figura 3.8: Condicionador de sinal do sensor de temperatura

O amplificador operacional utilizado não necessita de uma fonte simétrica sendo ideal para aplicação automotiva.

Na entrada não-inversora do amplificador operacional utilizou-se um divisor resistivo de tensão formado por R_1 e R_2 . A tensão fornecida por este divisor é:

$$V_i = 3,3 \frac{R_1}{R_1 + R_2} \quad (3.1)$$

Esta tensão V_i impõe uma corrente na resistência do sensor que é dado por:

$$I = \frac{V_i}{R_3} \quad (3.2)$$

Isto faz a tensão de saída do circuito ser em função da variação da resistência do sensor com a temperatura:

$$V_o = \left(1 + \frac{R_{NTC}}{R_3}\right) V_i \quad (3.3)$$

Foi utilizado um filtro Butterworth ativo passa baixa com frequência de corte igual a 100 Hz, com o objetivo de eliminar ruído que, por ventura,

Tensão (V)	Temperatura (°C)
3,28	0,09
2,08	10,25
1,39	20,14
0,98	30,10
0,72	40,23
0,55	50,10
0,45	60,21
0,38	70,06
0,33	80,02
0,30	90,09
0,27	100,08

Tabela 3.1: Calibração da Temperatura do Ar de entrada

apareça no sinal V_o [10]. Em todas as saídas dos diversos sensores foram instalados filtros como esse.

A calibração do sensor de temperatura do ar foi feito juntamente com o sensor de temperatura da água devido ao fato dos dois sensores terem as mesmas características. Para temperaturas inferiores a 50°C , os sensores foram inseridos em um banho de álcool juntamente com um sensor de temperatura padrão. Posteriormente, para temperaturas acima de 50°C , este sistema foi levado para um meio de silicone onde foi possível elevar a temperatura até 100°C . A curva do sensor de temperatura do ar foi levantada conforme a tabela 3.1 e mostrada na figura 3.9. Esta calibração foi realizada nos laboratório de calibração do CETEC-MG.

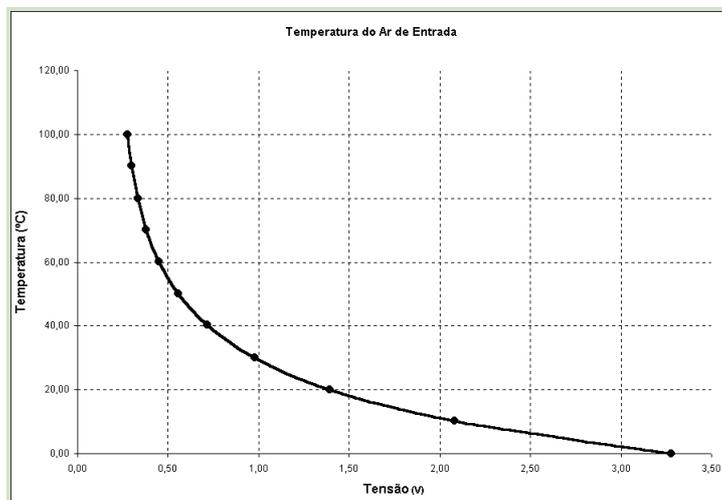


Figura 3.9: Calibração da temperatura do Ar de entrada

Temperatura da água

Assim como o sensor do ar, o sensor de temperatura da água de arrefecimento também é um termistor. Foi utilizado um circuito e uma calibração similar ao sensor de temperatura do ar, e portanto, foi obtido uma curva de calibração muito semelhante.

Pressão no Coletor de admissão

O sensor utilizado para obter a pressão do ar no tubo de admissão é um sensor automotivo de pressão absoluta do tipo piezoresistivo em ponte de wheaststone. Seu encapsulamento possui três terminais de ligação, sendo um terminal de alimentação (5 V), um de terra e o sinal de saída. Sua resistência interna é de aproximadamente de 1,6k ohms e tem um consumo de corrente de 10 mA.

Este sensor já tem incorporado no seu invólucro um circuito condicionador de sinal que fornece um sinal de 0 a 5 V proporcional a pressão. Tornou-se então necessário transformar esta faixa de trabalho, através de um divisor de tensão, para a faixa de 0 a 3,3 V. O circuito condicionador de sinal é mostrado na figura 3.10.

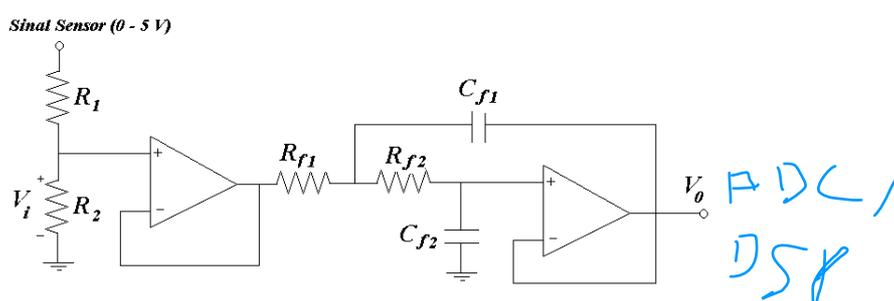


Figura 3.10: Condicionador de sinal do sensor de pressão

Devido ao movimento alternativo dos pistões, nota-se uma flutuação de pressão no tubo de admissão com frequência dada pela equação 3.4; onde N é o número de cilindros e V_{rpm} é a rotação em RPM .

$$f_p = \frac{NV_{rpm}}{120} \quad (3.4)$$

Este fenômeno ocorre pois, quando a válvula de admissão se abre e o pistão inicia o movimento para baixo e a pressão começa a cair. Quando o pistão atinge o ponto morto inferior a válvula de admissão se fecha e a pressão no tubo de admissão começa novamente a crescer. Então outro pistão inicia a admissão de mistura e a pressão decresce novamente recomeçando o ciclo

[13]. Esta flutuação de pressão é mostrada na figura 3.11.

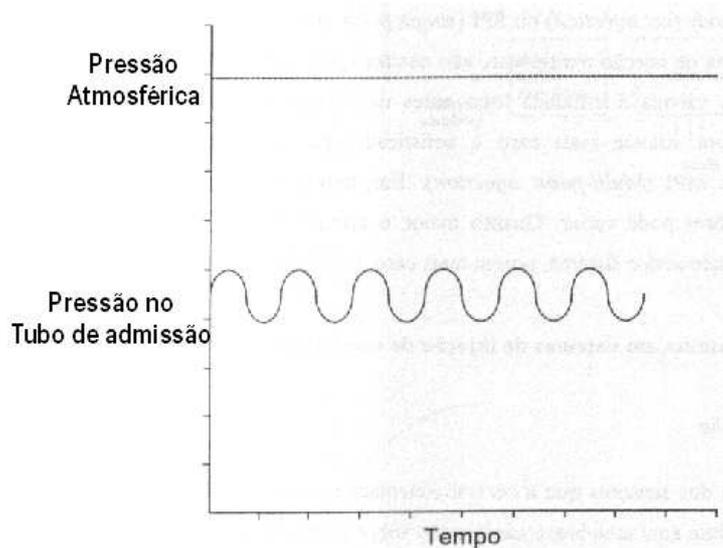


Figura 3.11: Flutuação da pressão no tubo de admissão

Como para o controle do sistema é necessário somente o valor médio da pressão e considerando uma velocidade de rotação em marcha lenta mínima de 800 RPM, projetou-se um filtro Butterworth de segunda ordem com frequência de corte de 10 Hz para atenuar esta flutuação.

O resultado da calibração deste sensor é apresentado na tabela 3.2 e mostrado na figura 3.12.

Tensão (V)	Pressão (mmHg)
0,25	150,4
0,59	225,0
0,93	299,4
1,27	375,3
1,62	450,0
1,96	525,2
2,30	600,4
2,47	637,6
2,64	675,7
2,73	693,2
2,77	703,3
2,82	712,5
2,84	717,1
2,88	725,5
2,92	734,0
2,98	747,9
3,04	762,7
3,14	784,7

Tabela 3.2: Calibração do Sensor de Pressão no coletor

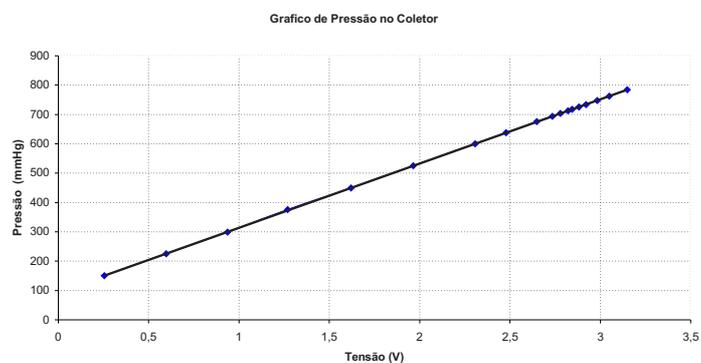


Figura 3.12: Gráfico da Calibração do Sensor de Pressão

Posição da borboleta

O sensor de posição da borboleta é um potenciômetro e seu cursor é acionado pelo eixo da válvula borboleta. O sinal de tensão é diretamente proporcional à posição angular da borboleta como mostrado na seção 1.6.

Neste trabalho o sensor foi alimentado com 3,3 Volts para se adequar ao sinal de entrada do A/D do DSP. Assim o sinal de saída terá uma variação linear, entre 0 a 3,3 V de acordo com o ângulo da borboleta. O sensor possui três terminais de conexão sendo o GND, alimentação e sinal de saída. O diagrama esquemático deste condicionador de sinal pode ser visto na figura 3.13.

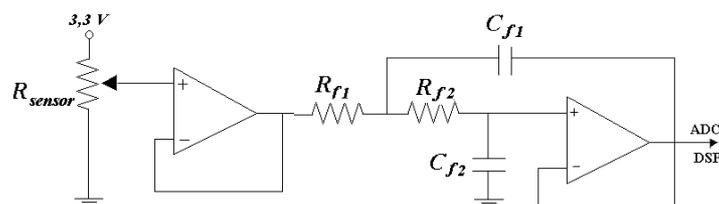


Figura 3.13: Condicionador de Sinal da posição da borboleta

Driver de injeção

O driver de injeção é utilizado para fornecer potência ao sinal de comando de injeção proveniente da CPU. Este sinal é um PWM (Pulse width modulation) que tem a largura de pulso variável de acordo com o tempo de injeção.

O circuito do driver de injeção é apresentado na figura 3.14. Este tem a

função de abrir e fechar o bico injetor adequadamente, além de proporcionar a proteção do sistema de injeção evitando a destruição do bico injetor e danificação do próprio driver.

A figura 3.15 mostra o sinal de comando de gate (a) e dreno do MOSFET (b), obtidas experimentalmente no circuito do protótipo. Note que a largura do pulso escolhida pelo operador foi de 2,5 ms (intervalo de t_1 a t_2). Durante este tempo o MOSFET está conduzindo permitindo a abertura do bico injetor.

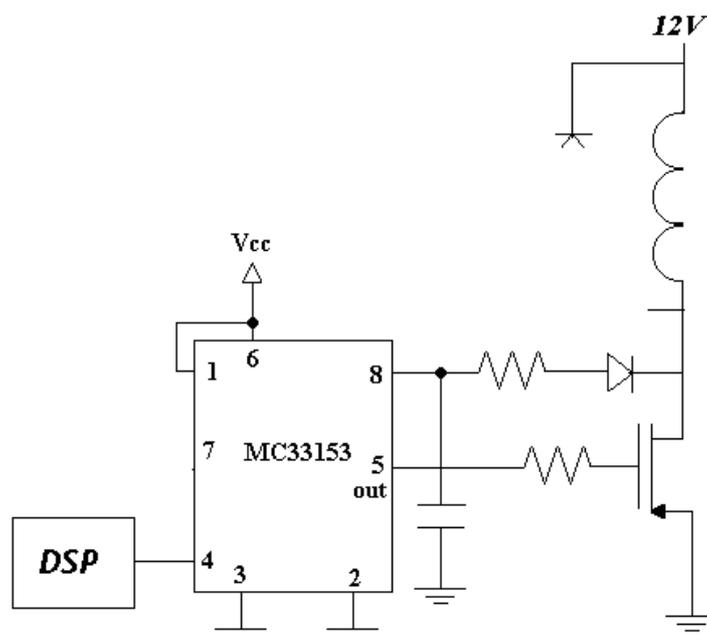


Figura 3.14: Circuito de Injeção de combustível

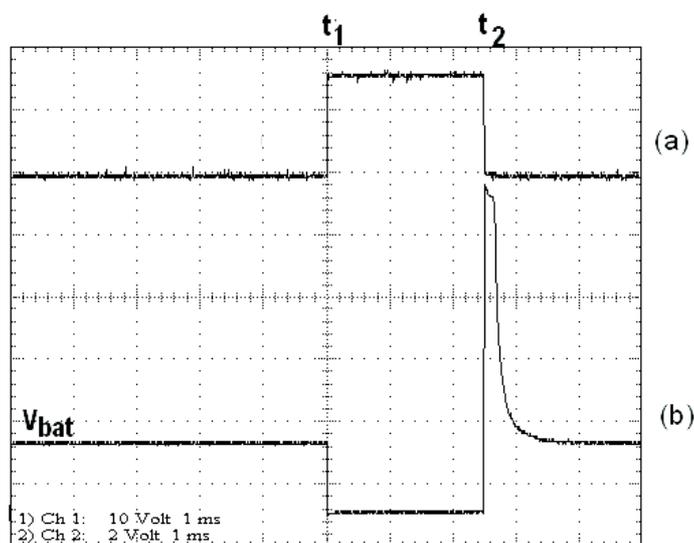


Figura 3.15: (a) Pulso de Comando de injeção (b) Sinal no dreno do MOSFET

Driver de ignição

O driver de ignição, cujo diagrama esquemático é apresentado na figura 3.16 tem função análoga do driver de injeção. O tempo de duração do sinal PWM é calculado para ter um valor de corrente no primário da bobina suficiente para que a vela produza um arco elétrico com a energia necessária para queima do combustível. Este tempo é, normalmente, chamado de tempo de permanência.

A figura 3.17 mostra as principais formas de onda do driver de ignição, obtidas experimentalmente. No instante t_o o IGBT conduz energizando a bobina de ignição. Observe na figura 3.18 que a corrente no primário aumenta exponencialmente. Em t_1 , no momento da ignição, o IGBT é bloqueado. Neste instante a Tensão de dreno (tensão do secundário refletida no primário), sobe

abruptamente, iniciando a centelha na vela de ignição. Após iniciar a centelha a tensão diminui, permanecendo praticamente constante, até a faísca extinguir no instante t_2 . Então, a tensão no coletor é estabelecida igual ao valor da bateria. Durante o período de duração da centelha ($t_1 - t_2$) a mistura ar-combustível entra em combustão.

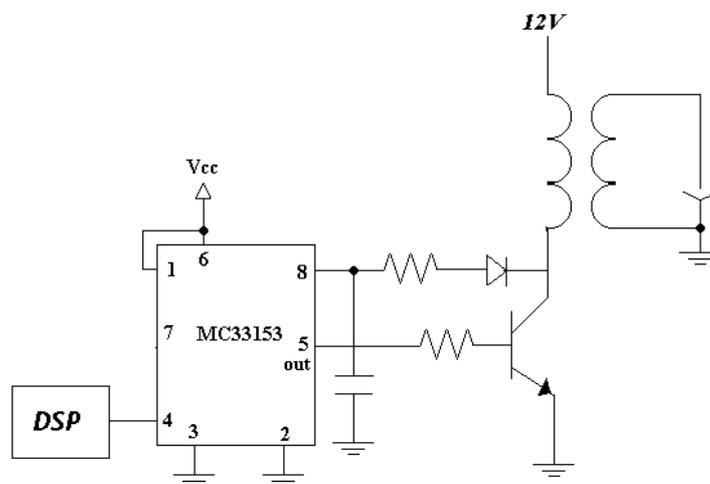


Figura 3.16: Circuito de Ignição

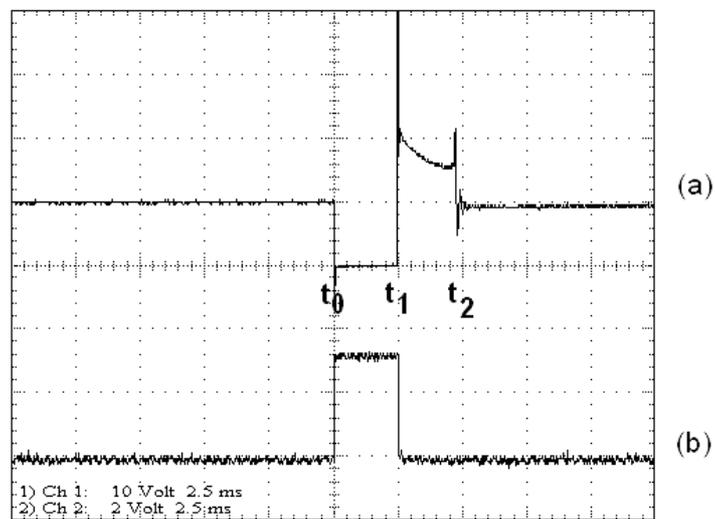


Figura 3.17: (a) Sinal no Dreno (b) Pulso de Comando de ignição

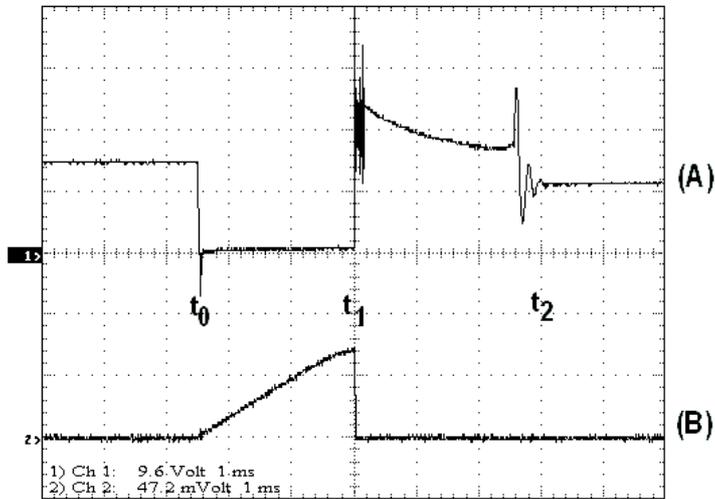


Figura 3.18: (a) Sinal no Dreno (b) Sinal da corrente

3.3 Software

O software foi implementado em linguagens C e assembly, utilizando como plataforma um DSP TMS320F2407A da Texas Instruments. Este é responsável por inicializar o sistema, processar os sinais recebidos dos sensores do motor, enviar sinais de comandos para os atuadores do motor.

O programa foi dividido nos seguintes módulos:

- Processamento do sinal de rotação;
- Conversor analógico/Digital;
- Módulo de ignição;
- Módulo de injeção;
- Módulo Driver PWM;
- Comunicação Serial;
- Interpolação de Tabelas;
- Mapas de Injeção e Ignição.

A figura 3.19 mostra o diagrama de blocos do software desenvolvido. O módulo de processamento do sinal de rotação(Capture Unit) calcula a frequência do motor e identifica a posição dos pistões a partir do sinal proveniente do sensor de rotação. Este bloco envia o período calculado para os mapas de ignição e injeção.

Os mapas são tabelas que fornecem o ângulo de ignição e o tempo de injeção base previamente ajustado em bancada. Estes parâmetros podem ser ajustados através da interface Homem-Máquina.

A interface possibilita ao usuário estabelecer um ângulo que irá ser somado ao ângulo estabelecido pelo mapa de ignição ou uma porcentagem relativa do tempo de injeção estabelecida pelo mapa de injeção. Além disto, esta interface também possibilita ao usuário definir o tempo de permanência de ignição e a fase de injeção. Esta interface é feita através do módulo de comunicação serial (Serial Unit).

O módulo de ignição possui como entrada o ângulo de ignição proveniente do mapa de ignição, o tempo de permanência proveniente da interface homem-máquina e o período proveniente do módulo de processamento do sinal de rotação.

De forma análoga, o módulo de injeção recebe os sinais de fase de injeção proveniente da comunicação serial, o tempo de injeção proveniente do mapa de injeção e o período calculado no módulo de processamento do sinal de rotação.

Estes dois módulos tem como finalidade processar os valores de entrada e calcular parâmetros para que o driver PWM forneça o sinal de comando para os atuadores do motor(PWM1, PWM2, PWM3 e PWM4).

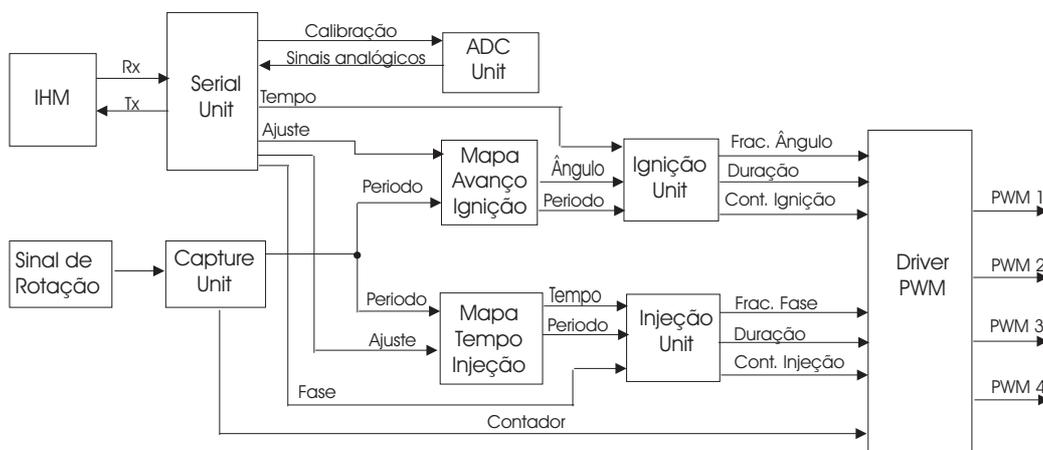


Figura 3.19: Diagrama dos Módulos do sistema

O fluxograma da interrupção de hardware, que é apresentado na figura 3.20, traduz a lógica usada no programa. Quando o sinal detecta a borda de subida do sinal de rotação é gerado a interrupção descrita no diagrama. Assim, a CPU armazena o valor do contador. Este valor é comparado com o valor armazenado na interrupção anterior. Caso o valor atual do contador for muito maior que o anterior, é identificado a falha na roda fônica. Assim, é feito a leitura nos mapas de ignição e injeção e calculado os parâmetros necessário para formar os sinais de comando.

Caso este seja o instante em que deve ser formado os pulsos de comando de ignição e injeção, os contadores referentes a este pulsos são iniciados e usados para formar o sinal de comando. Caso contrário, é finalizado a interrupção.

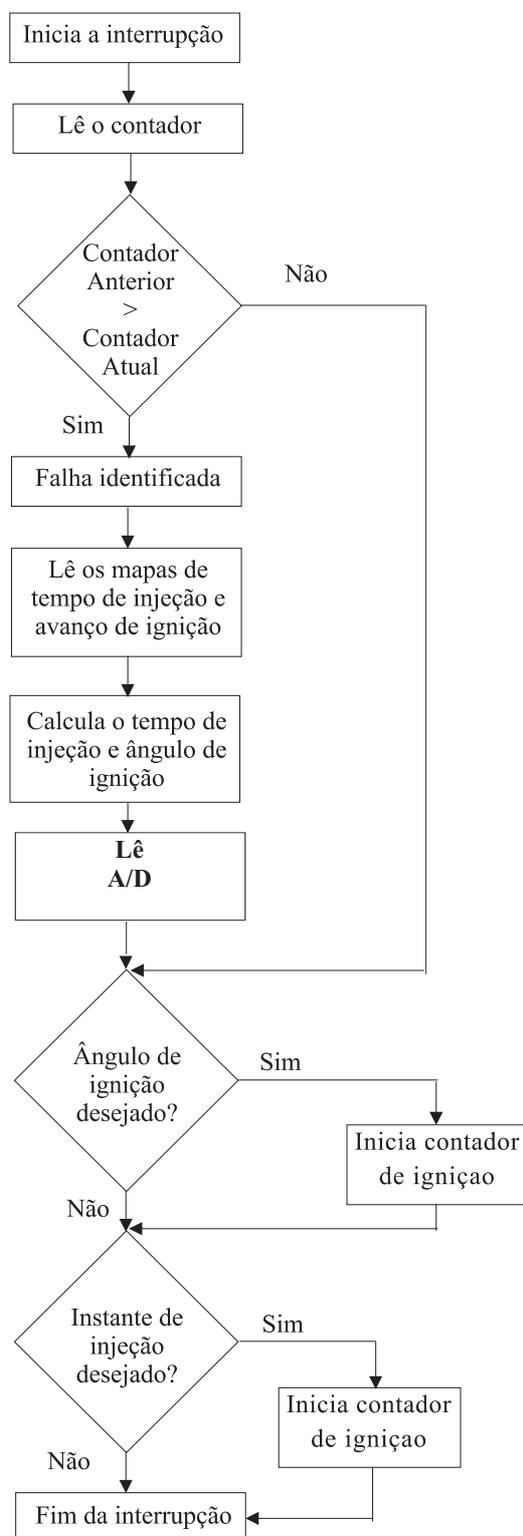


Figura 3.20: fluxograma da interrupção de hardware

3.3.1 Processamento do sinal de rotação

Este módulo, mostrado na figura 3.22, tem como entrada o sinal condicionado do sensor de rotação. O sinal de rotação é mostrado na figura 3.6 da descrição do hardware.

Como visto, a roda fônica possui espaço para 60 dentes, porém, como esta possui uma falha de dois dentes, o sinal quadrado irá ter 58 pulsos por rotação.

Uma interrupção é gerada a cada borda de subida, ou seja, são 58 interrupções a cada volta da roda fônica. O fluxograma da subrotina executada nesta interrupção é mostrada na figura 3.20.

Como lógica de programação, mostrada na figura 3.21, optou-se por iniciar um contador (timer 2) a cada interrupção. Sendo assim, é armazenado o valor deste contador, o qual é reiniciado para leitura na próxima interrupção. O valor anterior é comparado com o valor atual do contador. Se o valor atual (Periodo2) é maior do que o valor armazenado (Periodo1), pode-se concluir que este é o momento em que o sensor está passando pela falha dos 2 dentes. Assim, como visto, o cilindro 1 estará no ponto morto superior 20 dentes depois da falha, ou seja, 20 interrupções. Assim, é possível sincronizar os pulsos de ignição e injeção com o movimento alternativo dos pistões. Além disto, o período armazenado dois dentes antes da falha (Periodo3) será usado como base de cálculo para determinar a frequência de rotação do motor. Esta será utilizada nos módulos de ignição e injeção para calcular o momento exato de

disparo dos pulsos de comando, bem como o tempo de duração destes pulsos. Notou-se na prática que o período anterior à falha apresenta influência da falha para altas rotações (Acima de 4000 rpm) o que o impossibilita de usá-lo para determinar a frequência do motor.

O módulo de processamento do sinal de rotação, apresentado na figura 3.22, tem como entrada o sinal de rotação proveniente do sensor. A saída é o período usado no módulo do mapa de injeção, módulo do mapa de ignição, no módulo de ignição e módulo de injeção. Este período é o tempo gasto entre uma interrupção e outra como mostrado na figura 3.21 (Período3). A outra saída é o contador que tem o objetivo de fornecer o número de interrupções, sabendo assim a posição dos pistões conforme já descrito. Este será útil no módulo driver PWM, onde será utilizado para sincronizar os pulsos de comando com a posição dos pistões.

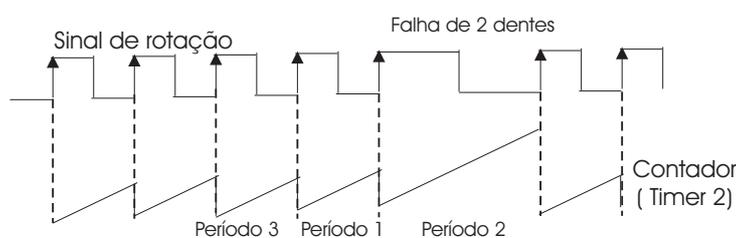


Figura 3.21: Contador sendo usado para estabelecer posição e rotação do motor

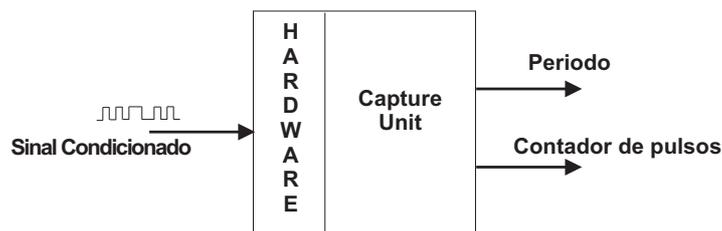


Figura 3.22: Módulo de processamento do sinal de rotação

```

#ifndef CAPTURE_UNIT_H
#define CAPTURE_UNIT_H

typedef struct
{
    unsigned long int    Periodo1;  \\ período armazenado
                                \\ para comparação
    unsigned long int    Periodo2;  \\ período atual
    unsigned long int    Periodo3;  \\ período usado para
                                \\ cálculo de frequência
    unsigned int         Contador;  \\ número de interrupções
    int                  FlagFalha; \\ Identifica falha
    void (*Init)(void);
    void (*UpDate)(void *);
    void (*TestaFalha)(void *);
} CAPUNIT;

#define CAPUNIT_DEFAULTS { 0,0,1,0,0,0,0,
(void (*)(void))CaptureInit, (void (*)(void *))CaptureUpDate,
(void (*)(void *))CaptureTestaFalha }

void CaptureInit();           \\ Inicializa os registros
                                \\ iniciais
void CaptureUpDate(CAPUNIT *); \\ Atualiza os resultados a
                                \\ cada interrupção
void CaptureTestaFalha(CAPUNIT *); \\ Verifica a presença da
                                \\ falha

CAPUNIT    Capture    = CAPUNIT_DEFAULTS; \\ Inicializa
                                \\ Estrutura

void main() {
Capture.Init(); /*Configura Registros do Capture unit*/

```

```
}  
  
void interrupt c_int04() \\ Interrupção do Capture  
{  
    Capture.UpDate(&Capture);      \\Atualiza Capture  
    Capture.TestaFalha(&Capture);  \\Verifica o instante da falha  
}
```

3.3.2 Módulo de Ignição

O ângulo entre um pulso e outro representa 6° da roda fônica pois esta é uma roda dentada com espaço para 60 dentes igualmente espaçados. Assim é possível converter o ângulo de avanço da ignição em número de pulsos bastando apenas dividir por 6. Porém, para os ângulos que não são múltiplos de 6 é necessário incluir nos cálculos a fração do período resultante desta operação de divisão. Assim obtemos uma alta resolução maior do que a necessária pois o motor é sensível a variações na ordem de $0,5^\circ$.

Conforme visto, é preciso determinar também o tempo de permanência para garantir potência suficiente para a centelha. Este pode ser parametrizado pelo operador. Este tempo deve entrar nos cálculos para garantir que o final do pulso de comando de ignição coincida com o ângulo de avanço desejado.

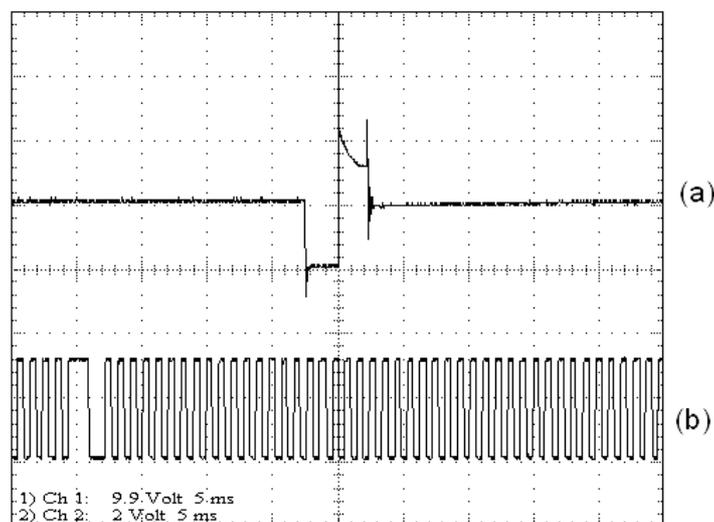


Figura 3.23: (a) Sinal no Coletor (b) Pulso de Comando de ignição

A figura 3.23 apresenta o sinal no coletor do IGBT da bobinas dos cilindros 1 e 4 e o pulso referente ao sinal de rotação. Neste exemplo, o motor estava a 1000 rpm e o ângulo de avanço era de 0° , o qual foi determinado pelo operador. Nota-se que o fim do pulso de ignição e início da centelha coincide com o vigésimo pulso ou seja, vigésimo dente.

A figura 3.24 apresenta o módulo de ignição. Este módulo recebe o período determinado no módulo de processamento do sinal de rotação, o ângulo de avanço de ignição, determinado no mapa de avanço de ignição (de acordo com a rotação e carga), e o tempo de duração do pulso do comando (Determinado pelo operador). Na saída do módulo é apresentado o ângulo de ignição e duração do pulso de comando em função do período e o contador de ignição.

O contador de ignição representa o número de pulsos necessário para ig-

nitir no ângulo desejado. O Ângulo de ignição representa a fração resultante da operação de divisão do ângulo desejado por 6. A duração do pulso determina qual o tempo de duração do pulso de comando. Maiores detalhes são explicados na descrição do módulo driver PWM, figura 3.26, onde estas variáveis representam a entrada deste módulo.

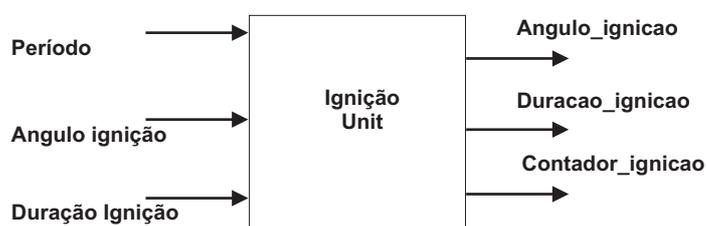


Figura 3.24: Módulo de ignição

```
#ifndef IGNICAO_UNIT_H
#define IGNICAO_UNIT_H

typedef struct {
    unsigned int    Periodo;           \\ Período de
                                           \\ revolução do motor
    unsigned int    AnguloIgnicao;     \\ Fração
                                           \\ resultante do ângulo

    unsigned int    fContadorIgnicao;
    unsigned int    iContadorIgnicao;
    unsigned int    ContadorIgnicao;
    unsigned int    ContadorIgnicaoAux;
    unsigned int    TempoIgnicao;
    unsigned int    InstanteIgnicao;
    int             IgnicaoOk;
    int             Automatico;
    unsigned int    TempoIgnicaoAux;
    unsigned int    IncrementoAngulo;
    int             IncrementoNegativo;
    void (*UpDate)(void * );
    void (*Calcula)(void * );
} IGNICAO;
```

```

#define IGNICAO_DEFAULTS {0,10,0,0,1,0,0,0,0,1,0,0,0,
(void (*)(void * ))IgnicaoUpDate,(void (*)(void * ))IgnicaoCalc }

void IgnicaoUpDate(IGNICAO* );
void IgnicaoCalc(IGNICAO* );

#include <ignicao_unit.h>

IGNICAO    Ignicao14    = IGNICAO_DEFAULTS; \\ Inicializa Ignição
                                                \\ bobinas 1 e 4
IGNICAO    Ignicao23    = IGNICAO_DEFAULTS; \\ Inicializa Ignição
                                                \\ bobinas 2 e 3

void interrupt c_int04()
{
    .
    .
    .
    Ignicao14.Periodo = Capture.Periodo3>>2; /*Salva periodo para cada
    pwm*/ Ignicao23.Periodo = Capture.Periodo3>>2;
    .
    .
    .
    PtrIgnicao14->IncrementoAngulo =(int)PtrSerial->PalavraRecebida[0];
    PtrIgnicao23->IncrementoAngulo =(int)PtrSerial->PalavraRecebida[0];
    PtrIgnicao14->IncrementoNegativo = PtrSerial->PalavraRecebida[2];
    .
    .
    .
    Ignicao14.ContadorIgnicaoAux = 20480-tabela.saida; /*20480 120°/6*/
    Ignicao23.ContadorIgnicaoAux = 51200-tabela.saida; /*51200 300°/6*/
    if (Ignicao14.IncrementoNegativo == 1)
    {
        Ignicao14.ContadorIgnicaoAux = Ignicao14.ContadorIgnicaoAux + Ignicao14.IncrementoAngulo;
        Ignicao23.ContadorIgnicaoAux = Ignicao23.ContadorIgnicaoAux + Ignicao23.IncrementoAngulo;
    }
    if (Ignicao14.IncrementoNegativo == 0)
    {
        Ignicao14.ContadorIgnicaoAux = Ignicao14.ContadorIgnicaoAux - Ignicao14.IncrementoAngulo;
        Ignicao23.ContadorIgnicaoAux = Ignicao23.ContadorIgnicaoAux - Ignicao23.IncrementoAngulo;
    }

    Ignicao14.Calcula(&Ignicao14);

```

```
Ignicao23.Calcula(&Ignicao23);
#endif /* IGNICAO_UNIT_H */
```

3.3.3 Módulo de Injeção

De forma análoga à ignição, o instante em que deve ser iniciada a injeção também é calculado transformando o ângulo em graus em números de pulsos. Além disto, a fase de injeção é referente ao fim do pulso de comando de injeção, sendo o início do pulso determinado de acordo com o tempo de duração da injeção.

O tempo de duração do pulso é referente ao tempo em que a válvula solenoide de injeção fica aberta. Através do ajuste deste tempo pode-se enriquecer e empobrecer a mistura.

Assim como o módulo de ignição, o módulo de injeção recebe na entrada o período (proveniente do módulo de processamento do sinal de rotação), a duração do pulso de comando (proveniente do mapa de injeção) e a fase de injeção configurada pelo operador através da interface homem máquina. Estes parâmetros representam as entradas do módulo Drive PWM.

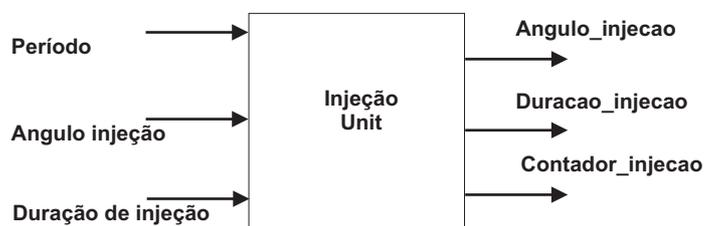


Figura 3.25: Módulo de injeção

```

#ifndef INJECAO_UNIT_H
#define INJECAO_UNIT_H

typedef struct {
    unsigned int    Periodo;          \\ Período de 1 volta
                                       \\ do virabrequim
    unsigned int    AnguloInjecao;    \\ fração do
                                       \\ fase de injeção
    unsigned int    ContadorInjecao;  \\ Parte Inteira
                                       \\ da fase de injeção
    unsigned int    TempoInjecao;     \\ duração do pulso
    int             FlagInjecaoOk;    \\ constante
    int             Automatico;
    unsigned int    ContadorInjecaoAux;
    unsigned int    IncrementoTempo;

    unsigned int    fContadorInjecao;
    unsigned int    iContadorInjecao;
    unsigned int    InjecaoEnvia;
    unsigned int    InstanteInjecao;
    unsigned int    TempoInjecaoAux;

    void (*UpDate)(void * );
    void (*Calcula)(void * );
} INJECAO;

#define INJECAO_DEFAULTS { 0,20,0,0,1,0,0,0,1,0,0,0,128, (void
(*) (void * ))InjecaoUpDate, (void (*) (void * ))InjecaoCalc }

void InjecaoUpDate(INJECAO* ); \\ atualiza os valores
void InjecaoCalc(INJECAO* );  \\ Calcula Fase e duração do
                               \\ pulso de injeção

#endif /* INJECAO_UNIT_H */

    INJECAO    Injecao14    = INJECAO_DEFAULTS;
    INJECAO    Injecao23    = INJECAO_DEFAULTS;

void interrupt c_int04()
{
    .
    .
    .
    Injecao14.Periodo = Capture.Periodo3>>2;

```

```

Injecao23.Periodo = Capture.Periodo3>>2;
.
.
.
PtrInjecao14->IncrementoTempo = PtrSerial->PalavraRecebida[1];
PtrInjecao23->IncrementoTempo = PtrSerial->PalavraRecebida[1];
.
.
.
AuxiliarInjecao = tabela.saida * Injecao14.IncrementoTempo;
Injecao14.TempoInjecao = (AuxiliarInjecao)>>7;
Injecao23.TempoInjecao = Injecao14.TempoInjecao;

injecao14.Calcula(&Injecao14);
Injecao23.Calcula(&Injecao23);

```

3.3.4 Módulo Driver PWM

Este módulo utiliza contadores para que no instante preciso de tempo ele forneça o sinal PWM para o circuito de potência.

No sistema de ignição foi utilizado apenas um contador para gerar os sinais de ignição nos cilindros 1 e 4 e nos cilindros 2 e 3. Isto foi possível pois, mesmo com altas rotações, os pulsos de ignição dos cilindros não se sobrepõem. Assim, no instante calculado para que haja ignição nos cilindros 1 e 4, o módulo driver PWM recebe os valores de tempo e ângulo de ignição referentes a estes cilindros e fornece o sinal PWM para o sistema de potência de acordo com os parâmetros recebidos. Então, o contador pode ser novamente utilizado, porém, a unidade driver PWM irá receber os parâmetros de tempo e ângulo de ignição dos cilindros 2 e 3.

No sistema de injeção, devido ao fato do tempo de duração do pulso de

comando de injeção ser muito maior que o tempo de duração do pulso de ignição, não é possível utilizar apenas um contador. Quando o motor está em alta rotação (acima de 4500 rpm) e a plena carga, os sinais de comando para injeção nos cilindros 1 e 4 e nos cilindros 2 e 3 se sobrepõem. Assim, é necessário utilizar um contador para cada banco. No instante de tempo calculado para injeção nos cilindros 1 e 4, a unidade Driver PWM recebe os parâmetros de ângulo e tempo de injeção referentes a estes cilindros. Assim, um primeiro contador é disparado para formar o sinal PWM referente a estes parâmetros. No instante de tempo calculado para injeção nos cilindros 2 e 3, um segundo contador é disparado para gerar um segundo sinal PWM, independente do primeiro.

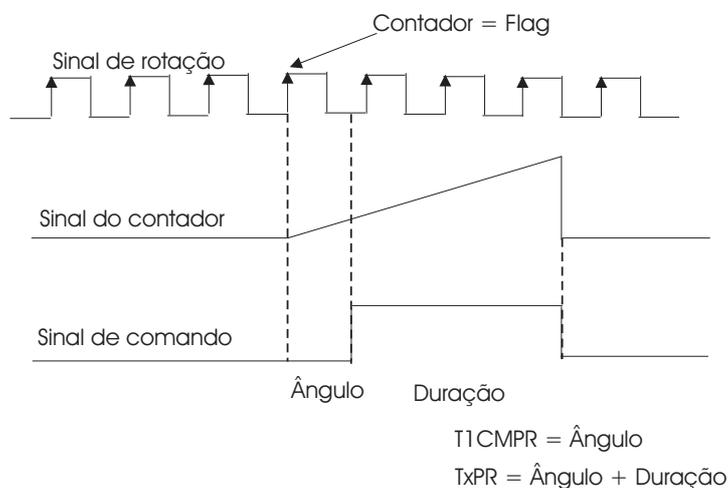


Figura 3.26: Sinal gerado pelo módulo PWM

As variáveis de entrada do módulo PWM, mostrado na figura 3.27 são provenientes das saídas dos módulos de ignição e injeção e da unidade de

processamento do sinal de rotação (Capture Unit). Na figura 3.26 pode ser visto como é formado o sinal de comando para ignição ou injeção da mistura ar-combustível. Quando o número de pulsos enviado pelo módulo de processamento de rotação for igual ao número de pulsos para ignitar e/ou injetar a mistura ar-combustível, é disparado um contador para formar o sinal de comando. Assim, a fração resultante da operação de divisão do ângulo desejado por 6(Ângulo referente por cada pulso) que havia sido armazenado na variável ângulo, será usado para determinar o instante exato de início do pulso de comando. A duração determina o final do pulso de comando. Este é referente ao tempo de permanência no caso da ignição ou o tempo em que os bicos injetores ficarão abertos na injeção de combustível.

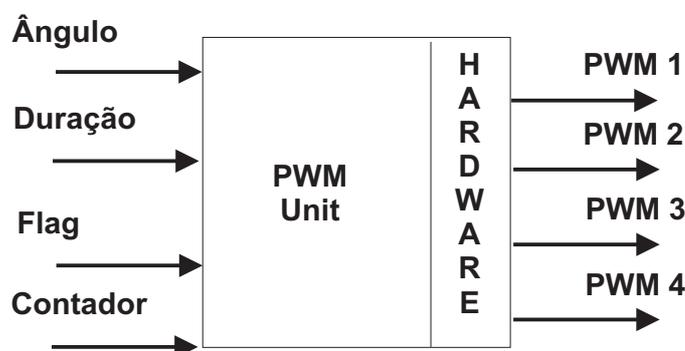


Figura 3.27: Módulo PWM

```
#ifndef DRV_PWM_UNIT_H #define DRV_PWM_UNIT_H

typedef struct {
    unsigned long int    InstanteAtuacaoInj14;
    unsigned long int    InstanteAtuacaoInj23;
    unsigned long int    TempoDuracaoInj14;
    unsigned long int    TempoDuracaoInj23;
    unsigned long int    InstanteAtuacaoIgn;
```

```

        unsigned long int    TempoDuracaoIgn;
        int                  FlagDefinePwm1;
        int                  FlagDefinePwmInj14;
        int                  FlagDefinePwmInj23;
        void (*Init)(void);
        void (*UpDate)(void *);
    } DRVPWM;

#define DRVPWM_DEFAULTS { 0,0,0,0,0,0,0,0,0,(void
(*) (void))DrvPWMInit,(void (*)(void *))DrvPWMUpDate }

void DrvPWMInit();
void DrvPWMUpDate(DRVPWM *);

#define NENHUMPWM    0
#define IGNICAO14_OK 1
#define IGNICAO23_OK 2
#define INJECao14_OK 3
#define INJECao23_OK 4

#endif /* DRV_PWM_UNIT_H */

#include <DrvPWM_unit.h>

DRVPWM    DrvPwm    = DRVPWM_DEFAULTS;

void main()
{

    DrvPwm.Init(); /*Configura Registros dos PWMs utilizados na injecao e ignicao*/

}

void interrupt c_int04()
{

    ComparaContador(&Capture, &Ignicao14, &Ignicao23,
                    &Injecao14, &Injecao23, &DrvPwm); /* Compara valores dos contadores */
    DrvPwm.UpDate(&DrvPwm);

}

void ComparaContador(CAPUNIT *ptrCap, IGNICAO *ptrIgn14, IGNICAO

```

```

*ptrIgn23, INJECAO *ptrInj14, INJECAO *ptrInj23, DRVPWM
*ptrDRVPWM)
{
    if (ptrCap->Contador == ptrInj14->iContadorInjecao)
    {
        ptrDRVPWM->FlagDefinePwmInj14 = INJECAO14_OK;
        ptrDRVPWM->InstanteAtuacaoInj14 = ptrInj14->InstanteInjecao;
        ptrDRVPWM->TempoDuracaoInj14    = ptrInj14->TempoInjecaoAux;
    }

    if (ptrCap->Contador == ptrInj23->iContadorInjecao)
    {
        ptrDRVPWM->FlagDefinePwmInj23 = INJECAO23_OK;
        ptrDRVPWM->InstanteAtuacaoInj23 = ptrInj23->InstanteInjecao;
        ptrDRVPWM->TempoDuracaoInj23    = ptrInj23->TempoInjecaoAux;
    }

    if (ptrCap->Contador == ptrIgn14->iContadorIgnicao)
    {
        ptrDRVPWM->FlagDefinePwm1      = IGNICA014_OK;
        ptrDRVPWM->InstanteAtuacaoIgn   = ptrIgn14->InstanteIgnicao;
        ptrDRVPWM->TempoDuracaoIgn      = ptrIgn14->TempoIgnicaoAux;
    }

    if (ptrCap->Contador == ptrIgn23->iContadorIgnicao)
    {
        ptrDRVPWM->FlagDefinePwm1      = IGNICA023_OK;
        ptrDRVPWM->InstanteAtuacaoIgn   = ptrIgn23->InstanteIgnicao;
        ptrDRVPWM->TempoDuracaoIgn      = ptrIgn23->TempoIgnicaoAux;
    }
}

```

3.3.5 Conversor analógico/Digital

O início da conversão analógico/Digital acontece a cada giro da roda fônica. Sendo assim, todas as vezes que é identificado a falha é solicitado a conversão do sinal analógico. As variáveis analógicas medidas são:

1. Sinal da pressão no coletor de admissão;

2. Sinal da tensão da Bateria;
3. Sinal da temperatura da água;
4. Sinal da temperatura do Ar de entrada;
5. Sinal da Sonda Lambda.

É neste módulo que cada sinal de entrada é interpretado transformando o valor do sinal de tensão em um valor físico. Cada sinal é tratado de acordo com sua natureza, como discutido no item 4.2.1.

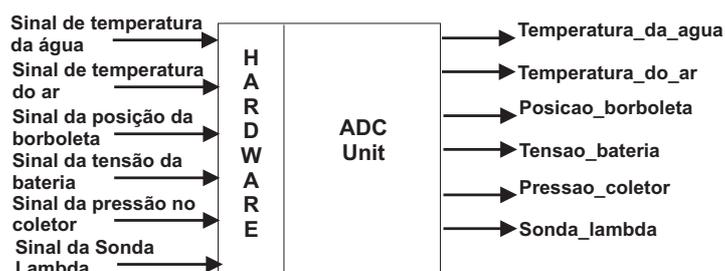


Figura 3.28: Módulo Conversor Analógico Digital

```
#ifndef __ADCING_H__
#define __ADCING_H__

typedef struct {
    unsigned int sonda_lambda;           /* Resultado da conversao 1*/
    unsigned int tensao_bateria;        /* Resultado da conversao 2*/
    unsigned int posicao_borboleta;      /* Resultado da conversao 3*/
    unsigned int pressao_ar;            /* Resultado da conversao 4*/
    unsigned int temperatura_ar;        /* Resultado da conversao 5*/
    unsigned int temperatura_agua;      /* Resultado da conversao 6*/
    void (*init)(void);                 /* Ponteiro para a função de inic.*/
    void (*update)(void);               /* Ponteiro para função de atualiz.*/
    void (*AtualizaResultados)(void *);
    void (*Calcula)(void *,void *,void *);
};
```

```

        } DRVADC;

#define DRVADC_DEFAULTS {0, 0, 0, 0, 0, 0,
(void (*)(void))adc_init, (void (*)(void))adc_update,
(void (*)(void *))(adc_AtualizaResultados,
(void (*)(void *,void *,void *))(adc_Calcula }

void adc_init(void);
void adc_update(void);
void adc_AtualizaResultados(DRVADC *);
void adc_Calcula(DRVADC *,TABELA *,VARIABLES *);

#endif /*__ADCING_H__ */

#include <adcing.h>

    SERIAL    Serial = SERIAL_DEFAULTS;
void main() {

    ADC.init();    /*Configura Registros do Conversor A/D*/
}

void interrupt c_int04()
{

    ADCTRL2 = (ADCTRL2|0x6000) ;

}

/** INTERRUPCAO ADC **/
void interrupt c_int01()
{
    ADC.AtualizaResultados( &ADC);
    ADC.Calcula( &ADC, &tabela, &variaveis);
}

```

3.3.6 Comunicação Serial

A comunicação serial foi desenvolvida para que o DSP comunique com o PC onde foi implementado a Interface Homem Máquina. Como procedi-

mento, adotou-se que o computador sempre iria iniciar a comunicação. Neste primeiro momento, o computador prepara o DSP para realizar uma das seguintes funções:

- Enviar dados dos sensores analógicos, sensor de rotação; tempo de injeção e ângulo de ignição;
- Receber dados de tempo de permanência de ignição, ângulo de avanço de ignição; tempo de injeção, fase de injeção;
- Receber ajuste do mapa de ignição e injeção;
- Receber tabela de calibração da temperatura da água;
- Receber tabela de calibração da temperatura do ar;
- Receber dados de calibração dos sensores lineares.

Sempre que houver a necessidade de atualização dos dados, o computador irá requisitar uma destas opções.

Caso haja erro de comunicação, o pacote de dados com este erro será identificado e não utilizado, devendo reiniciar a comunicação.

3.3.7 Mapa de Injeção e Ignição

Estes mapas são utilizados para que, independentemente das condições de operação, a mistura ar-combustível tenha a razão próxima da estequiométrica e o ângulo de ignição seja o ideal (Aqui adotado próximo do limite

de detonação). Estes mapas consistem de uma tabela onde, através de uma interpolação de pontos, é possível mapear toda a faixa de rotação do motor. A tabela 3.3 apresenta o mapa usado para o avanço de ignição.

Assim como no avanço de ignição, o tempo de injeção também foi mapeado. Foi usado como critério o maior torque para elaboração do mapa.

3.3.8 Interpolação de Tabelas

O programa implementado no DSP possui as seguintes tabelas:

- Temperatura da água;
- Temperatura do ar de entrada;
- Mapa de avanço de ignição;
- Mapa de tempo de injeção.

Os pontos intermediários aos pontos inseridos nas tabelas devem ser interpolados para melhorar a precisão dos cálculos. Para isto, foi escrita uma rotina em assembly para fazer a interpolação linear usando look-up-table.

A figura 3.29 mostra o princípio geral da interpolação linear e a fórmula implementada na subrotina é apresentada na equação 3.29.

Rotação (RPM)	Angulo de Avanço (°)
0	0
256	0
512	5
768	9
1024	12
1280	15,3
1536	24
1792	27,1
2048	29
2304	31
2560	31
2816	30,2
3072	31,6
3328	35,6
3584	41
3840	45
4096	46,5
4352	43,6
4608	44,7
4864	42,9
5120	44,1
5376	43
5632	40
5888	37
6144	39
6400	39
6656	40

Tabela 3.3: Mapa de Avanço de ignição

Rotação (RPM)	Tempo de Injeção (°)
0	0
256	3,8
512	3,8
768	2,5
1024	1,4
1280	1,4
1536	4,8
1792	4,8
2048	4,8
2304	5,0
2560	5,2
2816	5,5
3072	5,6
3328	5,6
3584	5,6
3840	5,6
4096	5,6
4352	5,6
4608	5,6
4864	5,6
5120	5,8
5376	5,8
5632	5,9
5888	6,1
6144	6,0
6400	5,8
6656	5,7

Tabela 3.4: Mapa de Tempo de injeção

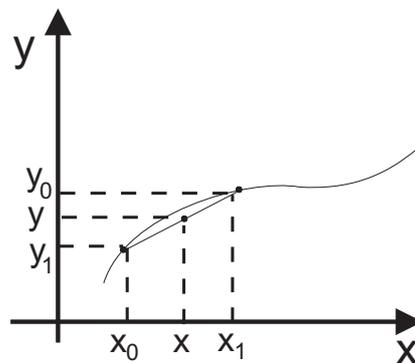


Figura 3.29: Exemplo de interpolação

$$Y = Y_1 + \frac{(X - X_1)}{Y_2 - Y_1} X_2 - X_1 \quad (3.5)$$

Onde:

- x : Primeira variável da tabela;
- y : Segunda variável da tabela.

3.4 Interface Homem-Máquina

A interface homem máquina (IHM) foi desenvolvida em um PC escrita em programação orientada em objetos utilizando a plataforma Delphi. Houve uma preocupação de ser um programa com uma interface bastante amigável de forma que o operador não tenha dificuldades de trabalhar com ele.

Esta interface possibilita ao operador:

- monitorar em tempo real todas as variáveis tais como: a posição da

borboleta, temperatura do ar de entrada, temperatura da água, tensão da bateria, pressão no coletor, sonda lambda, tempo de injeção e ângulo de ignição.

- Informar ao sistema em tempo real os ângulos e tempos de injeção e ignição nos quatro cilindros.
- Informar ao sistema dados de calibração dos sensores de temperatura, pressão, tensão na bateria, posição da borboleta.

A figura 3.30 mostra o painel de controle da interface homem máquina. Este painel pode ser dividido em três partes: Ajuste dos parâmetros iniciais, Ajuste do mapa de ignição e injeção e monitoramento das variáveis analógicas.

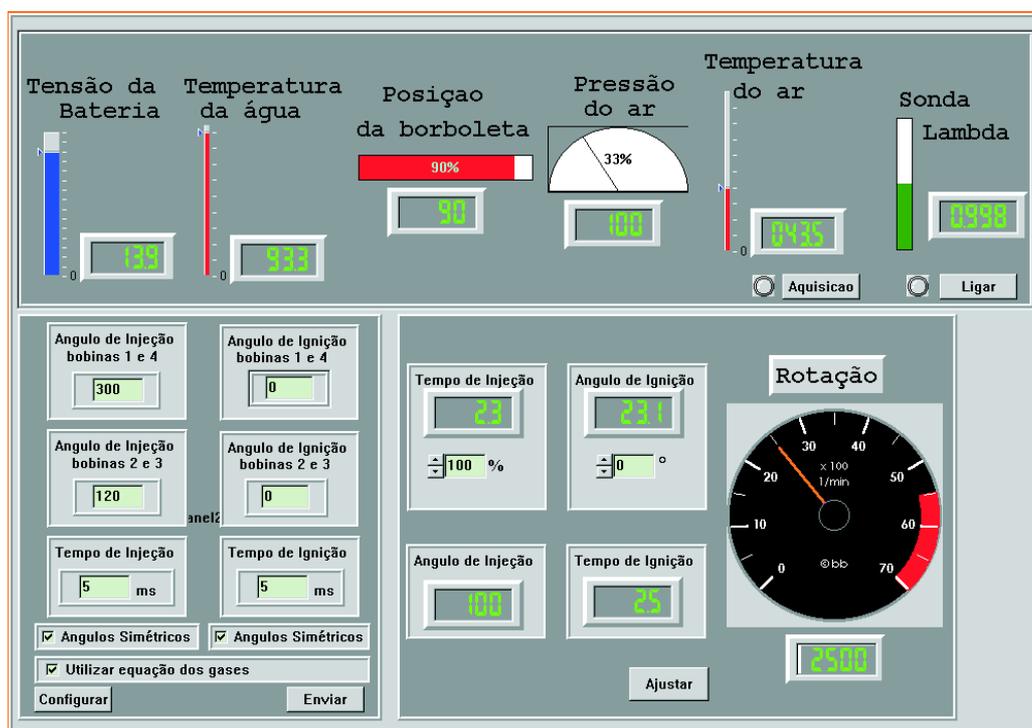


Figura 3.30: Painel de controle

A figura 3.31 mostra a parte do painel onde o operador poderá monitorar todos os sinais analógicos transmitidos pelos diversos sensores instalados no motor. O botão iniciar deverá ser acionado quando o operador desejar iniciar o monitoramento das variáveis. Se for necessário salvar em um arquivo do tipo texto, basta somente clicar sobre o botão aquisição e uma tela de diálogo padrão irá aparecer na tela para que o usuário defina o nome do arquivo e diretório apropriado.

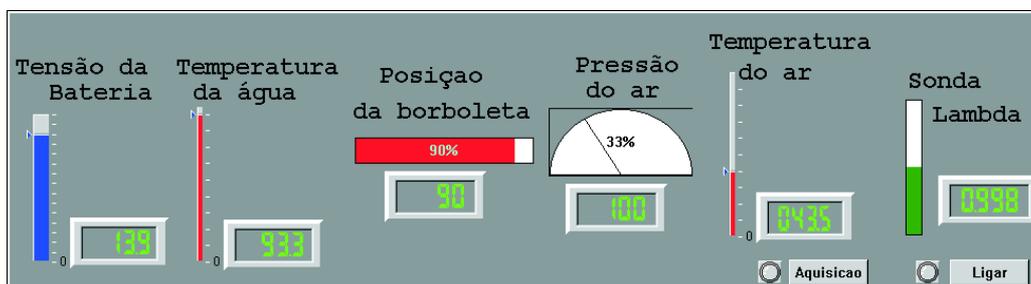


Figura 3.31: Sinais analógicos

A figura 3.32 mostra a parte do painel onde o operador pode parametrizar alguns valores iniciais tais como ângulo de avanço de ignição, fase de injeção, tempo de permanência de ignição e tempo de injeção. Isto é feito digitando o valor desejado e enviando para o DSP. Os valores estão defasados de 180 graus, mantendo a simetria no disparo da ignição e na injeção. Porém pode-se não utilizar desta simetria, bastando apenas desmarcar a opção ângulos simétricos.

Nesta tela tem-se a opção também para que o tempo de injeção seja calculado através da equação dos gases. Para isso pode-se configurar os parâmetros desta equação.

The image shows a software interface for adjusting engine parameters. It consists of a grid of input fields and checkboxes. The parameters are:

- Angulo de Injeção bobinas 1 e 4: 300
- Angulo de Ignição bobinas 1 e 4: 0
- Angulo de Injeção bobinas 2 e 3: 120
- Angulo de Ignição bobinas 2 e 3: 0
- Tempo de Injeção: 5 ms
- Tempo de Ignição: 5 ms

At the bottom, there are three checked checkboxes: "Angulos Simétricos" (twice) and "Utilizar equação dos gases". Below these are two buttons: "Configurar" and "Enviar".

Figura 3.32: Painel de ajustes iniciais

No painel mostrado na figura 3.33 é possível ajustar o mapa de ignição e injeção. No caso da ignição, é informado para o sistema o valor em graus que deve ser acrescentado ou decrementado do mapa de ignição. Para o sistema de injeção, o operador pode ajustar o tempo de abertura do bico injetor através de uma porcentagem do valor pré-estabelecido no mapa. Assim, o operador pode ajustar os melhores valores para diversas condições de operação. Nesta tela é monitorada a rotação do motor, o ângulo de avanço e o tempo de injeção.

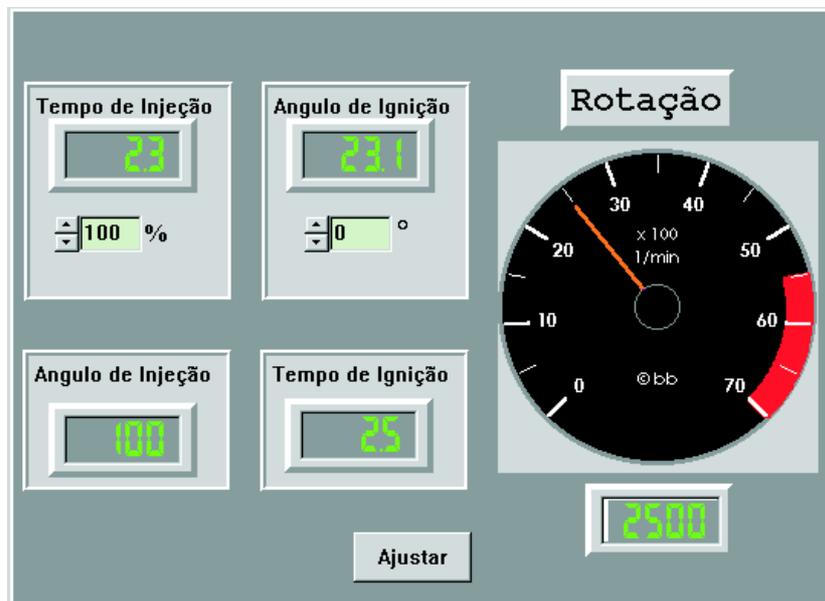


Figura 3.33: Ajuste do mapa de ignição e injeção

As curvas de calibração dos sensores de temperatura da água e do ar de entrada podem ser enviados para o DSP através da tela mostrada na figura 3.34. Na tela pode-se preencher a tabela de acordo com a calibração do sensor. Estes dados são salvos no computador e enviados para serem utilizados. Assim, quando houver a necessidade de alteração dos dados de calibração, o operador pode fazê-lo facilmente.

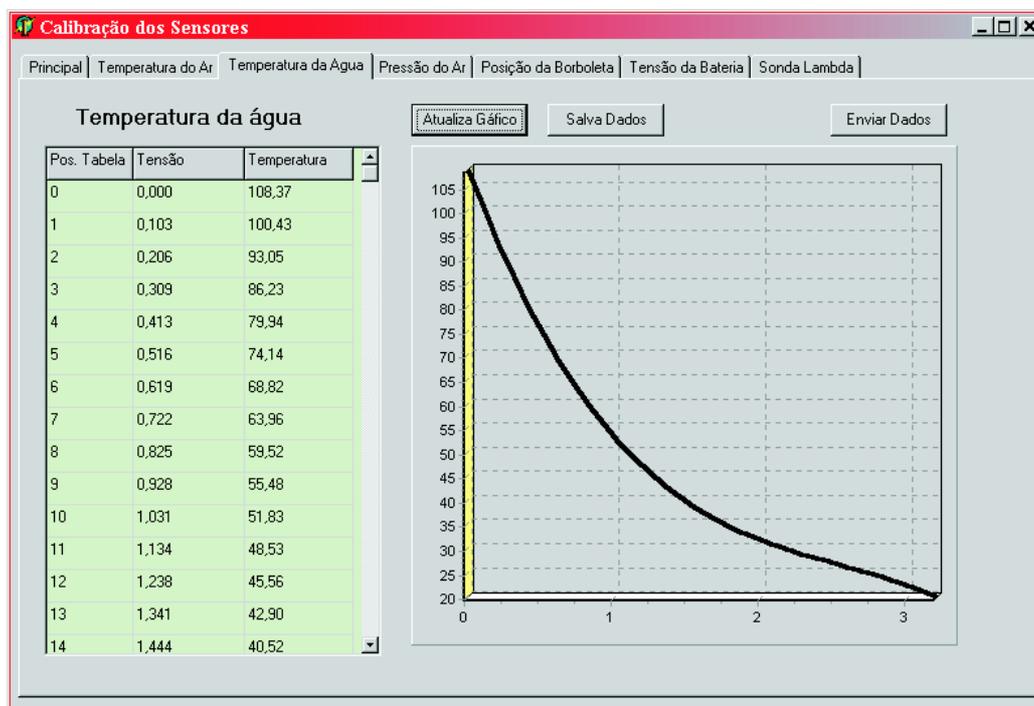


Figura 3.34: Tela de calibração da temperatura Água

Assim como o sinal temperatura que possui uma resposta não linear, pode-se também fornecer uma curva de calibração dos demais sensores que possuem uma resposta linear. Como exemplo é mostrado na figura 3.35 a tela de calibração de pressão. Neste caso é fornecido apenas os valores do coeficiente angular e do coeficiente linear da equação do primeiro grau. O gráfico mostra a curva de calibração do sensor definido na equação.

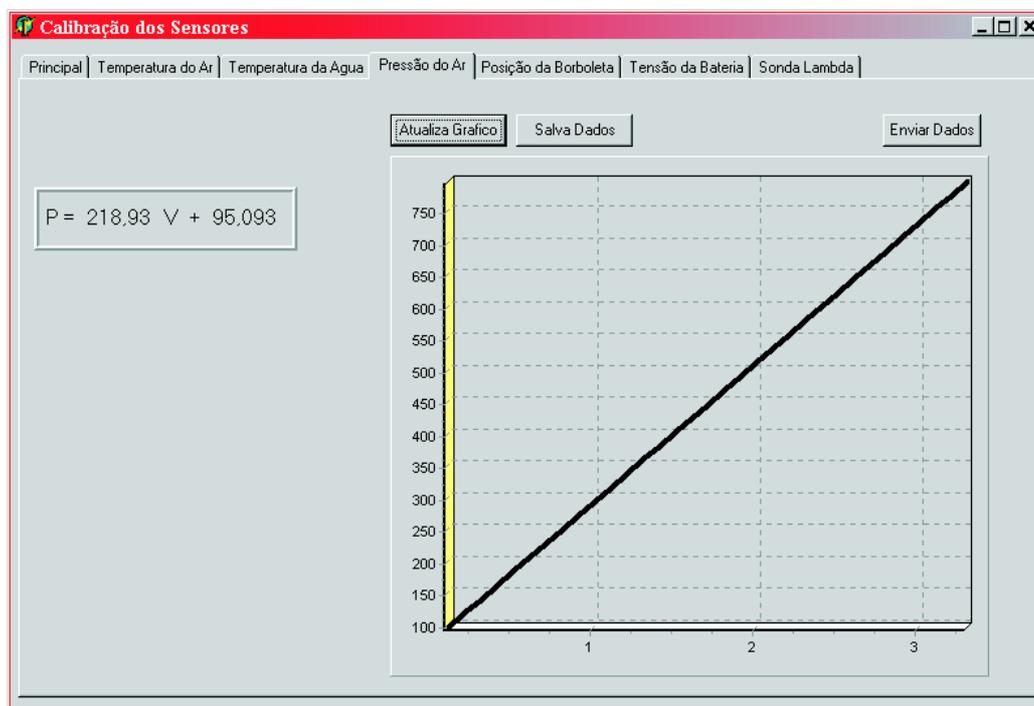


Figura 3.35: Tela de calibração da pressão no tubo de admissão

3.5 Conclusão

Neste capítulo foram apresentados os circuitos desenvolvidos para os condicionadores de sinais dos sensores analógicos de forma a obter os valores de temperatura da água, temperatura do ar de entrada, pressão no coletor, tensão da bateria e sonda lambda. Todos estes valores podem ser mostrados em uma interface homem máquina também desenvolvida neste trabalho.

A interface homem máquina desenvolvida permite que o operador possa monitorar as variáveis analógicas do sistema. Além disto, permite o controle e monitoramento do tempo de abertura dos bicos injetores, tempo de per-

manência da bobina de ignição, ângulo de ignição e fase de injeção. Pode ser feito também, em tempo real, a atualização dos parâmetros de calibração dos diversos sensores.

Foram desenvolvidos drives de ignição e injeção para fornecer potência para os atuadores. Estes drives são responsáveis pela interface entre o microprocessador (DSP) e os atuadores instalados no motor. Foram realizados testes e os sinais obtidos experimentalmente, se apresentaram muito próximos dos sinais previstos.

A central desenvolvida possui um mapa de avanço de ignição e tempo de injeção o que possibilita o controle do motor. Estes possibilitam que o motor funcione de forma adequada para diversas condições de operação.

O sistema aqui apresentado mostrou-se confiável para controlar um motor de combustão interna. Assim, foi possível levar o motor a um dinamômetro para que ensaios pudessem ser realizados.

Capítulo 4

Resultados de ensaios em dinamômetro

Para a realização dos testes comparativos do sistema proposto, foram realizados ensaios dinamométricos segundo a Norma Brasileira NBR ISO 1585 - Veículos Rodoviários - Código de ensaios de motores - Potência líquida efetiva, que especifica as condições de ensaio de motores projetados para veículos rodoviários, as correções nas medidas e as formas de apresentação das curvas de potência e de consumo específico de combustível à plena carga em função da rotação do motor [15]. As correções no torque e na potência observados, previstas pela NBR ISO 1585, foram aplicados a todos os dados obtidos. Os fatores de correção foram calculados nas condições ambientais medidas durante cada teste. A pressão seca foi calculada conforme expressão da NBR 5484, usando as temperaturas de bulbo úmido e bulbo seco medidas

[14].

Durante esses ensaios, um motor foi colocado na condição de plena carga em uma bancada dinamométrica e medido o valor do Torque. Este valor foi observado na faixa de rotação de 1500 a 6500 RPM, com incremento de 250 RPM.

O dinamômetro hidráulico utilizado é o modelo D210-1e fabricado pela SCHENCK. Os dados foram adquiridos através das saídas analógicas dos mostradores de rotação e torque. O sistema de aquisição era constituído por uma placa conversora A/D de 16 bits e um computador compatível com o IBM-PC Pentium III. O programa de aquisição foi escrito em PC-Assembler e Delphi 5.0. A frequência de aquisição usada foi de 2.5 Hz [1].

Os primeiros ensaios foram realizados com o sistema de Ignição e injeção de combustível originais, modelo IAW 1G7, fabricado pela Magneti Marelli. Todos os sensores e atuadores, bem como as calibrações originais de avanço e tempo de injeção foram mantidos. Concluídos os testes com o sistema IAW 1G7, foi retirado o sistema da Magneti Marelli e em seu lugar foi colocado o sistema desenvolvido neste trabalho. Assim todos os sensores e atuadores foram ligados a central aberta.

Foram realizados, após a troca das centrais, novos ensaios dinamométricos à plena carga com o sistema aberto variando-se os valores de ignição e injeção em cada ponto de operação do motor.

O critério utilizado para a otimização do motor foi o de máximo torque

observado (MBT) sem a ocorrência do fenômeno da detonação. Assim foram feitos ajustes de tempo de injeção e ângulo de ignição para que este ponto ótimo pudesse ser obtido.

A detecção da detonação foi realizada através do método auditivo, utilizando-se um acelerômetro piezo-elétrico fixado ao bloco do motor.

O critério utilizado como avanço máximo foi ponto de início da detonação (LDI). Pelo fato do avanço influenciar diretamente a temperatura do catalisador, a cada regime de rotação a mesma foi observada, sempre respeitando o valor máximo de 750 °C, recomendado pelo fabricante do motor em teste.

Teve-se também a preocupação de manter o sinal da sonda lambda próxima do valor estequiométrico. Para isso além de variar os valores de ignição, variou-se também o tempo de duração de injeção.

A Figura 4.1 apresenta um gráfico comparativo do Torque Corrigido segundo NBR ISO 1585, obtido com o sistema original em operação (Padrão) e com o sistema em desenvolvimento utilizando um micro-processador DSP (Otimizado). De acordo com o gráfico apresentado na Figura 4.1, pode ser observado uma tendência de aumento do Torque Corrigido em toda a curva. Os valores mais expressivos foram obtidos na região de 1500 a 3500 RPM (12% de aumento) e na região de 5000 a 6500 RPM (10% de aumento).

Esse aumento se deve ao fato de que, em ambas as faixas de rotação citadas, foi possível alterar o tempo de injeção e os ângulos de avanço até a ocorrência da detonação. De forma similar à curva de Torque, a Figura 5

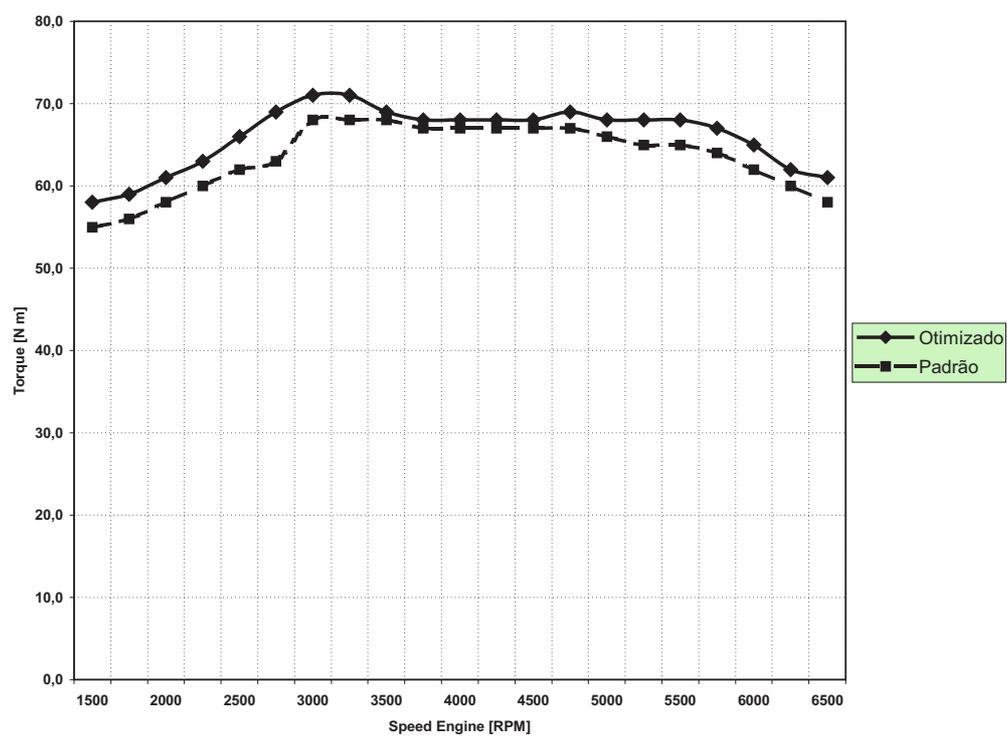


Figura 4.1: Curva do torque em função da rotação

apresenta um gráfico comparativo da Potência Corrigida, segundo NBR ISO 1585, com o sistema de ignição original (Padrão) e o sistema em desenvolvimento utilizando um DSP (Otimizado).

O aumento do Torque constatado durante o ensaio reflete diretamente no aumento da Potência Corrigida, mostrado no gráfico da Figura 4.2. Observa-se a mesma tendência de aumento na Potência desenvolvida pelo motor em teste, onde os valores mais expressivos foram obtidos também nas regiões de 1500 a 3500 RPM (8% de aumento) e na região de 5000 a 6500 RPM (4% de aumento)

Através resultados obtidos e apresentados nos gráficos é possível concluir que a central desenvolvida é capaz de reproduzir a curva de potência e torque com relação a central original do motor. Além da reprodução da curva, houve também um aumento de potência e torque em algumas regiões da mesma. Porém, para estes ensaios não foram levados consideração os gases emitidos e possíveis erros do sistema de medição. Os critérios utilizados para otimização da curva foram:

- Manter a razão entre mistura ar-combustível próximo do valor estequiométrico;
- Trabalhar com o ângulo de avanço próximo da região de detonação.

Os resultados obtidos, como visto, foram satisfatórios e motivam a dar continuidade a pesquisa nesta área. Como uma próxima etapa para testes em banco dinamométrico estão previstos ensaios para controlar as emissões

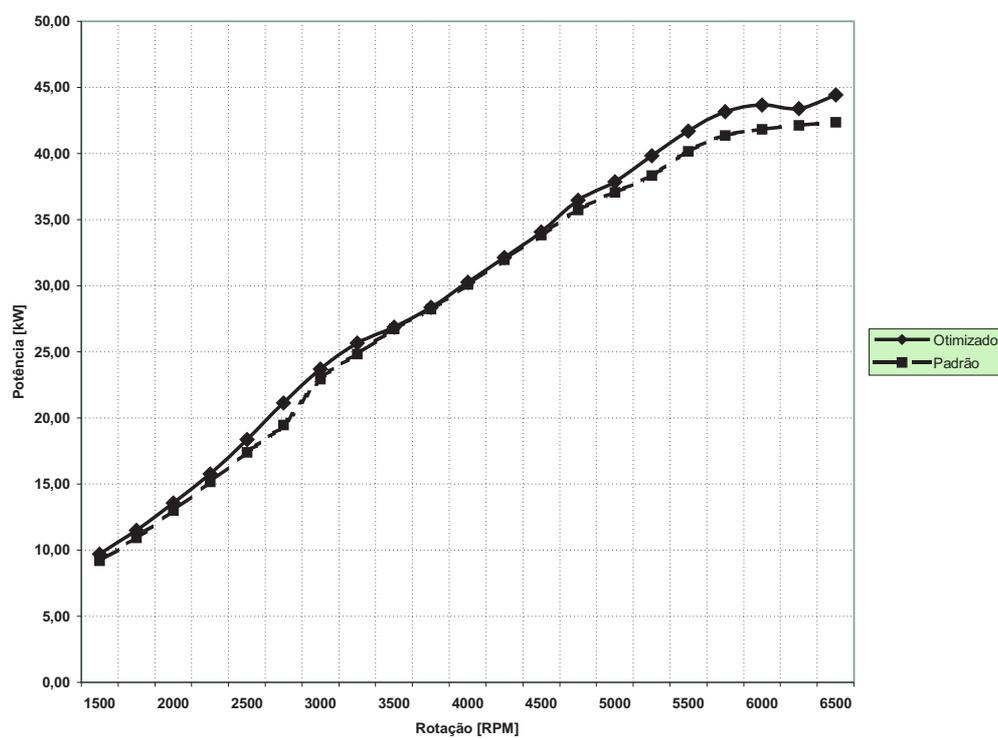


Figura 4.2: Curva de Potência em função da rotação

dos gases.

Capítulo 5

Conclusão

Este trabalho apresentou um sistema de controle de injeção e ignição de combustível de motores de combustão interna. Este sistema foi desenvolvido utilizando o microprocessador da Texas Instrument DSP2407, um PC para interface homem máquina e sensores e atuadores presentes no motor.

Foram desenvolvidos condicionadores de sinais para os sensores analógicos de forma a obter os valores de temperatura da água, temperatura do ar de entrada, pressão no coletor, tensão da bateria, sonda lambda. Estes foram mostrados em uma interface homem máquina também desenvolvida neste trabalho.

A interface homem máquina desenvolvida permite que o operador possa monitorar as variáveis analógicas do sistema. Além disto, permite o controle e monitoramento do tempo de abertura dos bicos injetores, tempo de permanência, ângulo de ignição e fase de injeção.

Foram desenvolvidos drives de ignição e injeção para fornecer potência para os atuadores. Em testes realizados observou-se que o sistema apresentou-

se confiável no controle de motores de combustão interna.

Os resultados obtidos com a implementação do sistema de injeção e ignição de combustível foram satisfatórios. O sistema foi capaz de controlar um motor de combustão interna de forma eficiente.

Os ensaios desenvolvidos em bancada dinamométrica permitem concluir que o sistema de controle de avanço de ignição e tempo de injeção implementado possibilita que motores em desenvolvimento sejam otimizados de forma a se atingir os parâmetros ideais de operação em cada regime de operação e carga.

Os mapas de avanço de ignição e de tempo de injeção obtidos podem ser aplicados em um endereço de memória previamente estabelecidos, de forma que o sistema pode adotar a nova calibração obtida e, a partir dela, controlar o motor dentro dos pontos estabelecidos.

Toda a faixa de rotação do motor citada neste trabalho foi otimizada. Houve porém somente ganhos nas curvas de Torque e de Potência corrigida em duas faixas específicas de rotação (de 1500 a 3500 RPM e de 5000 a 6500 RPM). Durante a realização dos testes pode-se perceber que na faixa de 3500 a 4500 RPM o aumento do ângulo inicial de ignição não causou modificações consideráveis no Torque e na Potência do motor, sendo então mantido o maior valor obtido sem ser atingida a condição de LDI. Esse fato pode ser associado a uma característica física do motor que, apesar do aumento excessivo do ângulo de avanço de ignição, o fenômeno da pré-ignição e da detonação não

ocorrem.

No que diz respeito à operacionalidade do sistema, pode-se concluir que os testes iniciais apresentaram resultados satisfatórios, motivando a continuidade dos estudos. Em uma próxima etapa serão realizados os ensaios de emissão de gases em bancada dinamométrica para verificar o desempenho do sistema em atender as legislações atuais que regulamentam essas questões.

Publicações

Como produto deste trabalho foi publicado um artigo na Society of Automotive Engineers - SAE um dos principais congressos da área automotiva, como apresentado abaixo;

- Society of Automotive Engineers - SAE ([4]).

Proposta de continuidade

Este trabalho apresentou-se satisfatório para o escopo proposto. Em vista dos bons resultados obtidos, seguem abaixo algumas sugestões de trabalhos que podem ser desenvolvidos:

- Fechamento da malha de controle através da sonda lambda;
- Controle de marcha lenta utilizando um motor de passo;
- Estudos qualitativos de combustíveis alternativos;
- Implementação de novas estratégias de controle de injeção e ignição;

- Estudo de emissões de poluentes para diversas situações de operação;
- Utilização deste protótipo como mais uma ferramenta para desenvolvimento de peças mecânicas que visam otimizar o funcionamento do motor de combustão interna.

Bibliografia

- [1] Valle R.M. Rodrigues-V.F Barros, J.E.M. Static and quasi-static test procedures of piston engines. *Society of Automotive Engineers - SAE*, (1), 2002.
- [2] G. T. Braga. *Desenvolvimento e Implementação de um Sistema de Identificação de Detonação em Motores de Combustão Interna de Ignição por Centelha*. Belo Horizonte, Brasil, 2004.
- [3] T. C. O. Carvalho, F. J. P. Pujatti, G. T. Braga, M. A. Severo Mendes, and R.M. Valle. Desenvolvimento de um central eletrônica para motores de combustão interna. *Seminário de Tecnologia de Motores, Combustíveis e Emissões*, 2004.
- [4] T. C. O. Carvalho, F. J. P. Pujatti, M. A. Severo Mendes, and R.M. Valle. Implementation and tests of a variable control system of spark time ignition, using digital signal processor - dsp. *Society of Automotive Engineers - SAE*, 2004.
- [5] Dipl.-Ing. Walter Gollin. Dipl.-Ing. Jürgen Gerhardt. *ME-Motronic engine management*. Robert Bosh GmbH, 1999.

- [6] Ernest O. DOEBELIN. *Measurement Systems: application and design*. 4th edition.
- [7] Richard E. Sonntag Gordon J. Van Wylen. *Fundamentos da Termodinâmica Clássica*. 1976.
- [8] Texas Instrument. *TMS320LF/LC240xA DSP Controllers System and Peripherals - Reference Guide -SPRU357B*. Texas Instrument, dezembro 2001.
- [9] Texas Instrument. *TMS320LF/LC240xA DSP Controllers CPU and Instruction Set - Reference Guide -SPRU160C*. Texas Instrument, junho 1999.
- [10] Texas Instrument. *Op Amps For Every One*. setembro 2001.
- [11] G. Felger K. D. Pohl. *Automotive Electric/Electronic System*. BOSCH, 1988.
- [12] G. Felger K. D. Pohl. *Gasoline-Engine Management*. BOSCH, 1988.
- [13] William B. Ribbens. *Understanding Automotive Electronics*. Howard W. Sams, 4th edition.
- [14] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. "motores alternativos de combustão interna de ignição por compressão (diesel) ou ignição por centelha (otto) de velocidade angular variável - ensaio - mé-

- todo de ensaio. Rio de Janeiro, Brasil, 1985. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 5484.
- [15] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Veículos rodoviários - código de ensaios de motores - potência líquida efetiva. Rio de Janeiro, Brasil, 1996. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR ISO 1585.
- [16] J. H. Visser and R. E. Soltis. Automotive exhaust gas sensing systems. *IEEE TRANSACTIONS ON INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT*, 50(6), 2001.