

**RAFAEL SANGOI PADILHA**

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE  
GERENCIAMENTO ELETRÔNICO E DE UM  
AMBIENTE DE AFERIÇÃO PARA MOTORES  
MONO CILÍNDRICOS DE PEQUENO PORTE**

**FLORIANÓPOLIS  
2007**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO  
EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE  
GERENCIAMENTO ELETRÔNICO E DE UM  
AMBIENTE DE AFERIÇÃO PARA MOTORES  
MONO CILÍNDRICOS DE PEQUENO PORTE**

Dissertação submetida à  
Universidade Federal de Santa Catarina  
como parte dos requisitos para a obtenção do grau de  
Mestre em Engenharia Elétrica.

**RAFAEL SANGOI PADILHA**

Florianópolis, Março de 2007.

# **DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE GERENCIAMENTO ELETRÔNICO E DE UM AMBIENTE DE AFERIÇÃO PARA MOTORES MONO CILÍNDRICOS DE PEQUENO PORTE**

Rafael Sangoi Padilha

‘Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica, Área de Concentração em *Automação e Sistemas / Controle*, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Catarina.’

---

Nestor Roqueiro, Doutor  
Orientador

---

Nelson Sadowski, Doutor  
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Banca Examinadora:

---

Nestor Roqueiro, Doutor  
Presidente

---

Rômulo da Silva Oliveira, Doutor

---

Lauro César Nicolazzi, Doutor

# DEDICATÓRIA

*Dedico este ao meu falecido avô Joaquim, pois o trabalho com motores era uma de suas paixões. Tenho certeza de que acompanhas o que faço onde estás, e trabalho com paixão para teres orgulho de teus descendentes como sempre tivestes.*

## AGRADECIMENTOS

Ao tentar enumerar todos aqueles que contribuíram para este trabalho corro o risco de ser injusto, pois a todos não poderei citar aqui. Começo agradecendo então a todos que contribuíram para o desenvolvimento desse trabalho, acreditando no projeto assim como eu acreditei, apesar de todas as dificuldades.

Em especial, não posso deixar de agradecer:

À Universidade Federal de Santa Catarina e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica por propiciarem a oportunidade de realização desse trabalho. À CAPES por prover a bolsa que financiou meus estudos durante os dois anos de trabalho.

À empresa TMT MOTOCO do Brasil, em cujas pessoas de Fernando Windlin e Clóvis Matsumoto agradeço a todos que contribuíram com o conhecimento e o material sobre o qual este trabalho foi realizado. Agradeço também pela recepção calorosa e pelas experiências compartilhadas, que me são de grande estima.

Ao orientador, Prof. Nestor, pela ajuda e envolvimento no projeto, desde o início até as revisões no texto, acreditando sempre no trabalho e em mim. Precisamos todos de alguém que acredite em nós, para acreditarmos em nós mesmos. Você acreditou.

Aos amigos, Prof. Lauro, Paulo, Cassiano, Bruno e Gabriel, sem os quais esse trabalho não teria sido realizado. Um sonho, sonhado sozinho, não passa de um sonho.... Quando sonhado por muitos, vira realidade. Estimo grandemente a amizade de vocês.

Aos meus pais, José Carlos e Marília, por mais razões do que consigo expressar com palavras. O exemplo de vocês é a força que me impulsiona e seus conselhos são a direção que me guia.

Aos meus irmãos Régis e Ricardo pela paciência, pelo apoio e pelas sugestões de correções para a melhoria da leitura desse trabalho. À minha cunhada querida, Luciana, pelo apoio essencial na fase final da escrita.

À minha avó Anair. Apesar dos momentos difíceis, ocupa um lugar especial em meu coração.

Ao Sr. Hugo, Sra. Izelit e Ana Paula, representando os demais membros da família que me acolheu de forma tão carinhosa, sempre acreditando e torcendo por mim.

À Renata, minha linda, doce e querida “menininha”. Pela amizade, paciência, carinho e, sobretudo, pela compreensão nos momentos difíceis.

Aos meus falecidos avós, Ramiro, Maria e Joaquim. Seja onde estiverem, sei que cuidam de nós.

Resumo da Dissertação apresentada à UFSC como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

## **DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE GERENCIAMENTO ELETRÔNICO E DE UM AMBIENTE DE AFERIÇÃO PARA MOTORES MONO CILÍNDRICOS DE PEQUENO PORTE**

**Rafael Sangoi Padilha**

Março/2007

Orientador: Nestor Roqueiro, Doutor.

Área de Concentração: Automação e Sistemas / Controle.

Palavras-chave: gerenciamento eletrônico de motores, sistema de aquisição de dados, identificação de sistemas, sensores por software.

Número de Páginas: 112.

O presente trabalho aborda o desenvolvimento e os testes de um protótipo de sistema de gerenciamento eletrônico e de um ambiente de calibração para motores mono-cilíndricos de pequeno porte (com potência nominal inferior a 20kW). O trabalho foi realizado visando a atender o requisito de redução dos custos associados à implantação de sistemas de gerenciamento para substituição dos carburadores em motores dessa classe. As soluções tecnológicas adotadas utilizam componentes de baixo custo e com pronta disponibilidade no mercado brasileiro. Foi desenvolvido o sistema de gerenciamento junto com as adaptações necessárias em um motor de teste, assim como o ambiente de para sua calibração. O ambiente é composto por uma bancada de testes e um sistema de aquisição de dados desenvolvido para a aplicação. Foram realizados ensaios para coleta de dados e avaliação do comportamento do motor e do sistema de gerenciamento. A partir desses dados, o comportamento do motor foi aproximado pela identificação de modelos lineares com estrutura fixa e valores de parâmetros variáveis do tipo *gain scheduling*. A modelagem de algumas variáveis do motor é suficientemente encorajadora para o uso de sensores por *software*, dispensando o uso de sensores reais e reduzindo o custo de implantação de tal sistema.

Abstract of Dissertation presented to UFSC as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master in Electrical Engineering.

## **DEVELOPMENT OF AN ELECTRONIC MANAGEMENT SYSTEM AND A TESTING ENVIRONMENT FOR SMALL DISPLACEMENT ONE-CYLINDER ENGINES**

**Rafael Sangoi Padilha**

March / 2007

Advisor: Nestor Roqueiro, Ph.D.

Area of Concentration: Automation and Systems / Control.

Keywords: engine electronic management, data acquisition, system identification, *soft* sensors.

Number of Pages: 112.

This work tackles the development and testing of an electronic management system prototype and a testing environment for small displacement one-cylinder engines (with power ratings of 20kW or less). The work has been carried observing the requirement for reducing costs associated to the implementation of electronic management systems in carburetors replacement for this class of engines. The technological solutions adopted use low cost components that are readily available in the Brazilian market. The electronic management system has been developed along with the necessary adaptations on a test engine, as well as the testing and calibration environment. The considered environment consists of a test bench and a data acquisition system developed specifically for this application. Tests were executed for data acquisition and behavioral evaluation of the engine and the management system. The collected data is used to obtain estimatives of the engine behavior through linear models with fixed structure and variable parameter values, as in *gain scheduling* systems. The modeling of certain aspects of the engine is encouraging enough to consider the use of *soft* sensors, dismissing the use of real sensors which will further reduce implementation costs of such management systems.

# SUMÁRIO

1.	Introdução.....	1
1.1.	Contextualização do problema.....	1
1.2.	Motivação e Objetivos.....	2
1.3.	Solução adotada.....	4
1.4.	Contribuições.....	5
1.5.	Organização do trabalho.....	5
2.	Fundamentos teóricos.....	7
2.1.	O motor de combustão interna.....	7
2.1.1.	Componentes do motor.....	7
2.1.2.	Funcionamento do motor.....	9
2.1.3.	O fenômeno da combustão interna.....	10
2.1.4.	Limitações mecânicas.....	14
2.2.	Visão geral do sistema de gerenciamento eletrônico.....	15
2.3.	Sensores para gerenciamento eletrônico.....	15
2.3.1.	Temperatura e pressão do ar do coletor de admissão.....	17
2.3.2.	Posição angular da borboleta do acelerador.....	17
2.3.3.	Posição angular do virabrequim.....	18
2.3.4.	Vazão mássica de ar na admissão.....	19
2.3.5.	Medição da relação ar-combustível.....	20
2.4.	Atuadores para gerenciamento eletrônico.....	22
2.4.1.	Ignição por faísca.....	22
2.4.2.	Alimentação de combustível.....	26
2.4.3.	Alimentação de ar.....	29
2.5.	Central de gerenciamento eletrônico.....	31
2.6.	Bancadas de testes.....	32
2.7.	Sistemas de aquisição de dados.....	34
3.	Modelos do Sistema.....	36
3.1.	Dinâmica do motor.....	38
3.1.1.	Coletor de admissão.....	40
3.1.2.	Motor e carga.....	41
3.2.	Dinâmica dos atuadores.....	42



3.2.1.	Injeção de combustível .....	42
3.2.2.	Entrada de ar .....	43
3.2.3.	Ignição por faísca.....	44
3.3.	Sistema de aquisição de dados .....	44
4.	O Ambiente desenvolvido .....	45
4.1.	Características originais do motor .....	45
4.2.	Alterações no motor .....	47
4.2.1.	Sistema de alimentação de ar e combustível .....	49
4.2.2.	Sistema de ignição por faísca .....	53
4.3.	Arquitetura da eletrônica embarcada.....	53
4.4.	Arquitetura do programa embarcado.....	55
4.4.1.	Visão geral do programa embarcado.....	55
4.4.2.	Protocolo de comunicação.....	58
4.4.3.	Representação dos dados.....	60
4.4.4.	Cálculo das ações de controle.....	64
4.4.5.	Modos de funcionamento da central.....	67
4.4.6.	Tratadores de interrupção .....	68
4.5.	Interface gráfica do usuário .....	72
4.6.	Bancada de testes.....	74
4.7.	Sistema de aquisição de dados .....	75
5.	Ensaio e Discussão.....	78
5.1.	Considerações sobre os ensaios e o sistema .....	79
5.2.	Considerações sobre a pressão de ar no coletor de admissão.....	79
5.3.	Modelagem do coletor de admissão .....	80
5.3.1.	Modelo para a pressão do ar do coletor.....	82
5.3.2.	Modelo para o valor de $\lambda$ no coletor.....	86
5.4.	Influência do valor de $\lambda$ no comportamento do motor .....	89
5.4.1.	Procedimento dos ensaios de $\lambda$ .....	89
5.4.2.	Discussão e análise dos ensaios de $\lambda$ .....	90
5.5.	Influência do ângulo de comando de ignição .....	91
5.5.1.	Procedimento dos ensaios de atraso de ignição.....	92
5.5.2.	Considerações sobre o comando de ignição.....	92
5.5.3.	Discussão e análise dos ensaios de atraso de ignição.....	95

5.6.	Influência da pressão do ar do coletor de admissão .....	99
5.6.1.	Procedimento dos ensaios de variação na pressão do ar no coletor de admissão	99
5.6.2.	Discussão e análise dos ensaios de pressão do ar no coletor de admissão	100
5.7.	Discussão sobre os resultados dos ensaios .....	106
6.	Conclusões e perspectivas .....	107
6.1.	Conclusões.....	107
6.2.	Perspectivas .....	109

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2-1: Vista em corte de um motor simplificado.....	8
Figura 2-2: Os quatro ciclos (tempos) do motor Otto. ....	9
Figura 2-3: Diagrama de pressão e volume do ciclo Otto teórico [12]. ....	11
Figura 2-4: Sinal do sensor de relutância variável [12].....	18
Figura 2-5: Sinais dos sensores de efeito <i>Hall</i> [12].....	19
Figura 2-6: Curvas características para sensores de concentração de oxigênio bipolares (EGO) e lineares (UEGO) [12].....	20
Figura 2-7: Diagrama simplificado de um sensor EGO. ....	22
Figura 2-8: Diagrama em corte de uma vela de ignição.....	23
Figura 2-9: Diagrama simplificado de um bico injetor. ....	27
Figura 2-10: Diagrama $P \times V$ para cargas plena e parcial. ....	29
Figura 3-1: Diagrama de blocos simplificado do ambiente de desenvolvimento.....	37
Figura 3-2: Diagrama de blocos proposto como modelo do motor e do coletor de admissão. ....	39
Figura 3-3: Diagrama de blocos do modelo do coletor de admissão.....	40
Figura 3-4: Diagrama de blocos do modelo para motor e carga. ....	42
Figura 4-1: Foto do motor original sem a proteção do volante de inércia.....	46
Figura 4-2: Diagrama de funcionamento do sistema de ignição original.....	47
Figura 4-3: motor e componentes do sistema de gerenciamento.....	48
Figura 4-4: montagem do sensor magnético do volante de inércia. ....	48
Figura 4-5: Curva de calibração do bico injetor. ....	50
Figura 4-6: Diagrama da arquitetura da eletrônica do sistema de gerenciamento.....	54
Figura 4-7: Fotografia da central de gerenciamento.....	54
Figura 4-8: Diagrama dos fluxos de execução do programa no micro controlador. ....	56
Figura 4-9: Fluxograma de execução de laço principal.....	57
Figura 4-10: Estrutura dos pacotes de comando.....	58
Figura 4-11: Estrutura do pacote de resposta. ....	59
Figura 4-12: Exemplo de mapa utilizado pela central de gerenciamento.....	61
Figura 4-13: Interpolação linear em duas dimensões. ....	61
Figura 4-14: Fluxograma de execução da função de cálculo do atraso de ignição. ....	65

Figura 4-15: Fluxograma da função de cálculo do período de comando para o bico injetor. ....	66
Figura 4-16: Seqüência temporal dos sinais na central de gerenciamento. ....	71
Figura 4-17: Interface do sistema de gerenciamento no computador. ....	73
Figura 4-18: Fotografia do motor e da bancada de testes. ....	75
Figura 4-19: Estrutura do quadro enviado pela placa de aquisição. ....	76
Figura 5-1: Diagrama de blocos proposto como modelo do motor e do coletor de admissão. ....	78
Figura 5-2: Forma do sinal de pressão do ar no coletor de admissão. ....	80
Figura 5-3: Estrutura do modelo proposto para o coletor de admissão. ....	81
Figura 5-4: Pressão de ar do coletor em função da velocidade angular do motor. ....	82
Figura 5-5: Correção da estimava da pressão do ar no coletor pela abertura da borboleta do acelerador. ....	83
Figura 5-6: Extrapolação do vetor de correção da estimativa de pressão de ar do coletor. ....	83
Figura 5-7: Superfície gerada pelo modelo de pressão do ar do coletor. ....	84
Figura 5-8: Avaliação da pressão do ar de coletor e seu erro de estimação para variações bruscas de acelerador. ....	85
Figura 5-9: Avaliação da pressão do ar do coletor e seu erro de estimação em regime permanente. ....	85
Figura 5-10: Característica de pressão do ar do coletor e período de injeção. ....	87
Figura 5-11: Mapa de período de injeção para $\lambda = 1$ . ....	87
Figura 5-12: Valores estimados de $\lambda$ pelo modelo e pelo sensor bipolar. ....	88
Figura 5-13: Ensaio de variação da relação ar-combustível. ....	90
Figura 5-14: Velocidade angular em função do valor de $\lambda_{estimado}$ . ....	90
Figura 5-15: Ensaio de variação no atraso do comando de ignição. ....	93
Figura 5-16: Velocidade angular em relação ao ângulo de comando da ignição. ....	94
Figura 5-17: Período de rotação em relação à espera para comando de ignição. ....	94
Figura 5-18: Velocidade angular do motor e do modelo identificado para variações no ângulo de comando de ignição. ....	97
Figura 5-19: Valores estimados de ângulo de comando de ignição para obtenção de maior velocidade angular. ....	98
Figura 5-20: Ensaio de variação de pressão do ar do coletor de admissão. ....	101

Figura 5-21: Comparação entre modelo e ensaio para variações na pressão do ar do coletor de admissão. ....	101
Figura 5-22: Superfície estimada para os valores de ganho. ....	104
Figura 5-23: Superfície estimada para os valores de constante de tempo. ....	104
Figura 5-24: Diagrama de blocos de comparação do modelo global para variação na pressão do ar do coletor de admissão com os dados dos ensaios. ....	105
Figura 5-25: Comparação entre modelos locais e modelo global proposto. ....	105

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1-1: Limites de emissão de poluentes para motocicletas [4]. .....	1
Tabela 4-1: Características do motor original. ....	45
Tabela 4-2: Relação das variáveis adquiridas para monitoramento. ....	76
Tabela 5-1: Relação dos ensaios para modelagem do coletor de admissão. ....	81
Tabela 5-2: Relação dos pontos de referência para dosagem correta do combustível. ....	81
Tabela 5-3: $\lambda_{estimado}$ em relação à velocidade angular do motor. ....	91
Tabela 5-4: Ensaios de variação no ângulo de comando de ignição com a maior carga....	92
Tabela 5-5: Ensaios de variação no ângulo de comando de ignição com a menor carga....	92
Tabela 5-6: Parâmetros dos modelos obtidos com nos ensaios de variação de ângulo de comando de ignição. ....	96
Tabela 5-7: Avaliação dos modelos para a variação no ângulo de comando da ignição. ...	96
Tabela 5-8: Ensaios de variação na pressão do ar do coletor com a maior carga. ....	100
Tabela 5-9: Ensaios de variação na pressão do ar do coletor com a menor carga.....	100
Tabela 5-10: Modelos locais de variação da pressão do ar do coletor de admissão.....	102

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1. Contextualização do problema

O uso de motores de pequeno porte (potência nominal inferior a 20kW) cresceu nos últimos anos, notadamente em motocicletas [1]. O número de ciclomotores e de motocicletas comercializados no Brasil atingiu a marca de 1268041 unidades em 2006, sendo que 84% correspondem a motocicletas com motores mono-cilíndricos de 4 tempos abaixo de 200cm<sup>3</sup> de cilindrada. Esse número corresponde aos modelos ditos populares, que utilizam carburadores ([2], [3]) como sistema de alimentação de combustível para os motores.

O consumo de combustível e nível de emissão de poluentes dos motores de combustão interna de fontes móveis (veículos) é regulamentado no Brasil pelo PROCONVE (Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores) e pelo PROMOT (Programa de Controle da Poluição do Ar por Motocicletas). Eles estabelecem os prazos, limites de emissão e exigências tecnológicas para veículos automotores nacionais e importados [4]. A tabela 1-1 apresenta a evolução dos limites de emissão de poluentes em motocicletas, que representam de forma significativa o uso de motores mono-cilíndricos de pequeno porte em veículos.

Tabela 1-1: Limites de emissão de poluentes para motocicletas [4].

POLUENTES	LIMITES				
	Desde 01/01/2003 <sup>(1)</sup>	Desde 01/01/2005 <sup>(1)(2)</sup>		A partir de 01/01/2009 <sup>(1)</sup>	
	Motorização				
	Todos	< 150 cc	≥ 150 cc	< 150 cc	≥ 150 cc
monóxido de carbono (CO em g/km)	13,0	5,5	5,5	2,0	2,0
hidrocarbonetos (HC em g/km)	3,0	1,2	1,0	0,8	0,3
óxidos de nitrogênio (NOx em g/km)	0,3	0,3	0,3	0,15	0,15
monóxido de carbono em marcha lenta	≤ 250 cc	6,0%			
(CO Marcha Lenta)	> 250 cc	4,5%			

(1) a produção ou importação de até 50 unidades de um modelo por ano, num total máximo de 100 unidades de diferentes modelos por importador ou fabricante, poderá ser isenta da apresentação do atendimento aos limites;  
(2) – em 01/01/2005 -> inicia para todos os novos lançamentos de modelos. - em 01/01/2006 -> exigido para todos os modelos.

Nota-se, por exemplo, que os níveis permitidos para emissão de monóxido de carbono (CO) são reduzidos de 13g/km em 2003 para 2g/km a partir de 2009. A crescente restrição nos níveis de emissão de poluentes pelos órgãos responsáveis aponta para o uso de sistemas de alimentação e gerenciamento do motor que permitam diminuir os níveis de emissão.

As principais fontes de emissão de poluentes nos motores são associadas ao processo de combustão. A combustão realizada com excesso ou falta de combustível, em relação ao ar admitido pelo motor, resulta em maior emissão gases nocivos ao meio ambiente, como por exemplo: monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrogênio (NOx) e hidrocarbonetos não queimados (HC) [5].

O principal sistema de alimentação de ar e combustível em motores de pequeno porte ainda é o carburador. O carburador está sujeito à variabilidade dos processos de fabricação, do combustível utilizado e do ambiente no qual o motor se encontra. Esses, entre outros fatores, influenciam na calibração do carburador para a alimentação correta do combustível em relação ao ar [5].

Para reduzir os níveis de emissão de poluentes, os carburadores foram substituídos pelos sistemas de gerenciamento eletrônico em motores poli-cilíndricos de médio e grande porte [6]. Esse sistema é adotado atualmente pela unanimidade dos fabricantes de automóveis de série. O uso de sistemas de gerenciamento eletrônico, em conjunto com as adaptações necessárias no motor para seu uso, permite reduzir o nível de emissão de poluentes e de consumo regulando mais adequadamente a mistura de ar e combustível e o instante de ignição [5]. Os sistemas de gerenciamento eletrônico permitem a compensação de efeitos de variação nas condições do ambiente, do combustível admitido, e do envelhecimento dos componentes, mantendo o motor com níveis mais baixos de emissão de poluentes.

## **1.2. Motivação e Objetivos**

Na grande maioria, os sistemas de gerenciamento eletrônico disponíveis são utilizados em motores poli-cilíndricos de médio e grande porte, a exemplo de automóveis de passeio e veículos de transporte de carga. O uso dos sistemas de gerenciamento é difundido nesses segmentos, pois, as normas de restrição de poluição vêm sendo impostas a mais tempo e são mais restritivas que aquelas atualmente impostas aos motocicletos [4].



Os sistemas de gerenciamento eletrônico desenvolvidos para os motores poli-cilíndricos são complexos e onerosos, principalmente devido à necessidade de gerenciar simultaneamente os diversos cilindros. Um sistema que possa ser efetivamente utilizado em motores de pequeno porte deve ter baixo custo de fabricação para ser adotado como alternativa ao carburador sem alterar significativamente os custos de produção do motor como um todo.

As crescentes restrições em níveis de emissões e a falta da disponibilidade de sistemas de gerenciamento eletrônico apropriados criam a necessidade para o desenvolvimento de um sistema próprio para motores de pequeno porte.

Uma pequena parcela dos motores de pequeno porte produzidos em escala industrial utiliza sistemas de gerenciamento eletrônico. Um exemplo de sistema de injeção eletrônica para motores de pequeno porte em escala industrial foi disponibilizado pelo fabricante Yamaha com a motocicleta de modelo Fazer 250 [7], com motor mono-cilíndrico de 249cm<sup>3</sup>. O produto começou a ser vendido em meados de 2006, durante o desenvolvimento desse trabalho.

Iniciativas de adaptar motores de pequeno porte com carburador para sistemas de gerenciamento eletrônico, tanto de 4 tempos como 2 tempos vem sendo realizadas com sucesso [8] e [9], o que comprova a viabilidade e coloca o problema de sistemas de gerenciamento para motores de pequeno porte como um assunto atual.

De modo amplo, esse trabalho tem por objetivo criar um ambiente de desenvolvimento que permita calibrar e testar um sistema de gerenciamento eletrônico próprio para motores de pequeno porte.

O ambiente de desenvolvimento deve contar com um equipamento que possa dissipar a potência do motor de forma controlável [8] para simular as condições de funcionamento do motor em aplicações reais. Para a calibração, é necessário realizar medições das variáveis do motor em relação aos sinais emitidos pelo sistema de gerenciamento, e armazenar essas medições para análise posterior.

Especificamente, a criação do ambiente de desenvolvimento inclui:

- as alterações realizadas num motor mono-cilíndrico de pequeno porte com carburador para uso do sistema de gerenciamento eletrônico,
- o desenvolvimento de um sistema de gerenciamento eletrônico próprio para motores de pequeno porte,
- o desenvolvimento da bancada de testes para o motor e o sistema de gerenciamento,
- o desenvolvimento de um sistema de aquisição de dados para o armazenamento dos testes realizados, obtendo assim dados para inferir sobre o funcionamento do motor, e da central de gerenciamento.

As escolhas tecnológicas aplicadas ao desenvolvimento foram limitadas pelos seguintes requisitos:

- a utilização de componentes com maior facilidade de reposição e mais prontamente disponíveis no mercado brasileiro,
- o desenvolvimento de um sistema de gerenciamento que possa ser adaptado em motores projetados com carburador com poucas modificações ao motor,
- o uso do menor número possível de sensores e atuadores para reduzir os custos globais do sistema [10].

De fato, é possível obter estimativas de grandezas físicas associadas ao funcionamento do motor a partir da medição de outros sensores, evitando assim o uso de componentes de custo elevado ou contornando problemas de acesso à grandeza que se deseja medir [10]. Além de reduzir os custos e número de componentes, o uso de poucos sensores também requer menor número de adaptações ao projeto original do motor e menos mão-de-obra para a montagem do equipamento durante a produção.

### **1.3. Solução adotada**

Além dos objetivos específicos citados acima, o trabalho desenvolvido tem como prerrogativa o entendimento dos fundamentos do gerenciamento eletrônico para motores. A construção dos equipamentos utilizados permite maior profundidade no entendimento dos fenômenos estudados e das especificações dos componentes a serem utilizados. Devido a esse fator, assim como aos objetivos e requisitos apontados anteriormente, optou-se pela montagem dos equipamentos utilizados.

Os componentes do sistema de gerenciamento foram montados conforme a necessidade, incluindo:

- as peças de adaptação do motor,
- a instalação dos atuadores,
- a instalação dos sensores,
- a construção de uma central de gerenciamento própria para motores de pequeno porte.

O sistema de aquisição de dados utilizado também foi construído especificamente para a aplicação.

Para os sensores e atuadores, optou-se por utilizar componentes de sistemas automotivos industriais, pela disponibilidade, confiabilidade e praticidade.

A bancada de testes utilizada foi fornecida montada, e não foram feitas modificações em sua estrutura de funcionamento.

## **1.4. Contribuições**

A principal contribuição do trabalho foi o desenvolvimento de um ambiente de testes para motores mono-cilíndricos de pequeno porte com sistema de gerenciamento eletrônico. Os equipamentos de gerenciamento eletrônico, de aquisição de dados e a bancada de testes possuem custo reduzido. Além do custo reduzido, esses sistemas utilizam componentes facilmente encontrados no mercado brasileiro, o que facilita sua reprodução. O sistema desenvolvido pode ser reutilizado em futuros trabalhos com o mesmo ou outros motores, com poucas adaptações mecânicas. Nas considerações finais do trabalho são feitas propostas de modificações para o aprimoramento dos equipamentos utilizados como sugestão para trabalhos futuros.

## **1.5. Organização do trabalho**

No capítulo 2 serão apresentados de forma sucinta os fundamentos teóricos dos problemas abordados neste trabalho, apresentando os fenômenos que regem o funcionamento do motor e os objetivos para o sistema de gerenciamento eletrônico, assim como para as bancadas de testes e os sistemas de aquisição de dados.

O capítulo 3 apresenta o ambiente de desenvolvimento na perspectiva de sistema de controle. O sistema de gerenciamento eletrônico atua como um controlador que deve

definir os sinais de atuação no motor, de acordo com objetivos de desempenho propostos para variáveis do motor. As características do sistema de medição e do motor são descritas de forma a serem utilizadas pela central de gerenciamento para atender aos objetivos de desempenho.

No capítulo 4 serão descritas as soluções adotadas do ponto de vista construtivo, descrevendo os componentes e a funcionalidade para os equipamentos desenvolvidos.

Os testes e ensaios de calibração, o levantamento de dados do funcionamento do ambiente, assim como os modelos estáticos e dinâmicos obtidos para o motor são apresentados no capítulo 5.

O capítulo 6 apresenta uma análise crítica do trabalho desenvolvido, assim como a perspectiva de continuação para futuros trabalhos nessa linha de pesquisa.

## **2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS**

Este capítulo tem por objetivo apresentar os conceitos básicos utilizados no desenvolvimento do trabalho. A apresentação desses conceitos começa com a descrição resumida dos componentes, do funcionamento e dos fenômenos associados ao motor de combustão interna estudado.

### **2.1. O motor de combustão interna**

A classe de motores estudada nesse trabalho é a dos motores de combustão interna, alternativos, de 4 tempos, cujo funcionamento pode ser descrito pelo ciclo Otto. O motor será descrito de acordo com:

- os componentes que o constituem,
- a forma como interagem esses componentes,
- o fenômeno da combustão interna e como ele influencia o comportamento do motor,
- suas limitações mecânicas durante o uso.

#### **2.1.1. Componentes do motor**

O diagrama na figura 2-1 apresenta a vista em corte de um motor de combustão interna simplificado [11].

Eles são tipicamente constituídos por: pistão (1), biela (2), virabrequim (3), anéis de vedação (4), comando de válvulas (5a/5b), válvula de admissão (6), válvula de escape (7), coletor de escapamento (8), tampa do cabeçote, cabeçote (9), cilindro (10), bloco (11) e volante de inércia. O sistema de alimentação de ar e combustível do motor é composto por: filtro de ar, carburador e coletor de admissão (12). O sistema de ignição compreende: fonte de energia, bobina de ignição, cabo de ignição, vela de ignição (13). O motor objeto do estudo conta ainda com imã permanente montado sobre o volante de inércia utilizado como fonte de energia para o sistema de ignição.

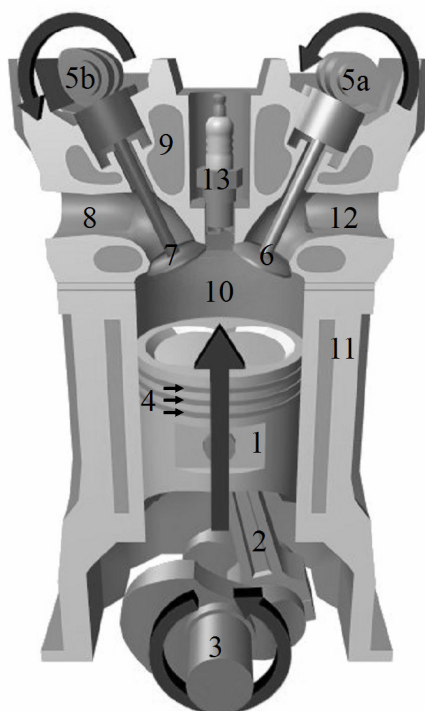


Figura 2-1: Vista em corte de um motor simplificado.

A face superior do pistão, o cilindro e a face inferior do cabeçote formam a câmara de combustão. O pistão se desloca dentro do cilindro, do qual a parte interna é chamada de *camisa*. O pistão possui ranhuras laterais dentro das quais são montados os anéis de vedação, que tem por função dificultar a passagem de gases no espaço entre o pistão e a camisa. A biela é um acoplamento que transforma o movimento linear do pistão em movimentos circulares do virabrequim. O virabrequim é mantido em posição por mancais de deslizamento montados no bloco do motor, que permitem apenas movimentos de rotação axial do virabrequim. Existem dois pontos importantes para a definição de características do motor, onde a velocidade instantânea do pistão é zero. A posição angular do virabrequim onde ocorre a maior distância entre esse e o pistão é chamada ponto morto superior (PMS). Por complemento, a posição angular de menor distância é chamada de ponto morto inferior (PMI). A distância entre esses dois pontos é chamada de curso. O produto da área do pistão pelo curso define a capacidade cúbica de um cilindro do motor, e no caso do motor estudado, a capacidade cúbica total.

### 2.1.2. Funcionamento do motor

O motor de combustão interna é um mecanismo que transforma energia térmica em trabalho mecânico útil. A energia térmica é obtida através da combustão de uma mistura de combustível (gasolina) e comburente (ar) comprimida e mantida sob pressão dentro do motor no momento de sua combustão e expansão.

O funcionamento termodinâmico do motor em estudo pode ser descrito pelo ciclo Otto, que é composto por quatro ciclos (ou tempos) e necessita duas voltas do virabrequim para ser completado. A figura 2-2 ilustra os quatro ciclos (ou tempos) [11].

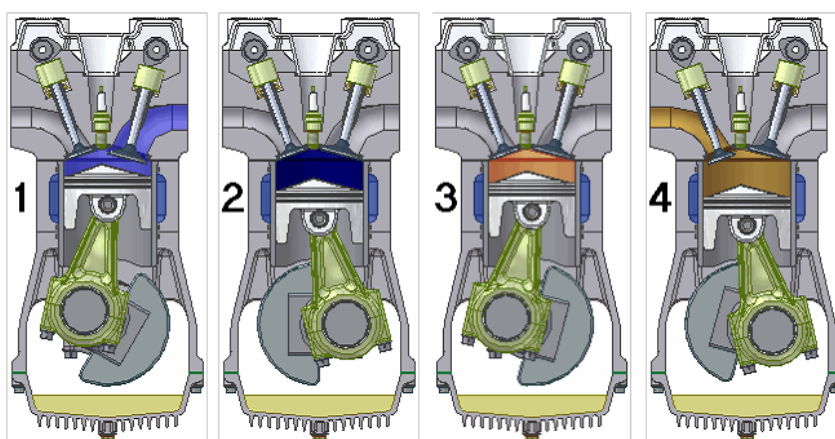


Figura 2-2: Os quatro ciclos (tempos) do motor Otto.

Cada ciclo corresponde a 180 graus de rotação do virabrequim. Cada ciclo é definido em função da posição atual do virabrequim e, portanto, da posição do pistão. Os ciclos de compressão e de exaustão dos gases são realizados quando o pistão se afasta do virabrequim e se aproxima do cabeçote do motor. Da mesma forma, os ciclos de admissão e expansão são feitos durante o afastamento do pistão em relação ao cabeçote.

O primeiro ciclo, de admissão, ocorre quando o pistão se afasta do cabeçote aspirando a mistura de ar e combustível vaporizado para dentro do cilindro. A mistura passa pelo coletor de admissão, entrando no cilindro através da válvula de admissão. Logo após o pistão atingir o PMI, a válvula de admissão é fechada e o pistão retorna em direção ao PMS iniciando o segundo ciclo, a compressão. Antes do pistão de atingir novamente o PMS é iniciada a combustão da mistura que está sendo comprimida, através da geração de uma faísca entre os eletrodos da vela de ignição. O terceiro ciclo, a expansão, ocorre com

os gases da combustão exercendo pressão elevada na face superior do pistão, que novamente se afasta do cabeçote.

A força resultante da pressão aplicada na face superior do pistão é transformada em torque no eixo de saída através da biela e do braço da alavanca do virabrequim. Com o pistão chegando ao PMI no final da expansão, a válvula de exaustão é aberta permitindo a evacuação dos gases da combustão. O quarto ciclo, a exaustão, acontece com o retorno do pistão em direção ao PMS evacuando o resto dos gases para o coletor de escapamento.

Com o pistão próximo ao PMS a válvula de admissão é novamente aberta para a entrada de nova mistura, e a válvula de escape é fechada para impedir que a mistura nova passe ao escapamento sem ser queimada. O ciclo reinicia com a nova admissão.

### **2.1.3. O fenômeno da combustão interna**

O início da combustão da mistura de ar e combustível é realizado através de aquecimento localizado, provocado pela criação de um arco voltaico entre os eletrodos da vela de ignição. A alta tensão necessária para o estabelecimento do arco voltaico é fornecida pela bobina de ignição.

A diferença entre a posição angular do virabrequim e o PMS no momento do disparo é denominada ângulo de avanço de ignição. A frente de onda da combustão se propaga com uma velocidade que depende de fatores como a pressão de compressão da mistura, a turbulência, a temperatura, etc... Em função das variações no tempo necessário para completar a combustão, o ângulo de avanço da ignição deve ser modificado quando o motor está em operação.

O trabalho fornecido pelo motor durante uma combustão advém da diferença entre a pressão de entrada da mistura e a pressão de saída dos gases de escape. Ele pode ser calculado integrando a pressão ao longo do volume varrido pelo pistão no ciclo termodinâmico. O diagrama de pressão e volume da câmara de combustão do ciclo Otto teórico [12] pode ser visto na figura 2-3.

Nos processos reais, a compressão e a expansão não são feitas como processos adiabáticos. O aporte de calor (combustão) e a rejeição do calor também não são realizados a volume constante. O ciclo de exaustão é realizado com pressão superior ao de admissão, retirando de energia do ciclo para o trabalho de bombeamento.



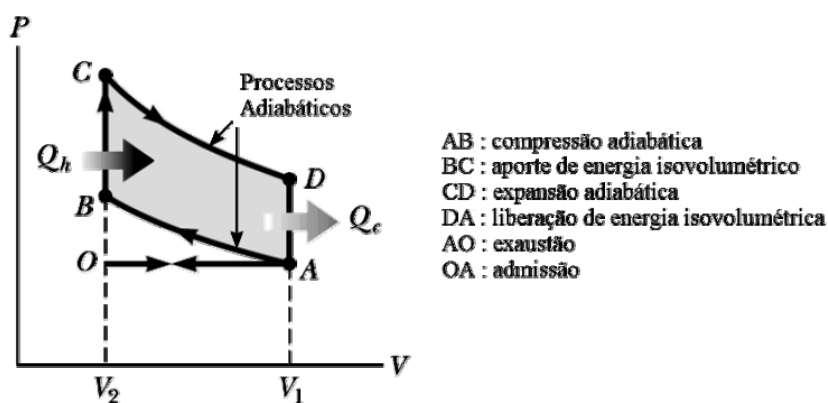


Figura 2-3: Diagrama de pressão e volume do ciclo Otto teórico [12].

O fato do aporte de energia não acontecer com pressão constante advém da velocidade de reação de queima do combustível [12]. Para aumentar a transformação de energia mecânica do ciclo, a ignição é iniciada antes do PMS, permitindo que a expansão comece com pressão elevada. A pressão e temperatura máximas atingidas dentro da câmara de combustão são funções da massa de ar e de combustível admitidas pelo motor. A temperatura máxima atingida depende da proporção entre as massas de ar e combustível da mistura dentro da câmara. Com uma mistura onde existe excesso de ar, a temperatura poderia ser mais elevada, pois, é possível oxidar mais combustível, liberando mais energia térmica. Em misturas com excesso de combustível, o combustível excedente consome energia para ser vaporizado, mas não gera calor durante a combustão, já que não há oxigênio suficiente para oxidá-lo.

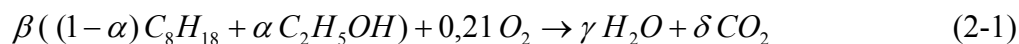
A pressão dentro do cilindro é outro fator determinante para o cálculo do trabalho gerado pelo motor. Quanto maior a pressão na entrada do cilindro, para uma dada temperatura de entrada da mistura de ar e combustível, maior é a massa de mistura admitida e, portanto, a energia disponível para conversão. No ciclo termodinâmico, esse aumento da pressão de entrada acarreta o aumento da temperatura e pressão máximas.

Todo o cálculo do ciclo termodinâmico, assim como o funcionamento do motor, depende da ocorrência da combustão interna.

Para ocorrer a combustão interna, é necessário que:

- seja feita a admissão de ar com teor suficiente de oxigênio (comburente) e combustível no cilindro do motor,
- o combustível deve estar vaporizado no instante da combustão,
- a relação de massas de ar e de combustível na região dos eletrodos da vela esteja dentro de uma faixa na qual o sistema de ignição consiga iniciar a combustão.

Os termos *relação ar-combustível* e *mistura* se referem à relação entre massas de ar e de combustível, ou *AFR* (“*air-fuel ratio*”), admitida pelo motor. A definição da proporção estequiométrica entre número de moles de ar e de combustível é fornecida pelo balanceamento da equação química que representa a reação da combustão. Algumas considerações e aproximações serão efetuadas para estimar o valor do *AFR* estequiométrico. O ar atmosférico seco pode ser considerado, para efeitos de cálculo aproximado, como composto por 79% de nitrogênio e 21% de oxigênio [13]. Essa aproximação é válida para altitudes inferiores a 15 km em relação ao nível do mar. A equação química simplificada para a combustão da mistura ar-combustível é indicada na equação 2-1, em relação a um mol de ar seco.



$$\beta = 2 \frac{0,21}{(25 - 19\alpha)} \quad (2-2)$$

$$\gamma = \beta(8 - 6\alpha) \quad (2-3)$$

$$\delta = \beta(9 - 6\alpha) \quad (2-4)$$

sendo:

$\alpha$ : porcentagem de álcool etílico anidro no combustível;

$C_8H_{18}$ : parcela de octano no combustível representando a gasolina tipo A;

$C_2H_5OH$ : parcela de álcool etílico no combustível;

$H_2O$ : vapor de água, produto da combustão;

$CO_2$ : gás carbônico, produto da combustão;

$\beta, \gamma, \delta$ : coeficientes associados ao número de moles de combustível, água e gás carbônico respectivamente.

A equação 2-1 é considerada simplificada uma vez que supõe que todo o combustível é oxidado e que os dois únicos produtos da combustão são água e dióxido de carbono. Ela considera uma mistura de etanol e octano, onde a letra grega “ $\alpha$ ” denota a fração do volume de etanol em relação ao volume total de combustível.

A gasolina tipo C, disponibilizada para uso em veículos automotores no Brasil, é constituída em média por 77% de gasolina do tipo A e 23% de álcool etílico anidro combustível (AEAC), porcentagem do volume total [14]. O valor de  $\alpha$  para uso é de 0,23 na equação 2-1.

A composição da gasolina tipo A muda de acordo com a refinaria e a distribuidora e, portanto, existem variações no valor da proporção exata de moles de cada componente. Usa-se a simplificação de que a parcela de gasolina tipo A possua 100% de octano. Tal suposição é válida considerando a variabilidade da gasolina tipo C, encontrada nos postos de abastecimento. A constatação da variabilidade na composição do combustível reforça a necessidade de ajustes por parte do sistema de gerenciamento eletrônico.

Substituindo os valores de  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  e  $\delta$ , obtém-se a proporção de moles entre ar e combustível:

$$\frac{ar}{combustível} \Big|_{molar} \cong \frac{1}{0,020359} \cong 49,12 \quad (2-5)$$

A relação ar-combustível,  $AFR$ , é tipicamente definida como a proporção de massas entre ar e combustível. As massas molares do ar e do combustível considerados são:

$$ar = 28,84 \left[ \frac{g}{mol} \right] \quad (2-6)$$

$$combustível \cong 99,21 \left[ \frac{g}{mol} \right] \quad (2-7)$$

A proporção de massas entre ar e combustível é obtida multiplicando a proporção de moles pela razão das massas molares do ar e do combustível, o que define o  $AFR$  estequiométrico:

$$AFR_e = \frac{ar}{combustível} \Big|_{massa} \cong \frac{28,84}{99,21} \cdot 49,12 \cong 14,28 \quad (2-8)$$

Mesmo que a proporção de AEAC na gasolina tipo C varie entre 20 e 25% [14], o valor de  $AFR$  é mantido dentro da faixa de 14 a 15. Por exemplo, com 100% de octano o  $AFR$  seria aproximadamente 14,92 e para 30% de AEAC com 70% de octano seria 14,02.

Quando o  $AFR$  da mistura admitida pelo motor é normalizado em relação ao valor estequiométrico definido por  $AFR_e$ , é obtido um coeficiente representado pela letra grega  $\lambda$  (*lambda*):

$$\lambda = \frac{AFR}{AFR_e} \quad (2-9)$$

Quando  $\lambda > 1$  a mistura possui excesso de ar (mistura pobre), e quando  $\lambda < 1$  a mistura possui excesso de combustível (mistura rica).

#### 2.1.4. Limitações mecânicas

O momento correto para a ignição é de grande importância, pois pouco avanço de ignição significa menor pressão para o início do ciclo de expansão, e menor rendimento do ciclo termodinâmico. O avanço de ignição muito grande eleva demasiadamente a pressão da câmara de combustão, levando a mistura à auto-detonação (dentre outras anomalias). Toda a mistura de combustível e ar possui uma curva característica de pressão e temperatura que indica o limiar de detonação.

Dentro da câmara de combustão, existem pontos que podem apresentar temperaturas elevadas durante o funcionamento do motor, que são oriundos de arestas na geometria das peças (cabeçote ou válvulas) ou mais comumente por incrustação de resíduos de combustão. Esses pontos quentes, junto com pressões elevadas dentro da câmara de combustão, podem comportar-se como velas de ignição secundárias e originar outras frentes de onda para a combustão. O encontro das frentes de onda da vela e dos pontos quentes gera picos elevados de pressão que danificam camisa, pistão, cabeçote e as válvulas. Isso faz com que o avanço de ignição aplicado corretamente seja extremamente importante para o desempenho e durabilidade do motor.

## 2.2. Visão geral do sistema de gerenciamento eletrônico

O objetivo do sistema de gerenciamento eletrônico é manter o motor em funcionamento, protegendo-o de sobrecargas, melhorando o desempenho e reduzindo a emissão de poluentes. Um sistema de gerenciamento eletrônico é tipicamente composto por uma gama de sensores e atuadores que permitam fornecer informações e graus de liberdade de atuação no motor suficientes para que a central de gerenciamento alcance os objetivos citados anteriormente. A seguir serão descritos alguns dos componentes disponíveis e seus princípios de funcionamento.

## 2.3. Sensores para gerenciamento eletrônico

Eles são responsáveis por transformar grandezas físicas que retratam as condições de funcionamento do motor e apresenta-las num formato que possa ser utilizado pela central de gerenciamento. As informações fornecidas pelos sensores são utilizadas para servir de ponto de partida na decisão sobre os valores de quantidade de ar, combustível e ângulo de início de ignição aplicado no motor. Do ponto de vista de sistemas dinâmicos, os sensores utilizados em escala industrial nos sistemas automotivos se comportam como filtros que atenuam as altas frequências.

O objetivo principal dos sensores é determinar a vazão mássica de ar que entra no motor e determinar os momentos para aplicação das ações de controle no motor. Outras informações são relevantes, como a determinação da concentração de oxigênio nos gases de escapamento, e as medidas de temperatura durante o funcionamento do motor.

Segundo a equação dos gases ideais, é possível relacionar as grandezas de temperatura, volume e pressão de um gás ideal a partir de suas condições iniciais, conforme a equação 2-10.

$$\frac{P \cdot V}{T \cdot m} = \frac{P_o \cdot V_o}{T_o \cdot m_o} \quad (2-10)$$

A equação pode ser reescrita utilizando como referência para massa específica do ar:

$$\rho_{ar} \cong 1,2875 \left[ \frac{kg}{m^3} \right] \quad (2-11)$$

Considerando que esse valor de massa específica é obtido para as condições normais de temperatura e pressão, a equação 2-10 pode ser reescrita como:

$$m = \frac{P \cdot V}{T \cdot R} \quad (2-12)$$

sendo :

*m*: massa do gás [kg];

*V* : volume ocupado pelo gás [m<sup>3</sup>];

*R*: constante do gás [Pa.m<sup>3</sup>/kg.K];

*T*: temperatura absoluta do gás [K];

*P*: Pressão do gás [Pa].

$$R = \frac{P_o \cdot V_o}{T_o \cdot m_o} \cong \frac{101000 \cdot 1}{298 \cdot 1,2875} \cong 263,24 \left[ \frac{Pa \cdot m^3}{kg \cdot K} \right] \quad (2-13)$$

A pressão do ar que entra no motor varia tão rapidamente quanto a posição angular do acelerador, e a velocidade angular do motor. A temperatura de entrada tem uma dinâmica lenta quando comparada à pressão. O volume de ar admitido varia de acordo com a velocidade angular do motor, por causa dos efeitos dinâmicos de admissão pela geometria e sincronização do sistema de alimentação de ar. A curva característica de volume admitido depende da construção do motor e pode ser determinada mediante ensaios de medição de fluxo de ar para diferentes regimes de rotação e carga.

Diversos tipos de sensores estão disponíveis para o monitoramento das grandezas físicas envolvidas no funcionamento do motor. Uma descrição sucinta dos principais sensores será apresentada a seguir.

### **2.3.1. Temperatura e pressão do ar do coletor de admissão**

Devido à equação 2-12, obtendo medições de temperatura, pressão do ar admitido e velocidade angular do motor, é possível estimar a vazão mássica de ar sendo admitida pelo motor. A temperatura, do ponto de vista dinâmico, varia de forma lenta quando comparada a variações da pressão no coletor. Portanto, a temperatura pode ser considerada como um parâmetro de correção estática e o sensor de pressão ser utilizado como uma medida dinâmica. O sensor de pressão de ar do coletor é considerado um sistema dinâmico, que possui uma velocidade de resposta significativa durante alterações da posição angular do acelerador, que modificam a resistência de passagem ao fluxo de ar. A desvantagem do sensor de pressão está no atraso de captura das variações de vazão mássica. Para compensar o atraso nas leituras é comumente utilizado um sensor de posição angular da borboleta do acelerador, que deve fornecer leituras exatas e com alta velocidade de resposta. A principal vantagem da medição de pressão é a compensação de efeitos de perda de carga na admissão.

### **2.3.2. Posição angular da borboleta do acelerador**

O sensor de posição angular da válvula de entrada de ar, conhecida como *borboleta* do acelerador, fornece informações sobre a restrição que a válvula impõe à entrada de ar no motor. Em conjunto com a medida da velocidade angular do motor e da temperatura do ar no coletor de admissão é possível estimar a vazão mássica de ar que entra no motor.

Devido à medida direta da posição do atuador que restringe a entrada de ar, o sensor de posição angular da borboleta capta mais rapidamente mudanças na vazão mássica de ar. Ele pode ser utilizado como alternativa ao sensor de pressão de ar do coletor de admissão para a estimativa do fluxo de massa de ar de forma dinâmica, com a vantagem de ter menor custo e maior velocidade de resposta. Ele tem a desvantagem de ser mais suscetível a variações de perda de carga na entrada de ar, sendo mais difícil manter a calibração do ângulo de abertura em relação ao fluxo de massa de ar.

A compensação das estimativas fornecidas por esse sensor para a de vazão mássica de ar pode ser realizada de forma estática com a adição de sensores de pressão e de temperatura do ar no coletor de admissão após o filtro de ar, antes da borboleta. Essas leituras podem ser realizadas por sensores baixa velocidade de resposta (de menor custo).

### 2.3.3. Posição angular do virabrequim

A posição do virabrequim fornece a referência para a aplicação das ações de controle e o período de uma revolução é convertido em velocidade angular do motor. Todas as ações de controle são definidas em função da velocidade angular. Por exemplo, o instante de início para a ignição é a ação de controle com maior dependência da medição correta da posição angular. Os sensores de posição e velocidade angular encontrados nos sistemas automotivos são tipicamente eletromagnéticos. Os sensores eletromagnéticos são robustos e não necessitam de contato com o alvo. Eles produzem sinais de tensão em função da variação na intensidade do campo magnético ao seu redor. Mais especificamente, a variação do campo magnético é dada pelo deslocamento relativo do alvo em relação ao sensor, sendo que o alvo se desloca ao longo do grau de liberdade a ser medido. Um conjunto de sensor e alvo comumente utilizado no setor automobilístico é o sensor de relutância variável com a roda fônica. O sinal produzido pelo sensor de relutância variável e o sinal após tratamento em função do movimento relativo entre sensor e roda fônica pode ser visto na figura 2-4.

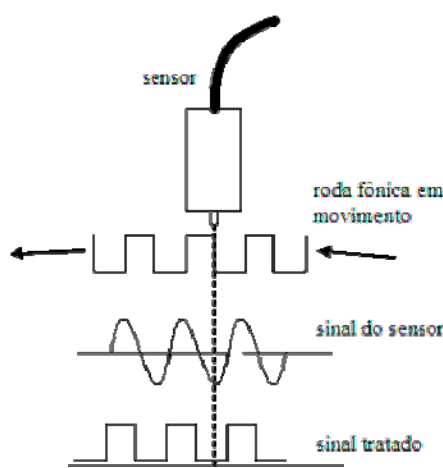


Figura 2-4: Sinal do sensor de relutância variável [12].

A informação extraída dos sensores de relutância variável está contida na frequência do sinal que eles produzem. A tensão produzida é função da variação do campo magnético, e não do seu valor estático. Por isso, não são indicados para medir a posição de um alvo estático. Eles são utilizados para medir velocidades angulares como a do motor para a central de gerenciamento e a das rodas para os sistemas de freio anti-bloqueantes (*ABS*).



Outro conjunto de sensor e alvo bastante utilizado é o sensor de efeito *Hall* com alvos magnetizados. Os sensores de efeito *Hall* captam a intensidade do campo magnético em sua proximidade e por isso conseguem fornecer informação de posição estática.

Os sensores de efeito *Hall* são divididos pela característica do sinal de saída, assumindo valores digitais (mono ou bipolares) ou analógicos. A figura 2-5 ilustra a característica de tensão de saída dos sensores de efeito *Hall* lineares e bipolares (com histerese) de acordo com o fluxo magnético captado pelo sensor.

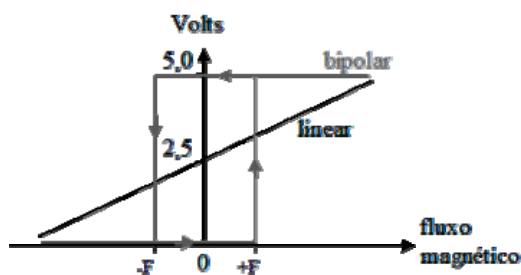


Figura 2-5: Sinais dos sensores de efeito *Hall* [12].

Os sensores analógicos fornecem um sinal de saída proporcional à intensidade do campo. Em automóveis, os sistemas de suspensão ativa usam esses sensores para medir a posição linear do amortecedor. Eles também são usados para medir posições angulares como a abertura da borboleta do acelerador, onde um ímã é montado junto ao eixo do acelerador. Os sensores de efeito *Hall* bipolares fornecem valores binários na saída, que muda de estado a partir da intensidade de fluxo de referência pré-definida. A saída do sensor possui histerese, para evitar chaveamentos indesejados na região de transição do sinal. Esse tipo de sensor é utilizado em conjunto com um ímã para obter a posição angular do eixo do comando de válvulas, fornecendo o sinal de sincronia para a injeção de combustível seqüencial e para o comando de ignição em motores poli-cilíndricos.

#### 2.3.4. Vazão mássica de ar na admissão

Os sensores de vazão mássica de ar fornecem diretamente um valor de tensão proporcional ao valor do fluxo de massa de ar que entra no motor, sem necessidade de correções ou calibração. Existem dois principais tipos de sensor de vazão mássica: os medidores de palheta e de fio quente. Os sensores de palheta transformam o fluxo de ar em deflexão de uma palheta articulada. O ângulo de deflexão é relacionado ao fluxo de massa de ar. Esse tipo de sensor depende de um sistema mecânico de massa e inércia considerável, de forma

que a velocidade de resposta desse tipo de sensor é limitada, além de sua calibração estar sujeita a alteração com o desgaste de seus componentes.

Os sensores de fio quente são baseados na capacidade de resfriamento que um fluxo de massa exerce sobre uma quantidade de massa aquecida. Esses sensores, para serem suficientemente exatos e terem boa resposta dinâmica são consideravelmente onerosos. Outras desvantagens desse tipo de sensor são a fragilidade e a incapacidade de determinar o sentido do fluxo de ar, sendo que as leituras devem ser feitas sincronizadas com a admissão de ar.

Ambos os sensores de vazão mássica impõem restrição à passagem de ar na admissão, o que reduz a massa de ar admitido para motores aspirados.

### 2.3.5. Medição da relação ar-combustível

Atualmente, a avaliação da relação entre ar e combustível na mistura admitida pelo motor, considerando sistemas automotivos em escala industrial, é baseada na concentração de oxigênio nos gases de escape. Eles são denominados sensores de oxigênio dos gases de escapamento, ou “*EGO sensor*” (“*Exhaust Gas Oxygen*”). A concentração de oxigênio nos gases de escape é função da proporção entre ar e combustível na mistura, e por isso, esses sensores são mais comumente conhecidos como *sonda  $\lambda$* . Existem dois tipos básicos de sensores: o EGO (banda estreita ou bipolar) e o UEGO (banda larga ou linear). As curvas características das sondas são ilustradas na figura 2-6.

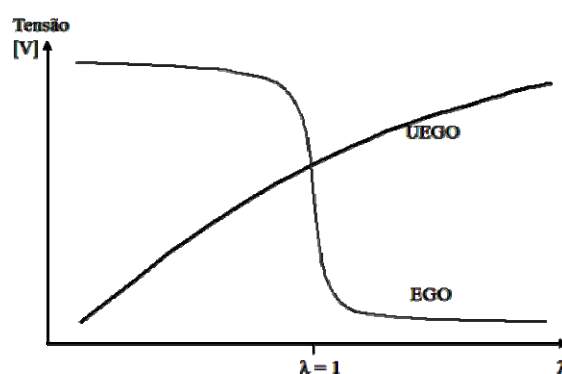


Figura 2-6: Curvas características para sensores de concentração de oxigênio bipolares (EGO) e lineares (UEGO) [12].

A temperatura do elemento sensor influencia na sensibilidade, assim como a velocidade de resposta. Para manter uma resposta homogênea, as sondas possuem uma resistência interna

do tipo NTC (“*negative temperature coefficient*”) para aquecimento do elemento sensor. Esse resistor é alimentado com a tensão da bateria e mantém o elemento sensor aquecido através de efeito Joule. Os dois materiais tipicamente utilizados como elementos sensores são: o dióxido de titânio e o dióxido de zircônio.

As sondas com dióxido de titânio funcionam segundo a primeira lei da eletrólise de Faraday [12]:

$$n = \frac{i}{zF} \quad (2-14)$$

sendo :

$i$  : *intensidade da corrente elétrica [A];*

$n$  : *número de moles de moléculas de oxigênio transportados através do elemento sensor por segundo;*

$z$  : *valência iônica da molécula de oxigênio: 4;*

$F$  : *constante de Faraday: 96,487 [C/mol].*

Uma diferença de potencial constante é aplicada entre os eletrodos porosos situados na face interna e externa de um disco do material que separa o escapamento do ambiente. A corrente necessária para manter um transporte constante de oxigênio através do material, do ambiente para dentro do escapamento, indica a concentração de oxigênio nos gases de escape.

As sondas baseadas dióxido de zircônio [12] funcionam segundo a lei de Nernst. Eles funcionam como pilhas, que produzem uma diferença de potencial a partir da diferença de pressões parciais do oxigênio dentro e fora do escapamento. A tensão produzida é função do logaritmo neperiano da razão entre as pressões parciais:

$$V_s = \frac{RT}{zF} \ln \frac{p_1}{p_2} \quad (2-15)$$

sendo ::

$V_s$  : *tensão produzida no disco [V];*

$R$  : *constante universal dos gases perfeitos: 8,314 [J/mol.K];*

$T$  : *temperatura absoluta do gás [K];*

$p_1, p_2$  : *respectivamente as pressões parciais das concentrações de moléculas de oxigênio no ambiente e nos gases de escape.*

Ambos os sensores requerem uma concentração de oxigênio como referência o que implica que necessitam de comunicação com o ar atmosférico. Fatores como umidade relativa e incrustações de resíduos nas superfícies do material alteram as leituras fornecidas. A figura 2-7 mostra um diagrama simplificado de sonda EGO.

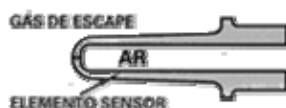


Figura 2-7: Diagrama simplificado de um sensor EGO.

As sondas UEGO possuem a característica de fornecer um sinal de saída proporcional à concentração de oxigênio no escapamento, com características de velocidade de resposta mais alta que as sondas EGO. Seu preço limita a acessibilidade desse tipo de sonda, que ainda é pouco utilizada em sistemas automotivos em larga escala.

## 2.4. Atuadores para gerenciamento eletrônico

Os atuadores permitem regular a quantidade de ar e de combustível que são admitidos pelo motor, além de determinar o instante de início da combustão. Diversos tipos de atuadores estão disponíveis para regular essas três variáveis de controle. Uma descrição sucinta desses atuadores será apresentada a seguir.

### 2.4.1. Ignição por faísca

Em motores de combustão interna alimentados por combustível voláteis, a ignição é tipicamente realizada através da criação de um arco voltaico entre os eletrodos de um componente inserido na câmara de combustão, denominado vela de ignição. O arco voltaico, comumente conhecido por faísca, é de fato plasma. O plasma é gerado em um pequeno volume entre os eletrodos devido à alta diferença de potencial que ioniza o ar, e aquecido por altas correntes elétricas após o estabelecimento do arco. A alta temperatura atingida na região da centelha inicia a combustão da mistura de ar e combustível comprimida na câmara de combustão. A figura 2-8 ilustra uma vela de ignição.

A tensão necessária para ionizar o ar é da ordem de dezenas de milhares de volts. A alta tensão requerida para o estabelecimento do arco voltaico é obtida com um

autotransformador conhecido como bobina de ignição. A bobina de ignição, por se tratar de um tipo de transformador, necessita de uma fonte de tensão variável com potência suficiente para alimentar a vela de ignição. Uma tensão variável aplicada no enrolamento primário induz uma tensão variável no enrolamento secundário.

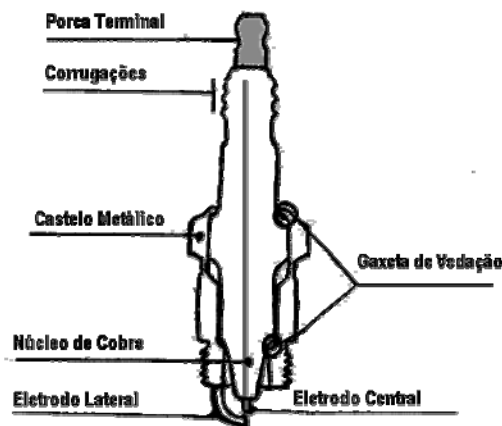


Figura 2-8: Diagrama em corte de uma vela de ignição.

A relação de amplificação de tensão é dada por:

$$r = \frac{n_2}{n_1} \quad (2-16)$$

sendo :

$r$ : a relação de amplificação;

$n_1, n_2$ : respectivamente, o número de bobinas do enrolamento primário e secundário.

A tensão induzida no enrolamento secundário da bobina de ignição é conduzida à vela de ignição através do cabo de ignição. Em sistemas de gerenciamento eletrônico, existem dois métodos tipicamente utilizados para gerar a tensão aplicada no enrolamento primário: a ignição por colapso de campo e a ignição por descarga capacitiva.

- Ignição por colapso de campo:

A ignição por colapso de campo utiliza o enrolamento primário da bobina como indutor para armazenamento de energia na forma de campo magnético. A energia armazenada é definida como:

$$E = \frac{L i^2}{2} \quad (2-17)$$

sendo:

$E$ : energia armazenada na forma de campo magnético [J];

$L$ : indutância do enrolamento primário [H];

$i$ : intensidade da corrente que circula pelo enrolamento [A].

O estabelecimento da corrente no enrolamento primário da bobina, submetido a uma tensão de alimentação constante, se comporta como indutor com uma resistência em série:

$$i(t) = i_0 + \frac{V}{R} \exp\left(-\frac{L}{R} t\right) \quad (2-18)$$

sendo:

$i(t)$ : intensidade da corrente que circula pelo enrolamento em função do tempo [A];

$i_0$ : intensidade inicial da corrente que circula pelo enrolamento [A];

$V$ : tensão de alimentação aplicada no enrolamento primário [V];

$L$ : indutância do enrolamento primário [H];

$R$ : resistência do enrolamento primário [Ohms].

A tensão a ser amplificada pela bobina é gerada quando a passagem da corrente é interrompida no enrolamento primário. A característica da tensão nos terminais de um indutor ideal é dada por:

$$V(t) = L \frac{d(i(t))}{dt} \quad (2-19)$$

sendo:

$i(t)$ : intensidade da corrente que circula pelo enrolamento em função do tempo [A];

$V(t)$ : diferença de potencial entre os terminais do enrolamento primário [V];

$L$ : indutância do enrolamento primário [H].

Quanto mais rapidamente for extinta a corrente no enrolamento primário, maior será a tensão produzida. A tensão induzida no enrolamento secundário também é função da

variação de tensão no enrolamento primário. Para que o instante de início da combustão possa ser definido da forma desejada, empregam-se componentes eletrônicos como os transistores e os tiristores como chaves de comutação de passagem de corrente. O limite para o pico de tensão alcançado no enrolamento primário é dado então pelo limite de tensão de ruptura desses componentes eletrônicos.

Um transistor utilizado para ignição por colapso de campo de custo reduzido suporta tensões superiores a 180V e correntes da ordem de 12A. Transistores de mais alta potência suportam tensões superiores a 400V. Para que haja energia suficiente para gerar uma centelha nos eletrodos da vela, é necessário que a bobina seja previamente carregada e que a corrente seja interrompida no momento oportuno.

É importante ressaltar que enquanto existe passagem de corrente pelo enrolamento primário da bobina, existe dissipação de potência por efeito Joule, devido à resistência do enrolamento primário. Se alimentada continuamente, o excesso de calor produzido pode levar ao superaquecimento da bobina e gerar danos no equipamento. Portanto, para efeitos de controle, a definição dos instantes de chaveamento da corrente é o fator determinante nesse sistema de ignição.

- Ignição por descarga capacitiva:

O sistema de ignição por descarga capacitiva armazena a energia utilizada no estabelecimento da centelha na forma de campo elétrico, acumulando carga elétrica em um capacitor. A função da energia armazenada é dada por:

$$E = \frac{C V^2}{2} \quad (2-20)$$

*sendo :*

*E:* energia armazenada na forma de campo elétrico [J];

*C:* capacitância [F];

*V:* diferença de potencial elétrico entre os eletrodos do capacitor [V].

A aplicação de uma fonte de corrente nos terminais do capacitor acumula carga no capacitor e a tensão nos terminais é calculada por:

$$i(t) = C \frac{d(V(t))}{dt} \quad (2-21)$$

sendo :

$i(t)$ : intensidade da corrente que circula pelo capacitor em função do tempo [A];

$V(t)$ : diferença de potencial entre os terminais do capacitor [V];

$C$ : capacitância [F].

Tipicamente, sistemas de ignição por descarga capacitiva funcionam com 200 a 400 Volts de tensão no capacitor. A energia armazenada é transferida fechando um circuito entre os terminais do enrolamento primário e do capacitor. A comutação pode ser realizada com componentes eletrônicos como transistores de potência e tiristores, assim como para a ignição por colapso de campo.

Diferentemente do sistema de ignição anterior, a carga do capacitor pode ser feita sempre que possível, pois, o capacitor não dissipa potência depois de carregado. Sendo assim, o sistema de ignição por descarga capacitiva é mais eficiente que o de colapso de campo.

Outra vantagem reside no tamanho reduzido da bobina de ignição nesse sistema, pois a tensão armazenada no capacitor pode ser alta e necessitar de menor relação de amplificação na bobina. As correntes alcançadas pela ignição capacitiva são também maiores, pois a bobina de ignição pode ser fabricada com menor resistência e indutância. Isso também aumenta a conversão de energia dentro da bobina e gera uma centelha com maior intensidade.

Tipicamente, os motores de motocicletas possuem um alternador de alta tensão, desenhado especificamente para carregar o capacitor da ignição. A ausência de uma fonte de alta tensão prontamente disponível faz a ignição por colapso de campo ainda ser amplamente utilizada em automóveis. Esse sistema, porém, está sendo gradualmente substituído pela ignição por descarga capacitiva.

#### **2.4.2. Alimentação de combustível**

O combustível fornecido ao motor deve ser dosado de forma adequada em relação à massa de ar admitida. Além disso, o combustível deve se encontrar no estado gasoso no momento da ignição para poder ser queimado, então, os sistemas de alimentação de combustível devem promover a vaporização mais completa possível do combustível que se encontra no estado líquido.



Os equipamentos mais comumente utilizados para promover a dosagem e vaporização do combustível em sistemas automotivos são os carburadores e os bicos injetores. Os primeiros foram grandemente empregados antes dos sistemas de gerenciamento eletrônico devido à sua simplicidade de instalação e regulagem. Porém, como todo sistema mecânico, os carburadores estão sujeitos ao desgaste, e perdem suas características de regulagem ao longo do tempo. Para compensar as limitações dos carburadores, ao longo do tempo foram adicionados mecanismos de compensação. Esses mecanismos requerem processos de fabricação onerosos, implicando em custos elevados para os carburadores.

Com o advento da eletrônica embarcada, e posteriormente o uso do micro controlador, o atuador para dosagem de combustível passou a ser o bico injetor. O bico injetor é constituído por um obturador móvel acionado por um solenóide e uma mola. A mola exerce uma força sobre o obturador no sentido impedir a passagem de combustível. A passagem de combustível é estabelecida quando o solenóide é acionado, puxando o obturador e comprimindo a mola. O combustível passa através de um orifício aspersor que tem a função de separar o líquido em gotas para facilitar a vaporização do combustível. Gotas de menor diâmetro e maior número aumentam a área de contato do combustível com o ar na admissão, e facilitam a vaporização do combustível. A vaporização do combustível é essencial, pois, o combustível na fase líquida não queima. A principal vantagem do bico injetor é permitir variar de forma controlada a quantidade de combustível fornecida ao motor, através de comandos de tensão aplicados ao solenóide. O diagrama simplificado de um bico injetor pode ser visto na figura 2-9.

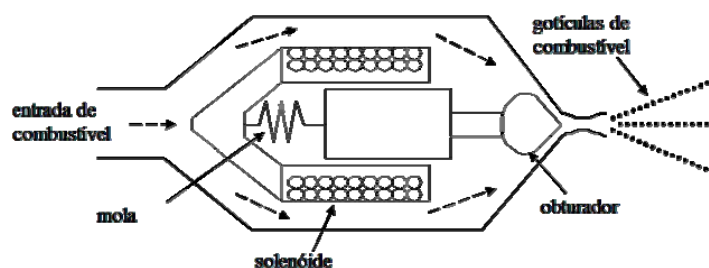


Figura 2-9: Diagrama simplificado de um bico injetor.

Os sistemas de alimentação de combustível disponíveis atualmente para automóveis em escala industrial utilizam bicos injetores controlados eletronicamente, e podem ser classificados por:

- Número de injetores:
  - monoponto: é utilizado apenas um bico injetor para alimentar todos os cilindros do motor. O bico injetor é instalado à montante da borboleta do acelerador. Possui o inconveniente de estar muito afastado dos cilindros e não permitir a dosagem de combustível para cada cilindro individualmente.
  - multiponto: cada cilindro possui pelo menos um bico injetor, instalados próximos da válvula de admissão do motor. Permite a dosagem independente de combustível para cada cilindro.
- Sincronia da injeção:
  - simultânea: todos os injetores são acionados ao mesmo tempo.
  - seqüencial: os injetores são acionados de forma independente, permitindo definir os instantes de começo de injeção de acordo com o ciclo no qual se encontra cada cilindro, assim como definir diferentes quantidades de combustível para cada cilindro. Requer maior poder de processamento da parte da central de gerenciamento eletrônico.
- Posição do injetor:
  - indireta: o injetor entrega o combustível antes de entrar no cilindro, é o sistema tipicamente utilizado para automóveis,
  - direta: o injetor é montado no cabeçote do motor e entrega o combustível diretamente dentro do cilindro. Esse sistema já é utilizado em automóveis, e apresenta características interessantes, reduzindo emissões de poluentes e consumo de combustível. Tal sistema requer pressões elevadas de alimentação de combustível, maiores que 100 bar.
- Dosagem do fluxo:
  - fluxo contínuo: o combustível é fornecido de forma contínua, e a variação da quantidade de combustível é determinada pela posição do obturador no bico injetor. Em desuso.
  - fluxo intermitente: o combustível é fornecido utilizando o bico injetor como válvula abre/fecha. A quantidade é determinada pelo tempo em que é aplicado o comando de abertura do obturador. É o sistema utilizado atualmente.

### 2.4.3. Alimentação de ar

De acordo com a revisão dos princípios de funcionamento do motor realizada na seção anterior, a energia liberada durante a combustão é função da quantidade de combustível queimado. Para propiciar a combustão, a proporção de massas entre combustível e comburente deve estar dentro da região próxima da estequiométrica. Isso implica que a proporção de ar e combustível na mistura não pode ser grandemente alterada e, portanto, a limitação da potência nos motores de ciclo Otto é feita através da restrição da massa de ar admitida pelo motor. A massa de ar admitida a cada ciclo pode ser modificada através da variação da restrição do fluxo de ar no coletor de admissão, que reduz a pressão do ar admitido.

A figura 2-10 mostra as curvas de pressão em função do volume da câmara de combustão no ciclo Otto, comparando o funcionamento do motor em plena carga (borboleta totalmente aberta) e em carga parcial (borboleta parcialmente aberta).

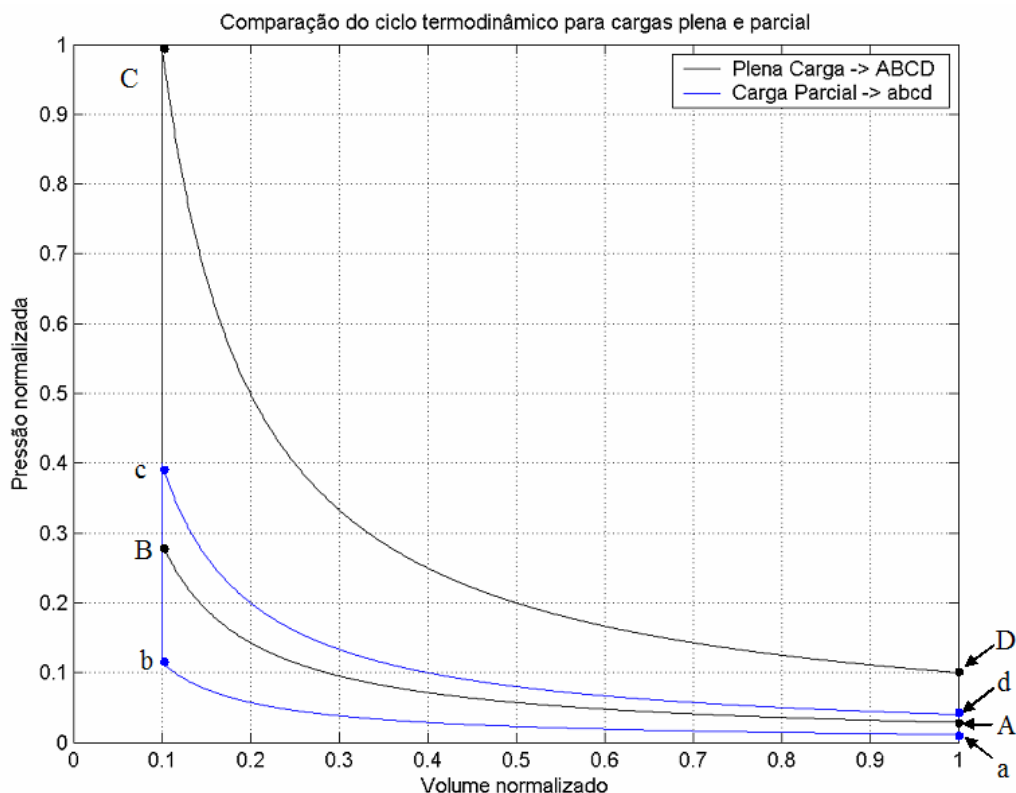


Figura 2-10: Diagrama  $P \times V$  para cargas plena e parcial.

As trajetórias representam apenas ciclos de compressão e expansão do motor, sendo que a compressão inicia nos pontos  $A$  e  $a$ . Os pontos  $ABCD$  delimitam a trajetória da pressão em

função do volume para o motor em plena carga, enquanto que os pontos *abcd* delimitam a trajetória da pressão para carga parcial.

Observa-se que a trajetória *ABCD* inicia com pressão mais elevada que *abcd*, assim como a área da trajetória *ABCD* também é maior. Isso demonstra que o controle sobre a energia entregue no ciclo de combustão pode ser feito através da limitação da massa de ar no interior do cilindro no início da compressão.

Para restringir vazão da entrada de ar no motor, são utilizadas válvulas de abertura variável, que impõem resistência ao fluxo de ar e reduzem a pressão do ar admitido. A válvula mais amplamente utilizada é do tipo borboleta, que possibilita impor baixa perda de carga quando totalmente aberta e grande perda de carga quando totalmente fechada. A válvula do tipo borboleta também é construtivamente simples e de fácil fabricação.

Os sistemas eletrônicos de gerenciamento possibilitaram o controle em malha fechada da velocidade angular do motor através da atuação na entrada de ar do motor. Uma das aplicações típicas desse controle está em regime dito de *marcha lenta*. O controle de *marcha lenta* é ativado quando cessam os comandos de acelerador por parte do usuário. O controle deve evitar a parada do motor quando são utilizados acessórios do veículo, como a direção assistida ou o compressor do sistema de ar condicionado, que exigem uma quantidade significativa de potência durante seu funcionamento.

O atuador que regula a vazão de ar colabora na função de controle de velocidade angular, permitindo variar o torque fornecido pelo motor. Os atuadores de entrada de ar podem ser classificados considerando:

- grau de regulação:
  - parte do fluxo: os primeiros sistemas disponíveis para controle de velocidade regulavam a passagem de ar apenas para a borboleta na posição de repouso. São os sistemas do tipo *bypass* que usam válvulas de gaveta, ou do tipo mudança de fim-de-curso que alteram a posição de repouso da borboleta.
  - todo o fluxo: atuam diretamente na válvula borboleta, para qualquer ângulo de abertura. O sistema atualmente utilizado em sistemas *drive-by-wire*, onde não existe ligação mecânica entre o pedal e a borboleta.
- tipo de atuador:
  - motores de passo: utilizados pela simplicidade de comando. Sua posição pode ser definida de forma incremental de acordo com os comandos

enviados. São menos suscetíveis a perturbações de carga, porém, não existe garantia de que o acelerador sempre estará na posição desejada, principalmente quando se exige deslocamentos rápidos.

- motores de corrente contínua: são mais velozes que os motores de passo, porém, necessitam da medição da posição angular do acelerador, pois, são extremamente suscetíveis a perturbações de carga.
- tipo de controle:
  - em malha aberta: os comandos de variação de posição para a passagem de ar são emitidos sem averiguar se a posição foi realmente alcançada.
  - em malha fechada: os comandos de variação de posição para a passagem de ar são emitidos e corrigidos de acordo com a medição da posição real do atuador.

## **2.5. Central de gerenciamento eletrônico**

Com o advento da eletrônica embarcada, foi possível conceber equipamentos que permitem o realizar a dosagem da mistura de ar e de combustível, como alternativa ao carburador. Os bicos injetores permitem modular a quantidade de combustível de forma independente da admissão de ar, e mesmo assim, conseguir regular de forma mais exata a proporção entre ar e combustível do que seria possível em um carburador. O componente responsável por determinar a quantidade de combustível é a central de gerenciamento eletrônico.

As operações realizadas para determinar a quantidade de combustível podem ser divididas em:

- estimativa da vazão mássica de ar: pode ser realizada diretamente a partir de um sensor de vazão mássica, ou indiretamente a partir da velocidade angular do motor e de alguma outra informação de carga do motor,
- cálculo da vazão mássica de combustível: é determinada de acordo com a estimativa de vazão mássica de ar, e corrigida de acordo com a condição de funcionamento do motor e as condições do ambiente onde se encontra o motor,
- cálculo da largura de pulso de comando do bico injetor: nos sistemas utilizados hoje em dia, o bico injetor é utilizado como válvula totalmente aberta ou fechada, e

a quantidade de combustível injetada é função do período em que ele permanece aberto.

- estimativa da relação ar-combustível real: baseada nas leituras do sensor de concentração de oxigênio no escapamento, permitindo detectar desvios da relação real,
- correção do período do pulso de injeção: a partir do erro entre o valor real e o valor desejado, são feitos ajustes em malha fechada para o valor do período de injeção.

Todavia, a determinação da quantidade correta de combustível está sujeita às limitações do sistema como um todo, pois os cálculos de dosagem são realizados com base na leitura de sensores para estimar as condições de funcionamento do motor e do ambiente. Os sensores são sistemas dinâmicos, e apresentam limitações na representatividade das leituras, a saber:

- os sensores não apresentam o valor real das grandezas medidas, apenas uma aproximação,
- os valores de leituras apresentadas são obtidos com atraso,
- os sensores atuam como filtros, cortando as altas frequências,
- os sensores estão sujeitos à perda da calibração,
- os sensores nem sempre podem ser colocados na melhor posição para medir a grandeza desejada.

## **2.6. Bancadas de testes**

As bancadas de teste têm como principal objetivo fornecer um torque para interagir com o motor. O uso das bancadas de teste permite recriar comportamentos de uso do motor em condições controladas para calibrar, monitorar e avaliar as características de seu funcionamento. Existem diversos tipos de bancadas de teste disponíveis, e um resumo será apresentado a seguir.

As bancadas podem ser classificadas segundo suas características construtivas e suas capacidades, sendo que a escolha de cada tipo de bancada depende da aplicação para a qual se considerou o uso da bancada. Elas podem ser escolhidas em função de:

- Tipo de carga:
  - Estática: dissipa a potência do motor, de forma controlada ou não, permitindo atingir um valor arbitrário para a velocidade angular do motor,

que pode ser variável ou fixa conforme a necessidade. Tipicamente utilizada para testes de calibração e de durabilidade do motor,

- Dinâmica: não dissipa a potência do motor durante o ensaio. Consiste em uma carga inercial que armazena a potência fornecida pelo motor através do aumento de sua energia cinética rotacional. O monitoramento da aceleração angular do motor acoplado à massa inercial fornece uma estimativa para torque do motor. Tipicamente utilizados para avaliação de desempenho do motor. Os ensaios realizados por esses equipamentos são tipicamente mais breves que os de carga estática. A energia cinética acumulada deve ser dissipada após o término do ensaio.
- Grau de controle da carga:
  - Sem controle: a carga imposta ao motor é alterada em função da velocidade angular do conjunto, conforme a característica do equipamento utilizado para dissipar a potência. Um exemplo clássico são as bombas centrífugas onde a potência requerida aumenta como função da velocidade angular,
  - Parcialmente controlada: a carga imposta ao motor pode ser alterada dentro de limites impostos pelo funcionamento do equipamento,
  - Controlada: permite determinar a carga imposta ao motor, ou a velocidade angular do motor. Podem ser utilizadas bombas de deslocamento positivo onde se controla a restrição de passagem de fluido, geradores elétricos, freios elétricos ou ainda motores elétricos. A última opção permite inclusive a imposição de torques positivos ao motor, para simular a inércia de um veículo, por exemplo.
- Funções de controle oferecidas:
  - Controle de torque: é aplicado um valor de torque arbitrário, independente da velocidade angular do motor. Utilizado principalmente na avaliação de desempenho e de emissão de poluentes de motores para homologação de motores.
  - Controle de velocidade: modula o torque aplicado ao motor de forma automática para manter uma velocidade angular constante. Utilizado principalmente na calibração de motores.
  - Reprodução de condições de uso: permite reproduzir as condições reais de uso do motor, incluindo variações climáticas e cargas com rápidas variações

de torque. São os sistemas mais completos de simulação de uso de motores em ambiente controlado atualmente disponíveis.

- Tipo de ensaios que podem ser realizados:
  - Estáticos: com o motor fixado em rotações determinadas, realizando as medições em intervalos de velocidade angular. Permite o levantamento das características estáticas do motor, por exemplo, testes de vazão mássica de ar na admissão, calibração de mapas de injeção e de ignição, curvas de torque, de potência e consumo específico do motor.
  - Dinâmicos: permite a avaliação do comportamento do motor durante variações de velocidade angular para avaliar também os transientes de aceleração e desaceleração, permitindo reproduzir condições similares ao uso do motor em veículos, além dos ensaios estáticos.
- Duração dos ensaios:
  - Curtos: típico de calibrações e avaliação de desempenho do motor, onde normalmente o equipamento exige um tempo de espera mínimo entre ensaios para resfriamento,
  - Longos: tipicamente utilizados para avaliação de características de durabilidade do motor,

Idealmente, a escolha da bancada de testes deve ser realizada através da enumeração dos diferentes tipos de ensaios que se pretende realizar e das características do motor a ser estudado. Esse levantamento deve ser analisado em conjunto com a disponibilidade de recursos de tempo, de capital, de mão-de-obra e de espaço físico para determinar qual a bancada ótima para a aplicação considerada.

## **2.7. Sistemas de aquisição de dados**

O sistema de aquisição de dados é responsável por amostrar variáveis de funcionamento do motor e do ambiente que o cerca, e armazenar esses valores de forma tal que seja possível proceder à análise posterior desses valores. Atualmente, tais sistemas são baseados em placas de aquisição micro controladas, que realizam a aquisição e a conversão dos dados para o formato binário. O armazenamento dos dados é feito na forma digital, pela facilidade de análise posterior. Os sistemas de aquisição de dados podem ser qualificados de acordo com suas características, por exemplo:



- a portabilidade do equipamento: determinada principalmente pelas dimensões físicas dos equipamentos de aquisição e armazenamento,
- o armazenamento de dados: o armazenamento ser realizado num dispositivo de armazenamento de massa, como cartões de memória, ou diretamente num computador,
- o número de canais de entrada: os canais são definidos como as variáveis que podem ser medidas simultaneamente, e as variáveis podem ser do tipo analógico ou digital,
- a frequência de amostragem: o número de amostras coletadas por segundo, determina a maior frequência de sinal que pode ser detectada pelo sistema de aquisição.

Os sistemas de aquisição de dados estão sujeitos a limitações na quantidade e na qualidade das grandezas que podem medir:

- os valores fornecidos pelos sensores são representações das grandezas físicas que se deseja monitorar,
- os valores recebidos pela placa são convertidos para o formato digital, o que introduz a quantificação nos valores representáveis e possíveis erros de conversão dos valores,
- os sensores, assim como a placa de aquisição, conseguem apenas captar sinais de baixa frequência, atuando como filtro passa-baixas,
- o espaço de memória disponível limita o número de amostras consecutivas que podem ser armazenadas.

Do ponto de vista de implantação dos sistemas de aquisição, a escolha das características do sistema a ser utilizado é uma ponderação entre: a fidelidade e quantidade de dados a coletar e os recursos disponíveis para a instalação de tal sistema. Um sistema com mais recursos, maior fidelidade, que permite maior quantidade e frequência nas medições necessita de mais tempo para a instalação e é mais oneroso.

### 3. MODELOS DO SISTEMA

Nesse capítulo são apresentados os modelos e as simplificações utilizadas para estudar o ambiente de testes com o sistema de gerenciamento, o motor e o sistema de aquisição de dados, em função do efeito que as variáveis passíveis de atuação produzem sobre as demais grandezas que estão disponíveis para medição através do sistema de aquisição de sinais. São apresentadas as descrições dos modelos propostos para o motor, para os atuadores e para o sistema de aquisição de dados.

A figura 3-1 apresenta o diagrama de blocos simplificado do ambiente de desenvolvimento. Os blocos *PC\_1 in* e *PC\_1 out* se referem ao canal de comunicação serial estabelecido com a interface de comunicação da central de gerenciamento e o computador 1. No computador o usuário do sistema de gerenciamento eletrônico tem à sua disposição uma interface gráfica para emitir comandos de configuração para a central eletrônica. A saída do computador 1 envia os comandos de modificações emitidos pela interface, com os ajustes a serem aplicados nos parâmetros e variáveis de referência na central de gerenciamento. O bloco *PC\_2* refere-se à recepção dos dados enviados pela placa de aquisição através de comunicação serial para outro computador. Para os ensaios realizados, foram utilizados efetivamente dois computadores distintos para as tarefas de comunicação com a central não interferirem com a tarefa de coleta de dados. O bloco *Placa Aquisição 300Hz* representa a placa de aquisição de sinais cuja frequência de amostragem foi definida em 300Hz. O bloco *ECU* se refere à central de gerenciamento eletrônico. A central gera os sinais aplicados aos atuadores instalados no motor, denotados pelos blocos *Bico injetor*, *Servo+borboleta*, e *Conjunto ignição*.

O *Bico injetor* recebe o sinal de comando do bloco *ECU*, o combustível pressurizado do bloco *Alimentação de Combustível* e pressão de ar do *Coletor Admissão*, o ambiente onde é injetado o combustível. O bloco *Servo+borboleta* contém a dinâmica do atuador e a característica de resistência à passagem do ar em relação à posição angular da válvula do acelerador. Fisicamente, o bico injetor e a válvula do acelerador com o servo motor são montados no coletor de admissão.

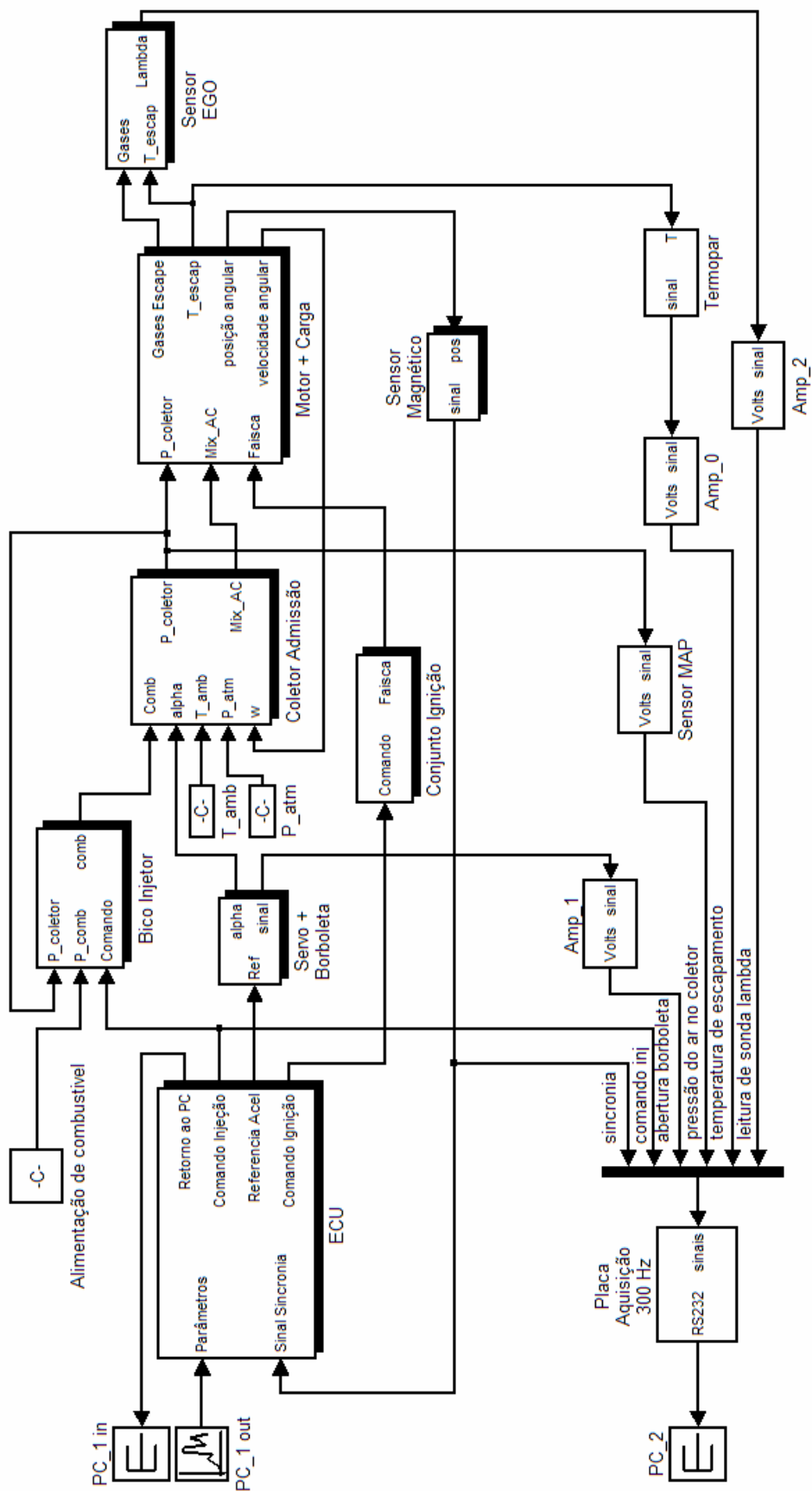


Figura 3-1: Diagrama de blocos simplificado do ambiente de desenvolvimento.

O bloco *Coletor Admissão* representa as características dinâmicas da pressão, temperatura, densidade, e massa associadas ao fluxo de massa de ar e combustível que entra no motor. A massa de ar admitida a cada novo ciclo do motor depende de diversos fatores, como a pressão e a temperatura do ar ambiente e a velocidade angular do motor. A temperatura e pressão do ar atmosférico são consideradas como interferências no sistema de controle que influenciam na saída do processo.

O bloco *Conjunto Ignição* representa a bobina, o cabo e a vela de ignição instalada no motor. O bloco *motor+carga* representa a característica dinâmica de variáveis de interesse do motor como a velocidade angular, a temperatura e a concentração de oxigênio nos gases de escapamento. Esse bloco recebe como entradas a pressão da mistura no coletor, a proporção entre ar e combustível da mistura aspirada e o ângulo de disparo de ignição em relação ao ponto morto superior (PMS).

### **3.1. Dinâmica do motor**

O motor pode ser descrito considerando uma abordagem sistêmica, ressaltando suas características dinâmicas e as variáveis de entradas e saídas. As variáveis de entrada são definidas como as grandezas passíveis de alteração pelos atuadores instalados no motor: a massa de ar, a massa de combustível e o instante de início da ignição. Como variáveis de saída do sistema, podem ser definidas grandezas como a velocidade angular do motor, a aceleração angular, as temperaturas de escapamento, de cabeçote, etc. O torque líquido é aplicado a uma carga, e conforme o tipo de carga resulta a variação da velocidade angular do conjunto. Além da velocidade angular, os gases de escapamento contêm informações como a temperatura e a quantidade de oxigênio, que com a ajuda de sensores adequados permitem inferir a condição de funcionamento do motor. As informações de temperatura de escapamento, concentração de oxigênio, posição e velocidade angular do virabrequim do motor podem ser utilizadas como medidas de saída do processo e utilizadas para controle em malha fechada do motor. A concentração do oxigênio no escapamento pode ser utilizada como informação de realimentação para minimizar a emissão de poluentes, por exemplo. A temperatura de escapamento pode ser definida como parâmetro de proteção do motor, pois permite inferir sobre as temperaturas da válvula de escape e do topo do pistão, dois dos componentes mais suscetíveis a falhas por fadiga térmica. Os

instantes de início para a injeção de combustível e o início da ignição são definidos com relação à posição angular do virabrequim. A velocidade angular do motor é uma das variáveis clássicas de controle em motores estacionários, em que o objetivo é manter um regime de funcionamento constante.

Para manter o motor em funcionamento, é necessário manter a relação entre massa de ar e combustível em uma região próxima à estequiométrica para que seja possível iniciar a combustão da mistura. Portanto, a quantidade de combustível injetada deve ser ajustada a cada mudança de fluxo de entrada de ar, que depende da abertura no acelerador e da velocidade angular do motor.

De forma semelhante, o ângulo de disparo de ignição precisa ser definido dentro de uma faixa, que muda conforme a velocidade angular, a quantidade de combustível e o ângulo de abertura do acelerador, para evitar danos ao motor por excesso de temperatura e pressão durante a combustão. Esse comportamento indica uma forte correlação entre as variáveis de atuação no motor, e exige que os ensaios sejam realizados malha fechada.

O modelo deve apresentar as entradas de controle que são a posição angular do acelerador, a duração do comando de injeção de combustível e o ângulo de início da ignição em relação ao ponto morto superior, e sua interação com a velocidade angular do motor. Porém, a correlação entre as variáveis de atuação dificulta a obtenção de modelos, pois a identificação das relações entre entradas e saídas é pouco evidente.

Modelando motor e coletor de admissão separadamente, é possível escolher outro conjunto de variáveis menos correlacionadas para servirem de entrada para o motor. A proposta de modelo é ilustrada pelo diagrama de blocos da figura 3-2.

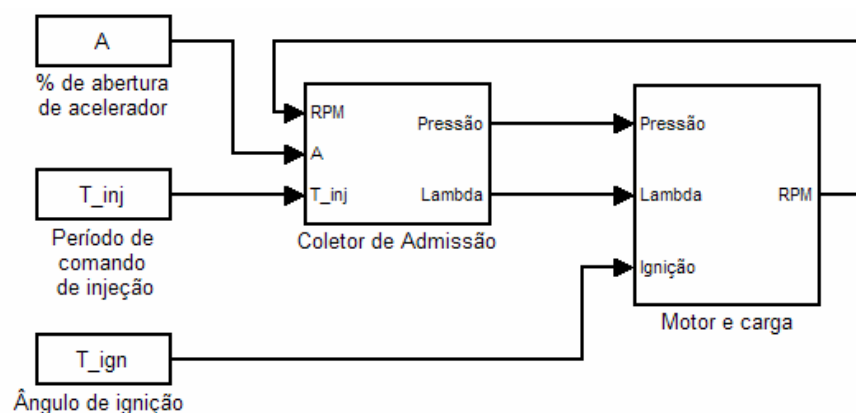


Figura 3-2: Diagrama de blocos proposto como modelo do motor e do coletor de admissão.

O coletor de admissão muda o espaço de estados de entrada do motor, substituindo a abertura de acelerador e a duração de pulso de injeção de combustível por outras duas entradas: a relação entre ar e combustível e a pressão do coletor de admissão. A pressão pode ser medida por um sensor no coletor de admissão, a jusante do acelerador. A pressão de coletor é diretamente proporcional à quantidade de mistura admitida pelo cilindro, conforme descrito pela lei dos gases ideais, na seção 2.1.3.

A concentração relativa entre ar e combustível pode ser inferida através do uso um sensor de oxigênio para os gases de escapamento.

A separação do modelo em dois submodelos, e o uso do novo conjunto de variáveis, se apóia nas seguintes afirmativas:

- no processo da combustão interna descrito pelo ciclo Otto, a relação ar-combustível e a pressão no interior do cilindro estão diretamente relacionadas com a pressão e temperatura máxima atingida dentro da câmara de combustão. Esses dois fatores são determinantes para o rendimento térmico do ciclo do motor,
- o rendimento térmico de cada ciclo indica a quantidade de energia transformada pela combustão, e está relacionada diretamente ao torque bruto produzido pelo motor, assim como a parcela de energia a ser dissipada como calor pelo motor.

Portanto, o primeiro modelo relaciona a posição angular do acelerador e a injeção de combustível com a pressão de ar de coletor e a relação ar combustível. O segundo relaciona as saídas do primeiro com o torque bruto produzido pelo motor. O somatório do torque bruto com os torques resistentes fornece o torque líquido, que provoca a variação da velocidade angular no virabrequim.

### 3.1.1. Coletor de admissão

A figura 3-3 apresenta o diagrama de blocos do modelo para o coletor de admissão.

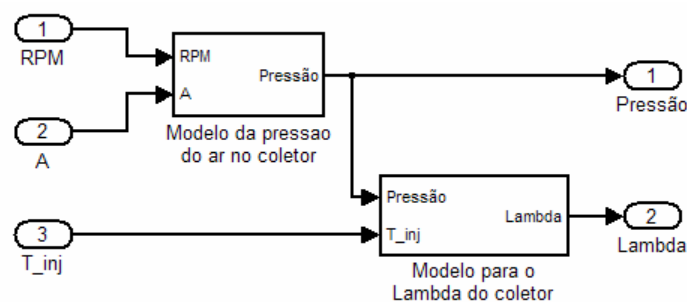


Figura 3-3: Diagrama de blocos do modelo do coletor de admissão.

O modelo relaciona o ângulo de abertura da borboleta do acelerador, a velocidade angular do motor e a duração do comando de injeção com a pressão do ar no coletor de admissão e a concentração relativa entre ar e combustível para a mistura aspirada pelo motor.

Devido a limitações nas medições disponíveis, o modelo reproduz somente as características estáticas entre as variáveis de entrada e de saída. No motor em estudo, as dimensões físicas do coletor de admissão são reduzidas e fenômenos como a criação de película de combustível no coletor tem pouco efeito sobre o combustível efetivamente admitido pelo cilindro durante mudanças de posição angular do acelerador, não sendo corretamente detectadas pelo sistema de aquisição utilizado.

O modelo do coletor pode ser definido por um conjunto de equações que reproduzem os comportamentos estáticos da saída em relação às entradas. As funções são:

$$\begin{aligned} p &= g(\alpha, \omega) \\ \lambda &= f(p, T_{inj}) \end{aligned} \quad (3-1)$$

sendo:

$\lambda$ : relação ar-combustível normalizada em relação ao valor estequiométrico

$p$ : pressão do coletor de admissão [mbar]

$\alpha$ : abertura percentual da borboleta do acelerador [%]

$\omega$ : velocidade angular do motor [RPM]

$T_{inj}$ : período do pulso de injeção de combustível [ $\mu$ s]

O modelo será obtido encontrando a forma e ajustando as funções  $g$  e  $f$  da equação 3-1 de acordo com os dados coletados nos ensaios descritos na seção 5.3.

### 3.1.2. Motor e carga

A bancada de testes utilizada consiste em um ventilador centrífugo e possui controle limitado sobre a variação no torque exigido do motor. Devido às limitações de tempo e recursos não foram instalados instrumentos que permitissem medir o torque real produzido pelo motor. Sendo assim, o modelo do motor foi obtido incorporando a carga da hélice. Sabe-se que a característica da carga é de aumento do torque necessário em função do aumento da velocidade angular. Portanto, a potência exigida do motor também aumenta em função da velocidade angular.

Para capturar variações na potência do motor, a variável de saída do sistema foi definida como sendo a velocidade angular que já era medida para uso da central de gerenciamento eletrônico. A figura 3-4 apresenta o diagrama de blocos proposto para o modelo do motor com a carga da bancada de testes, utilizando como entradas os valores de pressão do ar e  $\lambda$  da mistura ar-combustível no coletor de admissão e de ângulo de comando de ignição.

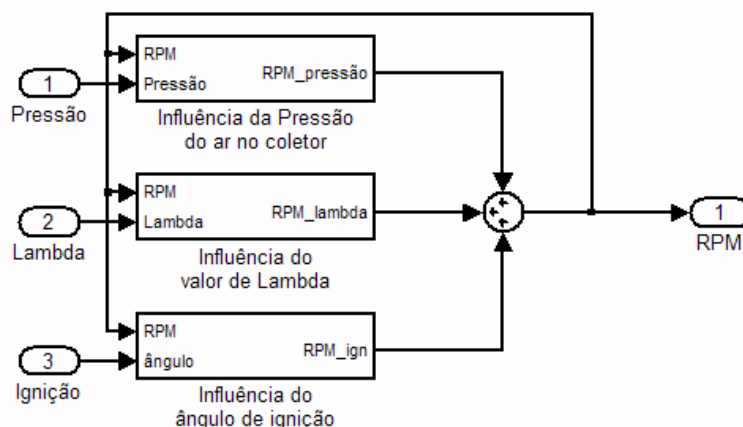


Figura 3-4: Diagrama de blocos do modelo para motor e carga.

As influências das 3 entradas são consideradas separadamente, supondo que o motor possui características lineares que permitem identificar a influência de cada entrada de forma independente e somar os resultados para obter o modelo completo.

## 3.2. Dinâmica dos atuadores

Conforme foi citado anteriormente, o objetivo aqui é definir o comportamento dinâmico dos componentes utilizados no ambiente de desenvolvimento do sistema de gerenciamento eletrônico.

### 3.2.1. Injeção de combustível

O sistema de alimentação de combustível é um sistema mecânico e, portanto, possui uma dinâmica de resposta relacionada a suas dimensões físicas e ao acionamento elétrico utilizado para seus componentes.

O componente do sistema de alimentação de combustível de maior interesse do ponto de vista dinâmico é o bico injetor, cujo fluxo de combustível pode ser definido de forma



simplificada como função da duração do sinal de tensão aplicado nos terminais do solenóide que movimenta o obturador:

$$v = (f(\Delta p) \cdot (\theta - g(V)) + v_0), \quad \theta > g(V) \quad (3-2)$$

sendo:

$v$ : volume de combustível injetado;

$V$ : tensão do pulso aplicado ao bico injetor;

$\Delta p$ : diferença de pressão entre alimentação de combustível e coletor de admissão;

$f(\Delta p)$ : define interação de  $\Delta p$  sobre a vazão de combustível no bico injetor;

$g(V)$ : define o período necessário ao estabelecimento e extinção do fluxo de combustível durante a abertura e o fechamento do bico injetor;

$v_0$ : volume de combustível injetado durante a abertura e fechamento do bico injetor;

$\theta$ : período do pulso de tensão aplicado.

Dado que a tensão do pulso e a diferença de pressão na entrada e na saída do bico sejam constantes, o volume de combustível injetado aumenta linearmente com o período do pulso. A aproximação é válida quando o período do pulso aplicado é superior ao tempo necessário para abrir e fechar o bico injetor, ou seja, para  $\theta > g(V)$ . Essas características foram verificadas em ensaios do sistema de alimentação de combustível omitidos nesse trabalho.

### 3.2.2. Entrada de ar

O atuador escolhido para acionar a válvula borboleta é um motor de corrente contínua com malha de controle de posição angular, utilizando um sensor integrado, do tipo divisor resistivo, para medir a posição de seu eixo.

A dinâmica do atuador da borboleta que restringe a entrada de ar no motor pode ser aproximada por uma dinâmica de segunda ordem com um tempo morto de resposta, que foi verificada em ensaios omitidos nesse trabalho. O modelo dinâmico escrito no domínio da frequência utilizando a Transformada de Laplace é dado por:

$$\alpha(s) = \frac{k e^{\theta s}}{(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1)} \alpha_{ref}(s) \quad (3-3)$$

*sendo :*

$\alpha_{ref}$  : *referência de posição angular para o atuador do acelerador [graus];*

$\alpha$  : *posição angular para o atuador do acelerador [graus];*

$\theta$  : *período a mudança da referência e o começo de alteração na posição angular do eixo do atuador [segundos];*

$\tau_1, \tau_2$  : *constantes de tempo associadas à velocidade de resposta do atuador [segundos];*

$s$  : *variável da Transformada de Laplace;*

### **3.2.3. Ignição por faísca**

O circuito escolhido para a ignição utiliza o princípio de colapso de campo para a geração da faísca. O comportamento dinâmico do sistema de ignição é determinado pela característica de carga do indutor, descrita na seção 2.4.1. No âmbito desse trabalho, a característica fundamental do sistema de ignição é o tempo transcorrido entre o comando para o disparo e a passagem de corrente entre os eletrodos da vela de ignição. O tempo de resposta do circuito de acionamento é a variável a ser medida para levantar a característica do sistema de ignição, que pode ser modelado do ponto de vista dinâmico como um atraso de transporte.

## **3.3. Sistema de aquisição de dados**

A modelagem das características dinâmicas do sistema de aquisição necessita de um equipamento de calibração com capacidade superior ao equipamento utilizado. Um sistema de aquisição com tais capacidades não estava disponível para aferir o equipamento construído durante seu funcionamento.

No entanto, é possível afirmar que os sinais são coletados usando filtros passa-baixas com frequência de corte muito superior à da faixa de interesse das medições. Por isso, os valores de conversão digital são tratados como um ganho estático e uma quantização aplicada aos valores analógicos de entrada. Além disso, o sistema de aquisição foi projetado para adquirir 300 amostras por segundo, definindo o período de amostragem da discretização dos sinais.

## 4. O AMBIENTE DESENVOLVIDO

Aqui é descrito o processo e o ambiente de ensaio desenvolvido. A descrição começa com a apresentação das características originais do motor, e em seguida as mudanças realizadas em seus componentes para a utilização do sistema de gerenciamento eletrônico.

O sistema de gerenciamento eletrônico proposto utiliza uma central de gerenciamento eletrônico para centralizar as informações de sensores e gerar os sinais para os atuadores. A descrição dessa central é feita em duas etapas, apresentando a arquitetura da eletrônica e da programação separadamente. A seguir é apresentada também a interface gráfica do usuário, que permite configurar os parâmetros de funcionamento da central.

O sistema de aquisição de dados e a bancada utilizada serão descritos no final, encerrando a apresentação dos equipamentos utilizados.

### 4.1. Características originais do motor

O processo a ser controlado consiste em um motor de combustão interna, que foi projetado originalmente para servir de fonte de potência em pequenos veículos cortadores de grama. A tabela 4-1 aponta as principais características do motor original.

Tabela 4-1: Características do motor original.

Capacidade cúbica	197 cm <sup>3</sup>
Número de cilindros	Um
Rotação de trabalho	Aprox. 3000 [RPM]
Alimentação	Aspirada, carburação
Ignição	Bobina integrada, ângulo de ignição fixo
Potência nominal	6,5 [hp]

A figura 4-1 apresenta uma foto do motor original com a tampa de proteção do volante de inércia removida. No motor em questão, a montagem do virabrequim expõe duas pontas de eixo, uma para acoplamento do volante de inércia e outra para acoplamento à carga. Em uma das pontas de eixo do virabrequim é acoplado o volante de inércia e, sobre o volante, o ímã de ignição. A bobina de ignição é parafusada ao bloco do motor em uma posição própria para deixar pouco espaço entre o ímã e o núcleo da bobina.

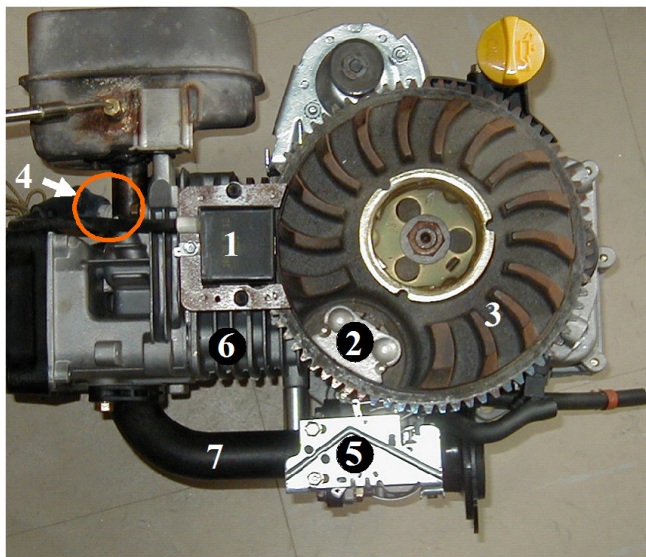


Figura 4-1: Foto do motor original sem a proteção do volante de inércia.

O motor original conta com sistema de ignição próprio integrado, onde a bobina de ignição (1) do tipo autotransformador é excitada por um ímã (2) acoplado ao volante de inércia (3) do motor. O enrolamento secundário da bobina de ignição é ligado a uma vela de ignição (4) montada no cabeçote do motor, com os eletrodos dentro da câmara de combustão. A alimentação de ar e de combustível para o motor é realizada pelo carburador (5) e entra no cilindro (6) passando pelo coletor de admissão (7).

Com o motor em funcionamento, a velocidade angular do volante, ao qual o ímã é solidário, produz uma variação do campo magnético em frente à bobina. A bobina de ignição é montada próxima ao volante de inércia para diminuir a distância entre seu núcleo e o ímã montado no volante. A passagem do ímã em frente à bobina cria a variação de fluxo magnético que gera corrente elétrica na bobina. Essa corrente alternada produzida no enrolamento primário induz corrente no enrolamento secundário produzindo tensões elevadas. A alta tensão é aplicada nos eletrodos da vela de ignição estabelecendo um arco voltaico que inicia a combustão da mistura de ar e combustível na câmara de combustão. Um diagrama de funcionamento do sistema de ignição original pode ser vista na figura 4-2.

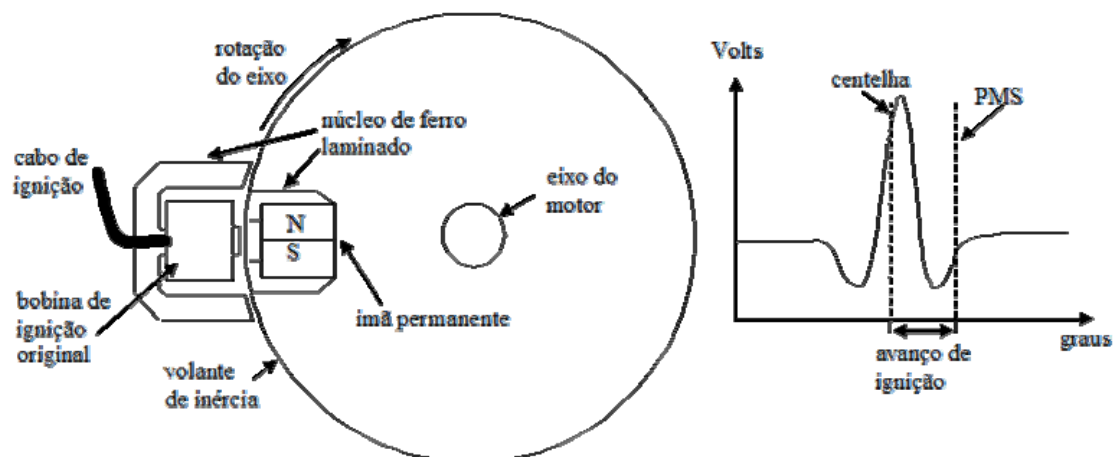


Figura 4-2: Diagrama de funcionamento do sistema de ignição original.

O motor utilizado no trabalho possui ainda uma bobina secundária, montada adjacente à bobina de ignição. Ela foi projetada para recarregar uma bateria no caso de aplicações com partida elétrica do motor e para o acionamento de outros equipamentos elétricos (como mostradores ou luzes de painel).

## 4.2. Alterações no motor

Neste trabalho foram previstas exclusivamente adaptações externas para o uso do sistema de gerenciamento eletrônico, visando melhorias no desempenho do motor.

Sendo assim, as mudanças e adaptações foram feitas principalmente na alimentação de ar e de combustível e na ignição. Isso permitiu manter suas características originais evitando alterar, por exemplo, o comando de válvulas e a taxa de compressão. As comparações entre carburador e sistema de gerenciamento eletrônico podem, dessa forma, ressaltar as modificações no comportamento do motor em função apenas do sistema de alimentação utilizado. A figura 2-1 mostra a foto do motor após as alterações.

O coletor de admissão e o carburador foram substituídos pelo novo coletor de admissão com um bico injetor (2) e um atuador para o acelerador (3). O sistema de ignição original foi substituído por um sistema de ignição por colapso de campo transistorizado que permite variar a posição angular do virabrequim onde é comandada a ignição.

Foram instalados sensores para monitorar algumas variáveis relevantes na obtenção do modelo dinâmico do motor, por exemplo, um sensor de pressão do ar no coletor de admissão.

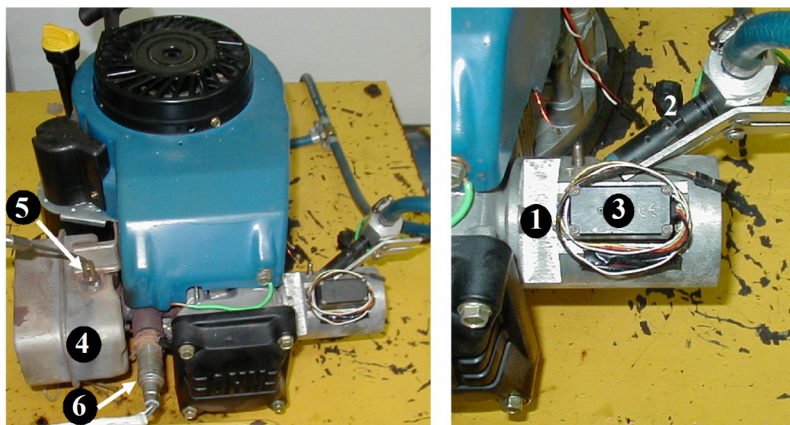


Figura 4-3: motor e componentes do sistema de gerenciamento.

O escapamento (4) conta com um termopar do tipo K (5) para medir a temperatura dos gases de escapamento e conta também com uma sonda  $\lambda$  (6) do tipo bipolar (ou de banda estreita) para estimar a quantidade relativa de oxigênio nos gases do escapamento.

Para dispor de maior exatidão na medição de posição angular do volante de inércia, foi instalado um sensor de efeito *Hall* bipolar, adjacente à bobina de recarga do motor. A figura 4-4 ilustra a montagem do sensor, do ímã e do volante de inércia.

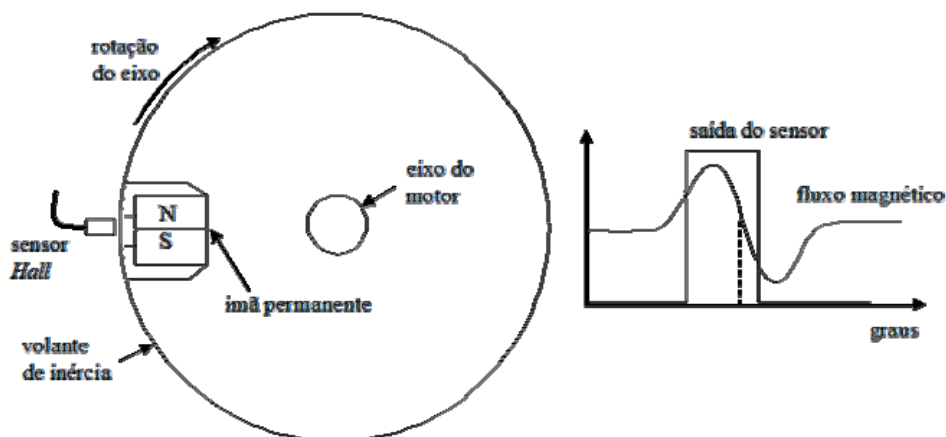


Figura 4-4: montagem do sensor magnético do volante de inércia.

Cada revolução do eixo do motor produz um pulso de tensão. A frequência dos pulsos é diretamente proporcional à velocidade angular do motor.

### 4.2.1. Sistema de alimentação de ar e combustível

No contexto de motores a alimentação de ar e de combustível será denotada deste ponto em diante simplesmente pelo termo *alimentação*, que subentende a entrada de ar e de combustível no motor utilizados na combustão. A alimentação do motor com o sistema de gerenciamento eletrônico é feita através de um novo coletor de admissão onde estão montados os atuadores de injeção de combustível (bico injetor) e de regulagem de entrada de ar (borboleta do acelerador com atuador elétrico).

No novo coletor admissão foi instalado também um sensor para monitorar a pressão do ar entrando no motor, para efeitos de levantamento das características para modelagem do motor e do coletor de admissão.

A alimentação do motor depende da dosagem do combustível e do ar que serão discutidos separadamente a seguir.

- Subsistema de alimentação de combustível:

Ele tem a função de fornecer combustível ao motor de acordo com as cargas e requisitos de controle a ele impostos.

Ele é constituído por: um reservatório de combustível, um filtro, uma bomba, uma válvula calibrada de alívio de pressão, um manômetro analógico e um bico injetor com acionamento elétrico. O sistema de alimentação de combustível foi montado com componentes automobilísticos disponíveis no mercado, com exceção do reservatório de combustível que é próprio de pequenos motores mono-cilíndricos. O manômetro de pressão de combustível permite monitorar essa variável, e desta forma verificar alterações significativas nas condições adequadas para o funcionamento do bico injetor. A válvula de alívio de pressão é montada entre a bomba de combustível e o bico injetor de modo a manter constante a diferença de pressão a montante e a jusante do bico injetor. A diferença de pressão imposta ao bico é considerada constante e sem perturbações, pois a bomba elétrica e o regulador de pressão garantem um fluxo com pressão constante de combustível para alimentar o bico injetor.

O bico injetor utilizado tem um funcionamento do tipo válvula abre/fecha. O volume de combustível injetado no motor é obtido integrando o fluxo de combustível no período em que o bico permanece aberto. O aumento do volume de combustível injetado é obtido através do aumento no período de abertura. Por se tratar de um bico de comando elétrico, a abertura do bico injetor é realizada aplicando a tensão necessária durante o período

desejado. Dado que o bico injetor é um sistema dinâmico, existem períodos significativos para abertura e fechamento, e o fluxo de combustível nesses períodos é considerado transiente. Procedeu-se a um ensaio de calibração com o sistema de alimentação para verificar a característica de volume de combustível injetado em relação ao período do pulso de comando. A figura 4-5 mostra a curva de calibração do bico injetor.

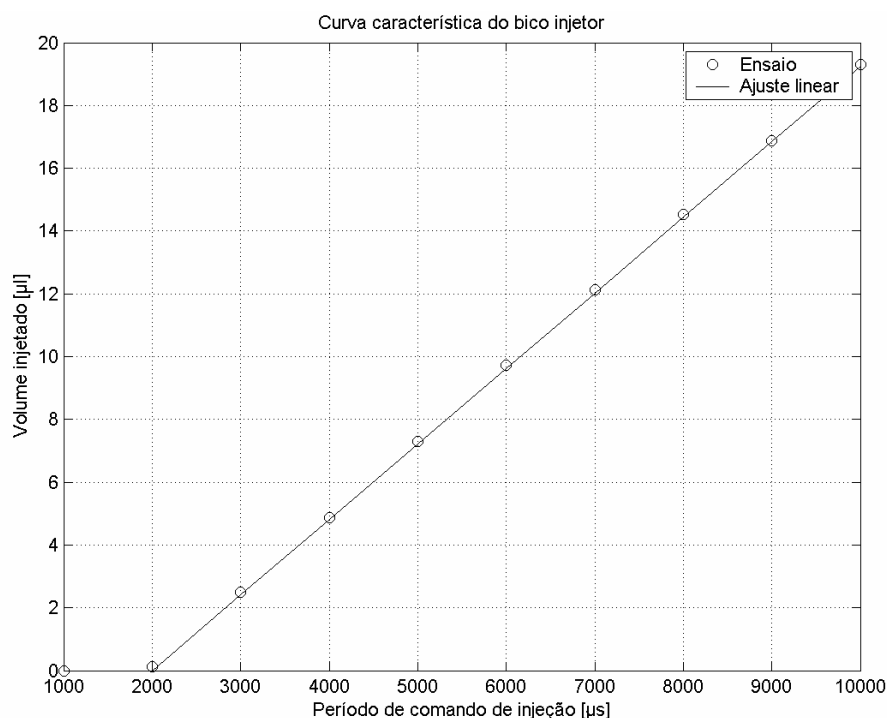


Figura 4-5: Curva de calibração do bico injetor.

Verifica-se que volume de combustível injetado aumenta proporcionalmente ao período do pulso de tensão aplicado, a partir de 2000μs de período.

Foram realizados ensaios, não apresentados nesse trabalho, com diferentes valores de tensão para o pulso aplicado ao bico injetor. Verificou-se que a tensão aplicada no bico injetor, para uma duração de pulso constante, altera a duração do tempo de abertura e fechamento. Para garantir uma tensão constante de acionamento do bico injetor, o circuito de acionamento é alimentado por um regulador de tensão, evitando que variações na tensão da bateria ou da bobina de carregamento interfiram na dosagem de combustível.

Apesar dessas compensações, outros fatores, como o desgaste do bico injetor ou a incrustação de resíduos do combustível, podem interferir na característica de injeção de combustível. Além dos desgastes, o bico injetor está sujeito à obstrução dos canais internos devido à incrustação de resíduos do próprio combustível. Portanto, a característica do



volume de combustível injetado em relação à duração do pulso de injeção que foi identificada nos ensaios pode variar ao longo do tempo.

Cabe ressaltar que neste trabalho são apresentadas soluções tecnológicas viáveis de baixo custo. O foco do trabalho é a construção de um sistema de gerenciamento eletrônico aberto, assim como sua adaptação num motor monocilíndrico de pequeno porte, para obter o entendimento da influência que as variáveis de atuação exercem nas variáveis de saída do motor. A escolha dos componentes considerando a redução das dimensões físicas e do consumo de energia elétrica para a obtenção de um protótipo comercial é considerada fora do escopo.

- Subsistema de alimentação de ar:

A variação da entrada de ar no motor é dada por uma válvula borboleta acoplada a um atuador elétrico. O atuador é um servo-motor utilizado em auto e aeromodelismo. O servo-motor é composto por um motor elétrico com caixa de engrenagens para aumento do torque no eixo de saída, um potenciômetro, um micro controlador e um circuito de potência. O potenciômetro montado no eixo de saída fornece um sinal de realimentação de posição angular, utilizado pela malha de controle pré-programada no micro controlador do atuador. Os sinais de controle emitidos pelo micro controlador são passados ao motor pelo circuito de potência interno.

Os valores de tensão emitidos pelo potenciômetro interno do servo-motor foram disponibilizados como medição de posição de acelerador para o sistema de aquisição de dados utilizado nos ensaios.

A função do servo-motor é rastrear e manter uma posição angular no eixo de saída de acordo com uma referência de posição fornecida, rejeitando perturbações de carga. A referência de posição deve ser fornecida como um pulso de tensão nível TTL (“*Transistor to Transistor Logic*”) sendo que a informação é definida de forma binária, com níveis de tensão de 0V para nível lógico “0” e 5V para nível lógico “1”.

O período durante o qual o sinal está em cinco volts é afim com a referência de posição desejada para o eixo. Para uma variação entre zero e noventa graus na posição angular do eixo, o período do pulso de referência deve se estender entre 1 e 2ms. O mínimo de 1ms foi adotado como padrão pelos fabricantes desses atuadores, como medida de segurança. O valor de mínimo tem a mesma função que o mínimo de 4mA adotado pelo padrão industrial de transmissão por corrente, auxiliando na detecção de falhas de transmissão. A

função estática da referência de posição do acelerador em relação ao período do pulso é dada pela equação 4-1. Essa característica foi verificada em ensaios omitidos nesse trabalho.

$$T_{ref} = T_0 + (\alpha_{ref} / 90) \quad (4-1)$$

sendo :

$T_{ref}$  : período do pulso de tensão passado como referência de posição [ms];

$T_0$  : período de referência equivalente ao acelerador fechado [ms];

$\alpha_{ref}$  : referência de posição angular para o atuador do acelerador [graus].

O valor de  $T_0$  define a posição inicial do acelerador, semelhante à regulagem do batente de final de curso que define o menor valor de abertura para o acelerador.

O sinal de referência deve ser reenviado periodicamente, em intervalos menores que 50ms para evitar que o atuador não interprete o período longo com uma falha de transmissão.

A reação à falta de referência varia de acordo com o fabricante e o modelo, podendo o servo-motor manter a posição atual, buscar uma posição pré-programada, ou mesmo uma posição aleatória, além dos limites mecânicos do atuador. A segunda e terceira situações são indesejadas, sobretudo a última por poder resultar em falha mecânica e/ou elétrica do servo-motor.

Os servos-motores possuem algumas vantagens importantes: possuem realimentação de posição, circuito de potência para o motor integrado, dimensões reduzidas, robustez, torque elevado no eixo de saída, resistência a agentes abrasivos (poeira, areia), tolerância a temperaturas elevadas e vibrações. Como principais desvantagens podem ser apontadas: a velocidade angular limitada e o atraso de transporte na mudança de referência. A limitação de velocidade angular aumenta o tempo de resposta do atuador para grandes variações de posição angular. O atraso de transporte é interpretado aqui como o tempo de reação do atuador para começar a movimentar o eixo de saída quando ocorre uma mudança na referência de posição. O atraso de transporte é função principalmente do período de envio de pulsos de referência. Quanto maior o período de atualização, maior o atraso de transporte. Esse atraso de transporte é discutido na seção 3.2.2 que trata da modelagem do atuador do acelerador.

#### 4.2.2. Sistema de ignição por faísca

Para comandar com eficácia o começo da combustão no interior do cilindro, é necessário um sistema de ignição que possa produzir uma centelha de forma confiável. Além disso, a energia utilizada para gerar a centelha deve ser previamente armazenada e liberada no momento oportuno.

Apesar de simples e robusto, o sistema de ignição original não permite o armazenamento da energia da ignição para um disparo controlado em um momento posterior, já que não existe separação entre geração de energia e transmissão para a geração da centelha.

Uma alternativa para controlar a variação do ângulo de disparo sem armazenamento prévio de energia seria um mecanismo para alterar a posição da bobina do sistema original em relação ao volante, a exemplo dos sistemas de avanço a vácuo de carros com ignição por comutação mecânica (*platinado*). Tal mecanismo seria desnecessariamente complexo e a alternativa foi descartada e em favor dos sistemas de ignição com comutação transistorizada, já que permitem variar o instante de início da centelha sem o uso de componentes móveis.

Devido à ausência de uma fonte de alta tensão no motor, o princípio de ignição escolhido foi o de centelha por colapso de campo. A bobina de ignição assim como a vela e o cabo de vela são peças automotivas, próprias para ignição transistorizada. Além disso, a vela é resistiva e o cabo de vela é do tipo supressivo, e em conjunto reduzem a emissão de ruídos eletromagnéticos. O comando do início da carga da bobina e do instante de disparo é definido pela central de gerenciamento eletrônico, e podem ser definidos de forma independente, conforme a estratégia de controle desejada.

É considerada fora do escopo do trabalho a escolha de componentes no sentido da redução de suas dimensões físicas e do consumo de energia elétrica.

### 4.3. Arquitetura da eletrônica embarcada

O sistema de gerenciamento eletrônico do motor é composto pelos sensores, atuadores e por uma central de comando micro controlada. Nos itens anteriores foram apresentados os sensores e atuadores utilizados no sistema de gerenciamento eletrônico. As entradas manipuláveis são três: o ar admitido, o combustível admitido e o avanço do disparo de ignição. É apresentada agora a arquitetura da eletrônica que rege o funcionamento do sistema.

A central de gerenciamento tem como principal componente o micro controlador ( $\mu C$ ), que centraliza e processa as informações dos sensores e fornece os sinais para os atuadores. Na mesma placa de circuito impresso, foi incluída a eletrônica de amplificação de potência para aplicar os sinais oriundos do micro controlador nos atuadores, assim como os circuitos para tratamento dos sinais de entrada. A figura 4-6 apresenta o diagrama de blocos da eletrônica da central de gerenciamento e a figura 4-7 ilustra o equipamento desenvolvido.

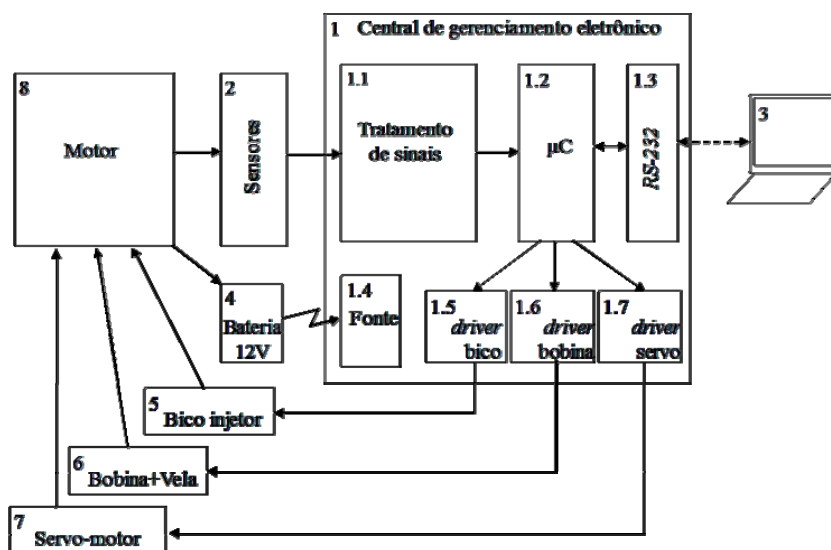


Figura 4-6: Diagrama da arquitetura da eletrônica do sistema de gerenciamento.

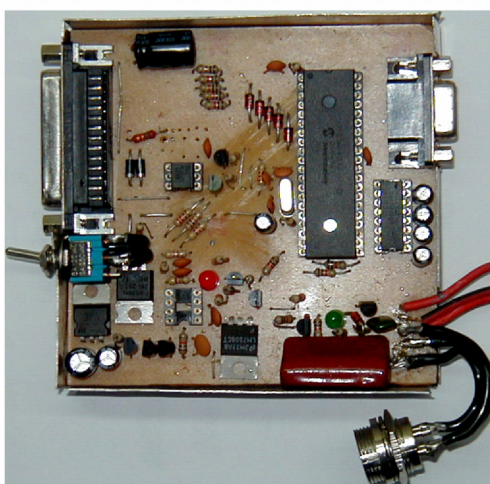


Figura 4-7: Fotografia da central de gerenciamento.

O bloco 1 representa a central de gerenciamento eletrônico. A central possui um micro controlador, bloco 1.2, que recebe as informações do bloco 1.1, responsável pelo

tratamento de sinais dos sensores, e calcula os sinais enviados aos três blocos 1.5, 1.6 e 1.7, de saída para os atuadores. Esses três blocos são responsáveis pela amplificação do sinal gerado pelo micro controlador para acionar os atuadores, blocos 5,6 e 7, respectivamente: o bico injetor, a bobina de ignição e o servo-motor acoplado à válvula borboleta no coletor de admissão. O bloco 1.4 é responsável por fornecer tensão de alimentação de 5 volts para o micro controlador e os circuitos integrados na placa de circuito impresso. O bloco 1.3 representa o circuito integrado *MAX232* e seus periféricos, que permitem estabelecer uma comunicação serial com um computador do tipo PC, bloco 3, usando o padrão *RS-232*. No desenvolvimento do circuito eletrônico objetivou-se principalmente a simplicidade construtiva e a disponibilidade de componentes para substituição no mercado. Optou-se então pela utilização de componentes discretos, descartando o uso de circuitos integrados dedicados, cada vez mais comuns em sistemas automotivos, porém de difícil acesso no mercado interno brasileiro.

#### **4.4. Arquitetura do programa embarcado**

A seguir é feita a descrição da estrutura de funcionamento do programa desenvolvido para o micro controlador da central de gerenciamento eletrônico. É apresentada também a interface gráfica de usuário desenvolvida no computador, para alterações dos parâmetros na central de gerenciamento.

##### **4.4.1. Visão geral do programa embarcado**

O objetivo da programação na central de gerenciamento eletrônico é definir as ações de controle a serem aplicadas ao motor e permitir a configuração da programação a pedido do usuário. A definição dessas ações de controle é realizada em três etapas: a atualização das leituras dos sensores, o cálculo do valor desejado para a ação e a aplicação da ação de controle. A configuração da programação é feita em duas etapas: a recepção e a execução dos pedidos. Cada etapa constitui uma tarefa a ser executada pelo micro controlador.

Para executar as tarefas, o programa é dividido em fluxos de execução. Dependendo do grau de exatidão temporal ou do prazo exigido em cada tarefa, elas são processadas em fluxos de execução paralelos ao principal, de forma preemptiva. Por exemplo, a atualização das leituras dos sensores é feita de acordo com o tipo de informação do sensor. Consideram-se como ilustração do problema dois sensores do motor: o sensor de posição angular do volante de inércia e o sensor de posição angular da borboleta. O primeiro

informa o período de revolução e a posição do eixo do motor, utilizados para definir o instante do comando de ignição, entre outros. A informação que ele contém está no período e por isso as transições do sinal devem ser capturadas o mais rápido possível. Por outro lado, a informação do sinal produzido pelo segundo é codificada no valor da tensão de saída, que está sempre disponível para consulta e o instante escolhido para a leitura não é tão crítico.

A captura do sinal de sincronia emitido pelo sensor do volante requer dois fluxos de processamento distintos. A recepção dos pedidos de configuração e a aplicação dos sinais de controle requerem um fluxo de execução paralelo para cada. As demais tarefas são executadas no fluxo de execução principal. Como resultado, o programa desenvolvido é constituído por cinco fluxos de processamento distintos. A figura 4-8 apresenta o diagrama dos fluxos de processamento do programa desenvolvido.

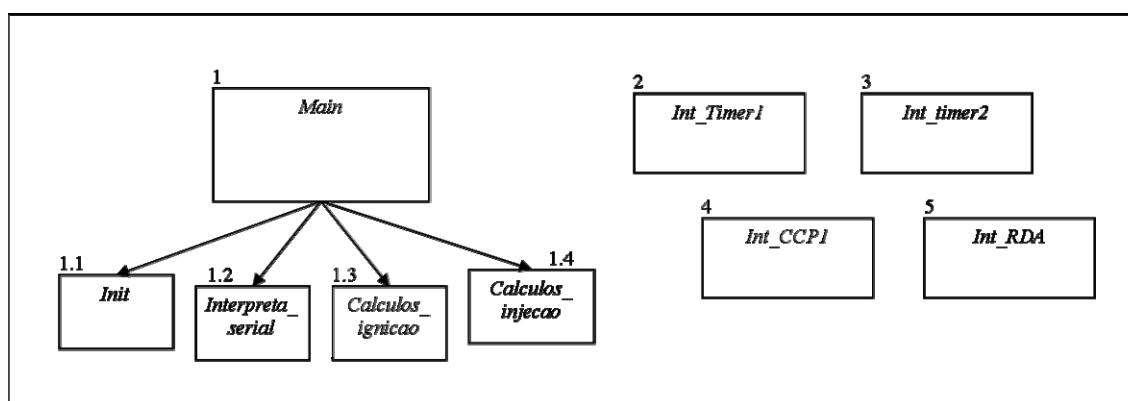


Figura 4-8: Diagrama dos fluxos de execução do programa no micro controlador.

O bloco 1 representa o fluxo de execução principal, que executa a chamada das funções contidas nos blocos 1.1 a 1.4. Essas tarefas são: as configurações iniciais do micro controlador, a função de execução dos pedidos de configuração, e os cálculos das ações de controle. Os blocos 2 a 5 representam os fluxos de execução paralelos. Os fluxos paralelos interrompem temporariamente o fluxo principal, que volta a ser executado em seguida. O fluxo principal é constantemente executado, o fluxo 3 é executado periodicamente e os demais fluxos são aperiódicos, em função da velocidade angular do motor no caso de 2 e 4 e em função da recepção de dados da interface no computador para o fluxo 3.

O fluxo de execução principal é apresentado na figura 4-9. O bloco 1.1 contém os comandos de configuração do modo de funcionamento do micro controlador, como configuração de portas de entrada e saída, habilitação de interrupções, entre outros. O

bloco 1.2 executa os pedidos de configuração emitidos pelo usuário, modificando parâmetros de execução e variáveis utilizadas nos blocos 1.3 e 1.4. Os blocos 1.3 e 1.4 são encarregados de executar a tarefa de calcular o valor desejado para as ações de controle a serem aplicadas ao motor. O bloco 1.3 calcula as ações de abertura de acelerador e de instante de ignição, e o bloco 1.4 calcula o período do pulso de comando de abertura do bico injetor.

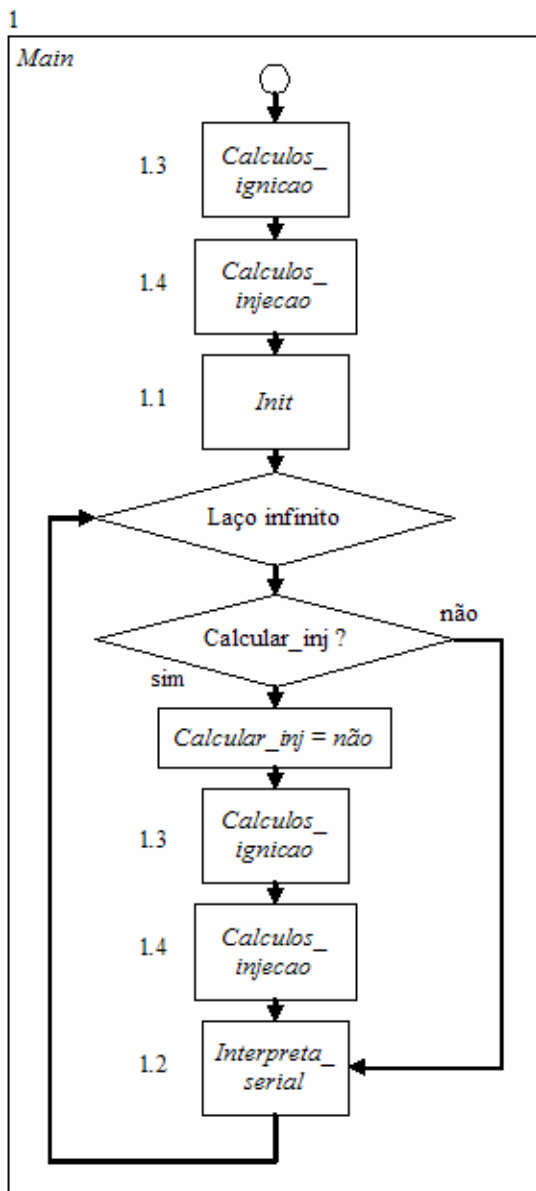


Figura 4-9: Fluxograma de execução de laço principal.

O laço infinito verifica a necessidade de atualizar os valores de ação de controle e em seguida verifica a chegada de novos comandos recebidos da interface gráfica no computador. A variável booleana *calcular\_inj* é ativada pelo tratador de interrupção do

temporizador 2 periodicamente em intervalos de 25ms e desativada no final da atualização das ações de controle.

#### 4.4.2. Protocolo de comunicação

A utilização de protocolos de comunicação industrial tais como o *CAN* exige periféricos, capacidade de processamento e memória além do disponível no micro controlador utilizado. Tendo em vista que o foco do trabalho é utilizar componentes facilmente encontrados no mercado brasileiro e de baixo custo, a utilização de um padrão de comunicação mais elaborado não é um fator indispensável. Para contornar as limitações de processamento e memória, foi definido um protocolo de comunicação simplificado e com tamanho reduzido de pacote. Os pacotes enviados e recebidos pela central possuem estruturas diferentes. Os pacotes enviados pelo computador para a central são denominados pacotes de comando. Os pacotes enviados pela central para o computador são denominados pacotes de resposta. A estrutura dos pacotes de comando é ilustrada na figura 4-10.

Identificador (1 byte)	Operação (1 byte)	Dados (2 bytes)		Verificador (1 byte)
		Valor1	Valor2	

Figura 4-10: Estrutura dos pacotes de comando.

Os pacotes de comandos contêm as alterações e pedidos de leituras das variáveis internas do micro controlador. As operações oferecidas pela programação permitem alterações nos valores das matrizes de dados, constantes de funcionamento, e alterações nos modos de funcionamento da central de gerenciamento.

Os pacotes de comando possuem *bytes* de delimitação de quadro e verificação de erros. Conforme indicado na seção 4.3, que descreve a eletrônica embarcada, a camada física usa o padrão *RS-232*. Devido à curta distância recomendada pelo padrão, a ocorrência de falhas de transmissão é baixa o suficiente para permitir a realização correta dos ensaios de modelagem do motor. Pela simplicidade do sistema de comunicação utilizado, não houve necessidade de utilização de protocolos da retransmissão de dados e controle de fluxo.

Os pacotes de comando possuem comprimento de cinco *bytes*, dos quais:

- o primeiro e o quinto são para a delimitação de quadro e controle de erro,
- os outros três são utilizados para determinar a operação e os valores dos operandos.



A verificação de validade do quadro recebido é realizada comparando o primeiro e o quinto *byte* com valores pré-determinados na memória do programa. A operação de comparação necessita de pouco processamento na validação do quadro, e pode ser executada com pouca interferência no desempenho do programa como um todo. O controle de erros de transmissão é rudimentar, porém, eficaz o suficiente para evitar a execução de falsas operações ou de operações não existentes.

A tarefa de recepção dos comandos se encarrega de acumular os dados em uma fila de espera, um caractere por vez. A interpretação dos dados é feita pela tarefa de execução dos comandos.

Ao receber cinco ou mais *bytes*, a tarefa de execução dos comandos realiza a verificação dos *bytes* delimitadores. Caso a verificação tiver sucesso, o valor da segunda posição é interpretado como a operação desejada, assim como o terceiro e quarto serão definidos como os operandos.

A estrutura de sistema de gerenciamento proposta centraliza o processamento no micro controlador da central. A comunicação com a central serve o propósito único de receber comandos de configuração e retornar dados ocasionalmente solicitados. Portanto, a estrutura da comunicação entre computador e central de gerenciamento foi definida como sendo do tipo mestre-escravo. Essa definição permite reduzir o número de camadas da comunicação no programa embarcado, resolvendo a determinação de acesso ao meio.

A interface de comunicação mascara os protocolos de acesso ao meio, disponibilizando diretamente a chamada da função que recebe como operando o pacote a ser transmitido.

O pacote de resposta, ilustrado na figura 4-11, é composto unicamente pelas medidas solicitadas pelo computador.

Medida RPM (16 bits)	Acelerador (16 bits)	T_injeção (16 bits)	Atraso_ignicao (8 bits)
-------------------------	-------------------------	------------------------	----------------------------

Figura 4-11: Estrutura do pacote de resposta.

O pacote de resposta é composto pelos 7 *bytes* das leituras das variáveis medidas pela central, que são: o valor da velocidade angular em rotações por minuto, o percentual de abertura do acelerador, a duração do comando da injeção de combustível e o ângulo de comando de início da ignição.

### 4.4.3. Representação dos dados

A referência para os valores de duração do comando de injeção de combustível e de ângulo de disparo de ignição é definida, pela central de gerenciamento, em função dos valores de velocidade angular e do percentual de abertura do acelerador. Esses valores de referência podem ser definidos como uma relação de um espaço bidimensional de valores reais em um espaço unidimensional de valores reais (de  $R^2$  em  $R^1$ ). A forma da função que relaciona os dois espaços é desconhecida e, portanto, uma representação só é possível através de amostragens relacionando entradas e saídas. Dado um número finito de amostras uniformemente distribuídas no espaço de estados for coletado, sua representação e armazenamento são feitos de forma eficiente por uma matriz. Num sistema digital utilizando variáveis inteiras (cálculos de ponto fixo), o armazenamento das matrizes implica na quantização dos valores de saída da função.

As matrizes utilizadas são denominadas mapa de injeção e mapa de ignição, contendo respectivamente as referências para injeção de combustível e ângulo de comando da ignição. A consulta às matrizes é feita através dos pares de velocidade angular, medida em rotações por minuto, e abertura percentual de acelerador, sendo que posições de 0 a 90 graus indicam 0 a 100% de abertura. No programa desenvolvido, os mapas contam com 11 posições diferentes para o acelerador e 10 para a velocidade angular. Um exemplo de mapa para a duração do comando de injeção pode ser visto na figura 4-12.

O aumento de resolução no mapa implica num crescimento quadrático do espaço requerido para armazenamento. Para contornar o uso excessivo de memória são utilizados algoritmos de interpolação de dados para calcular pontos adicionais entre aqueles fornecidos no mapa. Tendo em vista que a forma da função que se deseja representar é desconhecida, a escolha de um algoritmo de interpolação qualquer determina apenas a suavidade da transição nos pontos de referência, mas não garante melhor representação da função original. Isso implica também no fato de que a exatidão da representação só pode ser aumentada através de maior número de pontos no mapa.

Outro fator determinante na escolha do algoritmo é a limitação do poder de processamento disponível em sistemas embarcados onde se deseja algoritmos com menor custo computacional.

O algoritmo de interpolação linear foi escolhido para a aplicação aqui considerada por sua simplicidade e rapidez de computação. A interpolação linear é ilustrada de forma

geométrica na figura 4-13. A equação 4-2 apresenta a fórmula para a interpolação linear de duas dimensões.

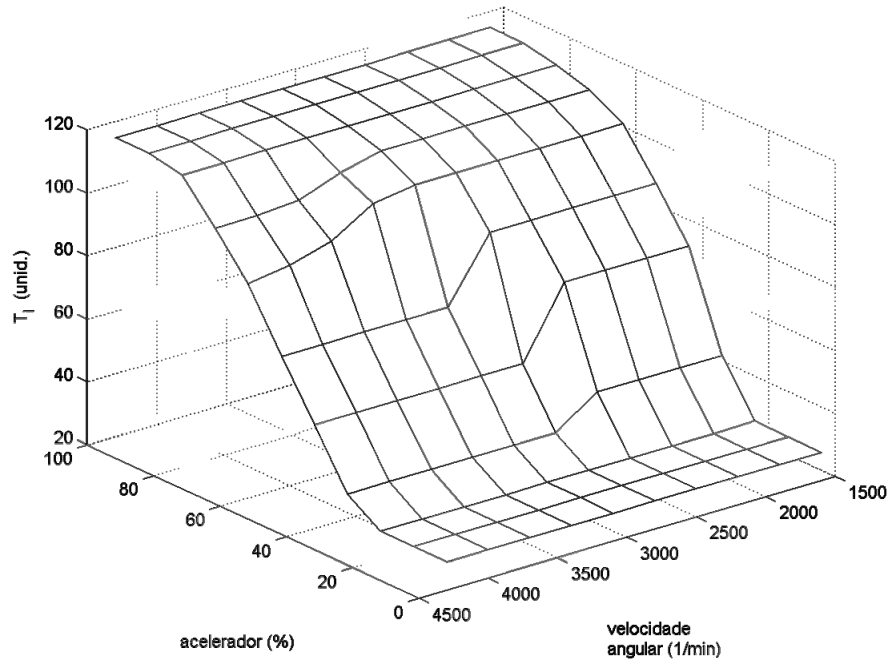


Figura 4-12: Exemplo de mapa utilizado pela central de gerenciamento.

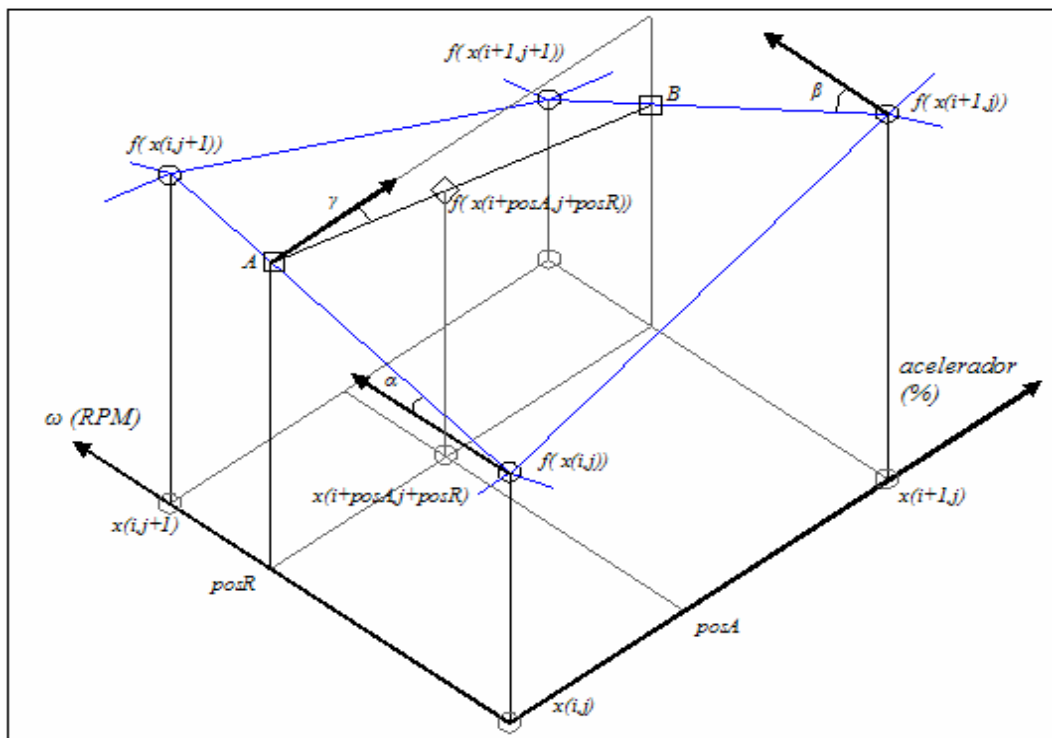


Figura 4-13: Interpolação linear em duas dimensões.

$$f(x(i + posA, j + posR)) = \gamma \frac{posA}{x(i + 1, j) - x(i, j)} \quad (4-2)$$

sendo :

$$\gamma = \frac{(B - A)}{x(i + 1, j) - x(i, j)} \quad (4-3)$$

$$A = \alpha \frac{posR}{x(i, j + 1) - x(i, j)} \quad (4-4)$$

$$B = \beta \frac{posR}{x(i + 1, j + 1) - x(i + 1, j)} \quad (4-5)$$

$$\alpha = \frac{f(x(i, j + 1)) - f(x(i, j))}{x(i, j + 1) - x(i, j)} \quad (4-6)$$

$$\beta = \frac{f(x(i + 1, j + 1)) - f(x(i + 1, j))}{x(i + 1, j + 1) - x(i + 1, j)} \quad (4-7)$$

O algoritmo de interpolação pode ser reescrito considerando o cálculo em ponto fixo, para execução no micro controlador:

$$d = valor(1,1) + \frac{\left( \frac{(a + b)posR}{div\_rpm} + c \right)}{div\_acel} \quad (4-8)$$

$$posA = valor\_acel \% div\_acel \quad (4-9)$$

$$posR = valor\_rpm \% div\_rpm \quad (4-10)$$

$$a = (valor(2,1) - valor(1,1)) \cdot (div\_acel - posA) \quad (4-11)$$

$$b = (valor(2,2) - valor(1,2)) \cdot posA \quad (4-12)$$

$$c = (valor(1,2) - valor(1,1)) \cdot posA \quad (4-13)$$

O operador % é definido como o resto da divisão dos valores obtidos das leituras das variáveis de busca pelo valor de subdivisões desejadas entre dois pontos consecutivos das matrizes. Por exemplo, *div\_acel* representa o número de subdivisões existentes entre *valor(1,1)* e *valor(1,2)*.

O algoritmo de interpolação é utilizado apenas para o mapa de injeção, sendo que os valores contidos no mapa de ignição são usados diretamente como valor inicial nos cálculos que determinam o instante de comando da ignição.

O armazenamento das matrizes no micro controlador é feito na forma de vetores, com suas linhas concatenadas em ordem crescente. A busca de dados na matriz passa a ser feita através de um ponteiro único denominado índice global. Ele é composto pelos índices de busca das linhas e colunas, e calculado segundo a equação 4-14.

$$Index\_global = (index\_rpm \cdot n_{colunas}) + index\_acel \quad (4-14)$$

sendo :

$n_{colunas}$  : número de colunas da matriz,

$index\_rpm$  : índice de busca em relação à velocidade angular,

$index\_acel$  : índice de busca em relação ao ângulo de abertura do acelerador.

Os índices de busca são calculados segundo as equações 4-15 e 4-16.

$$index\_acel = floor\left(\frac{valor\_acel}{4}\right) \quad (4-15)$$

$$index\_rpm = floor\left(\frac{valor\_rpm}{300}\right) \quad (4-16)$$

$$valor\_rpm = floor(\omega_{motor} - 1600) \quad (4-17)$$

$$valor\_acel = floor\left(\frac{\alpha_{\%}}{2,5}\right) \quad (4-18)$$

sendo :

$floor(x)$  : operação de arredondamento para o menor inteiro adjacente, representa o arredondamento numérico dos cálculos de ponto fixo do micro controlador,

$\alpha_{\%}$  : abertura percentual do acelerador [%]

$\omega_{motor}$  : velocidade angular do motor [RPM]

Nas equações 4-15 e 4-16, são utilizadas as variáveis  $valor\_rpm$  e  $valor\_acel$  como base para obtenção dos índices  $index\_rpm$  e  $index\_acel$ . Os limites impostos para os valores dos índices de consulta implicam que os mapas são definidos para velocidades angulares do motor superiores a 1600 e inferiores a 4200 rotações por minuto. Para o ângulo de abertura do acelerador, são definidas 40 posições distintas num intervalo de 0 a

90°. Essa limitação é resultado da resolução temporal alcançada pelo tratador da interrupção do temporizador 2 e será discutida posteriormente.

#### 4.4.4. Cálculo das ações de controle

As funções responsáveis por essa tarefa correspondem aos blocos 1.3 e 1.4 da figura 4-9, que apresenta o fluxo de execução principal. As funções têm por objetivo:

- recuperar os valores dos sensores que não são recuperados nos fluxos paralelos,
- calcular os índices de busca nos mapas de período de injeção e atraso de ignição,
- calcular os valores de ação de controle para o acelerador, o atraso de ignição e o período de injeção com as devidas correções,
- atualizar os valores utilizados para gerar os sinais de comando dos atuadores.

A primeira função, denominada *calculos\_ignicao* se encarregada de definir a abertura de acelerador e o ângulo de atraso no início da ignição. A função *calculos\_injecao* determina o valor do período de comando para o bico injetor. A figura 4-14 apresenta o fluxograma de execução da função *calculos\_ignicao*.

Os cálculos para o instante de disparo, assim como a quantidade de combustível, são baseados em mapas, conforme descrito na seção anterior. Portanto, a função precisa determinar os índices de busca no mapa de acordo com a velocidade angular e a posição angular do acelerador. Primeiro é obtida a velocidade angular do motor, medida em rotações por minuto. Em seguida é calculado o respectivo índice. O outro índice de busca é calculado a partir do valor de abertura do acelerador, que é passado como referência para o atuador do acelerador, e é calculado de acordo com o modo de funcionamento do motor.

Para o motor, o ângulo de comando de ignição é sempre definido como negativo em relação ao ponto morto superior, sendo chamado comumente de *avanço* de ignição. Para o micro controlador, o instante no qual deve ser comandado o início da combustão é definido como um tempo de espera após a detecção do sinal de sincronia gerado pelo sensor magnético de posição do volante de inércia. Para efeitos de controle e programação, essa espera será considerada como um *atraso* de ignição para futuras referências, em oposição ao que é comumente definido como *avanço* de ignição quando definido em relação ao ponto morto superior.

O sensor foi montado junto à bobina secundária de alimentação, 90° antes do ponto morto superior (PMS). Uma variável auxiliar, *correcao\_ign*, armazena o menor valor de atraso

de ignição permitido (maior valor de avanço), e o mapa atrasa o comando da ignição de acordo com a região de funcionamento do motor. O mapa de ignição permite incrementos de até 20° na posição angular do disparo.

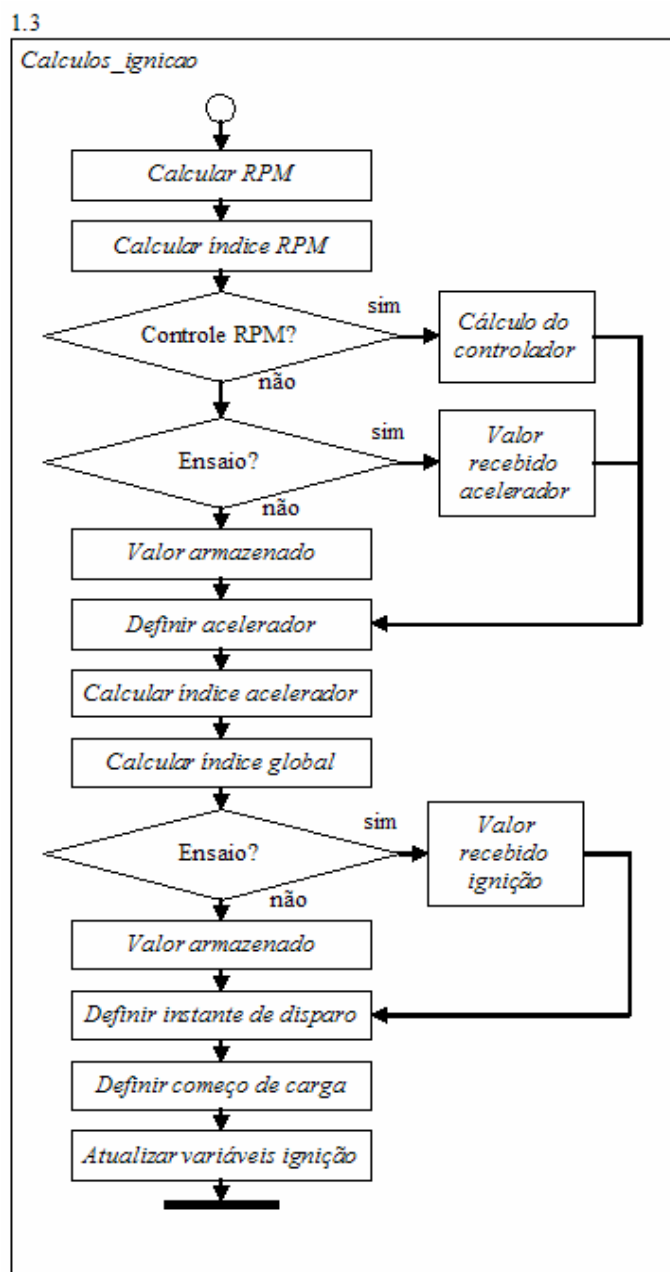


Figura 4-14: Fluxograma de execução da função de cálculo do atraso de ignição.

O comando de ignição é aplicado na forma de um tempo de espera em relação ao sinal de sincronia, que é proporcional ao ângulo de atraso desejado e inversamente proporcional à velocidade angular do motor. Com a definição dos valores para começo de carga da bobina

e instante de ignição, a função termina com a atualização desses valores como referência a ser passada para o sistema de ignição.

Na seqüência, o laço de execução principal chama a função *calculos\_injecao* que determina os novos valores para a duração do comando de injeção de combustível. A figura 4-15 apresenta o fluxograma de execução da função *calculos\_injecao*.

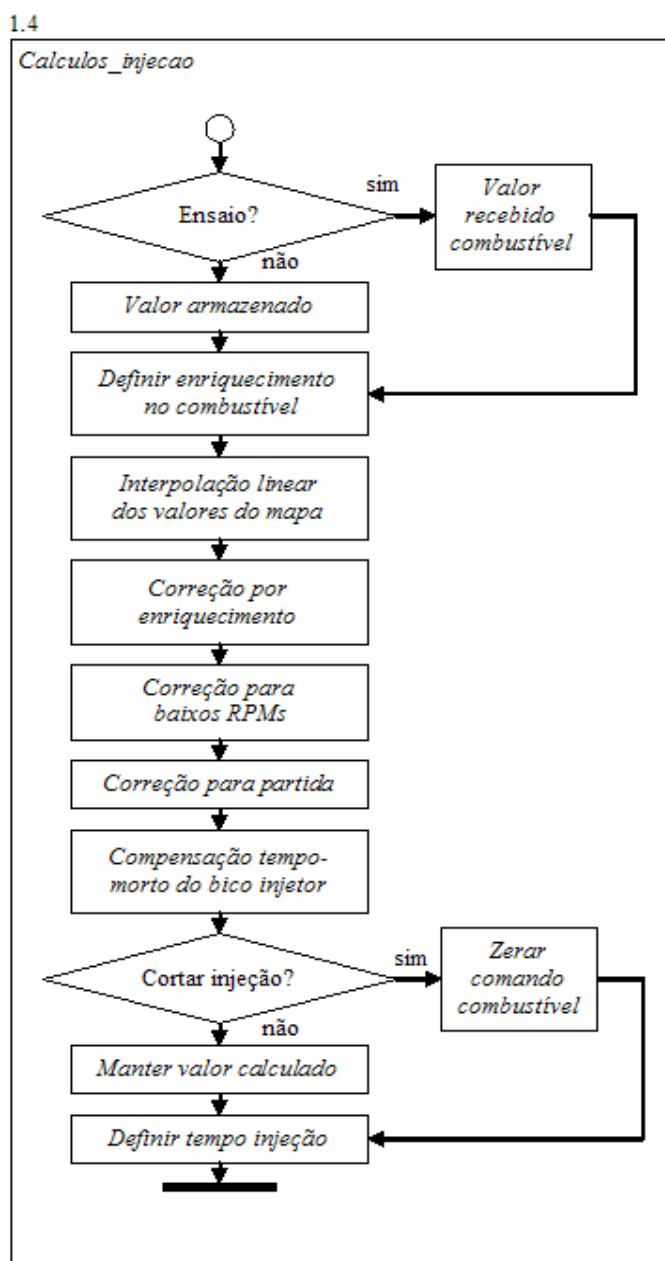


Figura 4-15: Fluxograma da função de cálculo do período de comando para o bico injetor.

A função recupera os valores de base no mapa correspondente, utilizando o algoritmo de interpolação descrito na seção 4.4.3. A quantidade de combustível a ser injetada no motor é



multiplicada por um ganho, *correcao\_inj*, que tem por objetivo modificar a relação entre massas de ar e combustível em todas as regiões do mapa simultaneamente. Essa variável é definida logo no começo da função, de acordo com o modo de funcionamento da central de gerenciamento.

Outras correções são realizadas na duração do comando de injeção para compensar o funcionamento do motor fora do alcance do mapa, para baixas velocidades angulares em *correção para baixas RPMs* e para a condição de partida do motor em *correção para partida*. Essas correções são realizadas diretamente na parcela da duração do comando de injeção correspondente à passagem de combustível.

Devido ao tempo morto característico do bico injetor, é adicionado um tempo extra para compensar o tempo de abertura e fechamento, obtendo então a duração do pulso a ser aplicado ao bico injetor. O novo valor de atuação é repassado após uma verificação da velocidade angular do motor. Nesse ponto do programa foi inserida uma limitação para a velocidade máxima como mecanismo de proteção. Se o motor passar do limite estabelecido para a velocidade angular, a duração do pulso de injeção será definida como zero.

#### **4.4.5. Modos de funcionamento da central**

Existem três modos de funcionamento disponíveis: controle de velocidade angular, ensaios e o modo padrão. Se a central está com o controlador de velocidade angular ativado, a abertura da borboleta do acelerador será definida pela malha de controle de velocidade angular e o usuário poderá apenas definir um valor de referência para a velocidade angular do motor. O controlador previsto inicialmente é do tipo proporcional integral, programado com variáveis inteiras para reduzir o tempo de processamento e o espaço de armazenamento ocupado pelo algoritmo.

A comunicação padrão com o computador prevê o armazenamento das informações recebidas na memória de programa, porém, a instrução de escrita na memória necessita de aproximadamente 10ms para ser executada. Esse tempo é demasiadamente longo e interfere no funcionamento correto da central de gerenciamento. A interferência se manifesta como falhas nas execuções dos comandos de ignição, de injeção e de abertura da borboleta do acelerador.

Quando a central de gerenciamento está em modo de ensaios, os valores de referência (para abertura da borboleta do acelerador, para o ganho que modifica a quantidade de

combustível injetada e para a referência de valor de comando de ignição) são armazenados apenas na memória volátil do micro controlador. O tempo de armazenamento é reduzido, o que permite maior frequência de envio de informações sem comprometer os prazos de execução das demais tarefas.

Quando nenhuma das duas situações anteriores acontece, o motor se encontra no modo de comando de abertura da borboleta de acelerador, dito *padrão*. Nesse caso, a central utiliza como referência para a posição angular da borboleta os valores armazenados na memória do programa, que podem ser alterados diretamente pelo usuário.

#### **4.4.6. Tratadores de interrupção**

O fluxo principal é interrompido pelos fluxos de execução associados aos tratadores de interrupção. Essas interrupções ocorrem devido a fenômenos internos e externos que requerem prioridade de processamento da parte do micro controlador. Os tratadores de interrupção executam as tarefas realizar as leituras de alguns sensores, e executar os sinais de comando desejados para os atuadores. As variáveis que os tratadores utilizam foram definidas como globais para reduzir a quantidade de variáveis intermediárias e parâmetros passados nas chamadas de funções. A diminuição dos parâmetros passados evita problemas de excesso de pilha no chaveamento de contexto de execução. Quando o processador interrompe uma seqüência de operações para executar outra função, os valores dos registradores são armazenados em um espaço de memória limitado chamado de pilha. Além dos valores de registradores internos, os parâmetros passados pela função também são passados pela pilha. Num micro controlador de pequeno porte, a pilha possui dimensão muito limitada, e chaveamentos de contexto consecutivos acarretam a perda dos dados e travam o processador.

As interrupções externas estão associadas à captação de sinais de entrada no micro controlador, sendo eles: o pulso de sincronia emitido pelo sensor de posição angular do eixo do motor e a recepção de dados pela interface de comunicação serial com o computador. As interrupções internas ocorrem devido aos temporizadores um e dois, incorporados no micro controlador. O temporizador 1 foi configurado como contador de 16 *bits*, incrementando a cada 1,6 $\mu$ s. Ele gera uma interrupção quando a contagem passa de 65535 para 0, na condição de *overflow*. O temporizador 2 foi configurado para gerar uma interrupção de *overflow* a cada 25 $\mu$ s, e serve de base de tempo para a execução de todos os

sinais de comando e referência dos atuadores. A seguir serão detalhados os tratadores de interrupção utilizados.

- Tratador da interrupção de comunicação serial:

A recepção de dados da interface serial é iniciada a cada novo caractere recebido. Os caracteres recebidos pela interface são armazenados em um buffer circular para que a tarefa de execução dos comandos possa consultar esses dados. Ela segue os seguintes passos:

- desabilitar a interrupção da serial para evitar perder o caractere,
- atualizar o ponteiro de escrita do *buffer* circular de recepção,
- escrever o novo caractere na posição indicada pelo ponteiro,
- habilitar a interrupção da serial.

- Tratador da interrupção do temporizador 1:

O temporizador 1 foi configurado na função de contador incremental em função do relógio do micro controlador. O temporizador foi configurado para incrementar sua contagem a cada  $1,6\mu\text{s}$ .

A cada vez que o período de uma rotação do eixo do motor excede a contagem máxima de 65535, equivalente a 104,8576ms, o tratador da interrupção armazena o número de vezes que a contagem foi recomeçada, limitado a 63 reinícios. O período máximo que pode ser medido é de 6,6 segundos, mais que suficiente para a faixa de operação do motor.

- Tratador da interrupção do módulo *CCP* 1:

O módulo de *CCP* 1 (*Captura/Comparação/PWM*) foi configurado para gerar uma interrupção e capturar o valor do temporizador 1 quando o sinal de sincronia do volante de inércia do motor passar de 0 para 5 volts. A cada pulso do sinal, o valor de contagem do temporizador 1 é recuperado e sua contagem é zerada para a próxima passagem.

Sendo assim, o valor do temporizador no instante da transição representa o período de revolução do volante de inércia (quando não a contagem não recomeça). O inverso do período fornece a velocidade angular do motor.

Quando a interrupção é gerada, o tratador de interrupção do *CCP* 1 executa os passos:

- zerar a contagem do temporizador 1,

- zerar a variável de contagem do tratador de interrupção do temporizador 2, que define a execução das ações de controle,
- recuperar o número de vezes que o temporizador 1 recomeçou a contagem,
- recuperar o valor da contagem do temporizador 1 no registrador do *CCP* 1,
- repassar os instantes de começo e fim para os pulsos de injeção e ignição,
- zerar o número de vezes que a contagem do temporizador 1 teve que ser reiniciada.

- Tratador da interrupção do temporizador 2:

O tratador de interrupção do temporizador 2 é essencial para o funcionamento da central de gerenciamento, pois ele é responsável pela aplicação dos sinais de referência enviados para os atuadores. Os sinais enviados aos atuadores são definidos por seus instantes de início e fim e, portanto, dependem da resolução de medição de tempo para serem calculados e aplicados.

O temporizador 2 foi configurado para funcionar como contador incremental, gerando uma interrupção a cada  $25\mu\text{s}$ . O intervalo entre interrupções é definido como a base de tempo para os sinais e cada interrupção incrementa uma variável de contagem interna usada para comparação do instante correto para aplicação dos sinais de controle.

A largura do pulso de tensão para o bico injetor, a largura do pulso de referência para o servo-motor e o instante de disparo da ignição são definidos no micro controlador como um múltiplo dessa base de tempo. O impacto da resolução da base de tempo da atuação sobre o funcionamento do sistema e do motor será discutido posteriormente, no capítulo 5 que trata da análise dos dados dos ensaios. O tratador executa as seguintes operações:

- incrementar o contador interno de referência para aplicação dos sinais de injeção e ignição,
- comparar o valor do contador com o valor de início da ignição e da injeção de combustível. Caso a comparação for verdadeira, zerar o valor de tensão enviado à bobina da ignição e enviar tensão para abrir o bico injetor,
- comparar o valor do contador com o valor de término da injeção. Caso a comparação for verdadeira, zerar o valor de tensão de saída para fechar o bico injetor,

- comparar o valor da contagem com o início de recarga da bobina de ignição. Caso verdadeiro, alimentar a bobina com a tensão da bateria para armazenar a energia da ignição,
- gerar o sinal de referência enviado ao atuador do acelerador.
- solicitar a cada 25ms a atualização das ações de controle calculadas pelo fluxo de execução principal.

A seqüência dos sinais produzidos pelo tratador de interrupção do temporizador 2 em função do pulso de sincronia fornecido pelo sensor de posição angular do volante de inércia pode ser vista na figura 4-16. A figura mostra também os sinais de tensão para alimentação da bobina de ignição e para o bico injetor, que definem o instante de comando de ignição e a quantidade de combustível a ser fornecida ao motor.

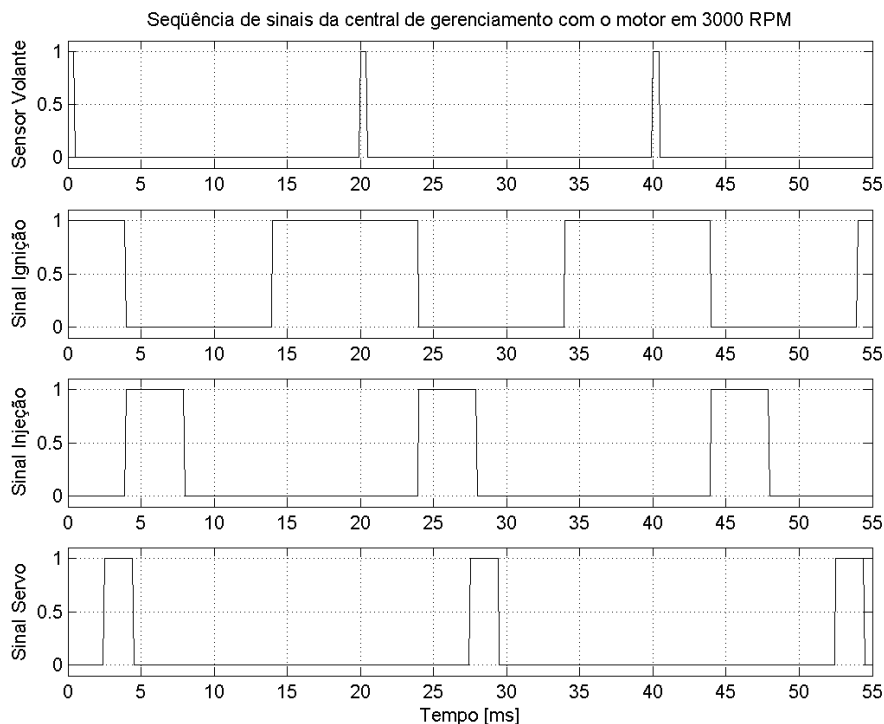


Figura 4-16: Seqüência temporal dos sinais na central de gerenciamento.

Relembrando o funcionamento do servo-motor utilizado como atuador para a posição angular do acelerador, o valor de duração do pulso que ele recebe deve ser proporcional ao ângulo de abertura desejado para o acelerador. A variação de 1ms no período corresponde a 90 graus de variação na posição angular do acelerador. A resolução de 25 $\mu$ s do temporizador 2 implica então que é possível determinar 40 valores diferentes em 1ms, ou seja, 40 divisões em 90 graus.

A alimentação da bobina de ignição começa com antecedência ao pulso de sincronia para o armazenamento da energia na forma de campo magnético que será utilizada para produzir a faísca. O sinal é desligado, interrompendo a passagem de corrente no enrolamento primária da bobina, produzindo a faísca no instante relativo ao ângulo de início de ignição desejado. O sistema produz uma faísca a cada revolução do virabrequim, produzindo uma faísca *útil* e outra dita *perdida*.

Como proteção para evitar que a faísca queime indevidamente o combustível durante a admissão, o comando de injeção de combustível é aplicado junto com o comando de ignição. O tempo necessário para a abertura do bico injetor é maior que a duração da faísca, evitando a combustão prematura do combustível.

Devido a restrições de tempo para o desenvolvimento do trabalho, optou-se por não implementar a injeção sincronizada em relação à abertura do cilindro. A injeção de combustível é feita a cada pulso de sincronia enviado pelo sensor do volante de inércia. Sendo assim, o combustível é injetado em duas parcelas, uma logo antes do primeiro ciclo (admissão) e a outra logo antes do terceiro ciclo (expansão) do motor. As duas parcelas possuem a mesma duração de pulso de injeção, simplificando os cálculos de período dos pulsos.

O sinal de referência enviado ao servo-motor é retransmitido independentemente dos demais sinais em intervalos de 25ms, para manter uma frequência de atualização fixa.

## 4.5. Interface gráfica do usuário

A central de gerenciamento eletrônico pode ser configurada através de uma interface de comunicação programada no ambiente *Matlab*®, usando a ferramenta de desenvolvimento integrado de interface gráfica para usuário, a *guide* (*Graphical User Interface Development Engine*). A figura 4-17 mostra uma captura de tela da interface desenvolvida.

A interface gráfica permite visualizar as variáveis e realizar ajustes nos parâmetros armazenados na central de gerenciamento eletrônico, inclusive durante o funcionamento do motor. No centro da tela encontram-se um gráfico que permite visualizar os mapas de injeção de combustível e de ignição utilizados. A alternância entre os gráficos é efetuada selecionando a opção desejada na caixa de escolha logo acima do gráfico.

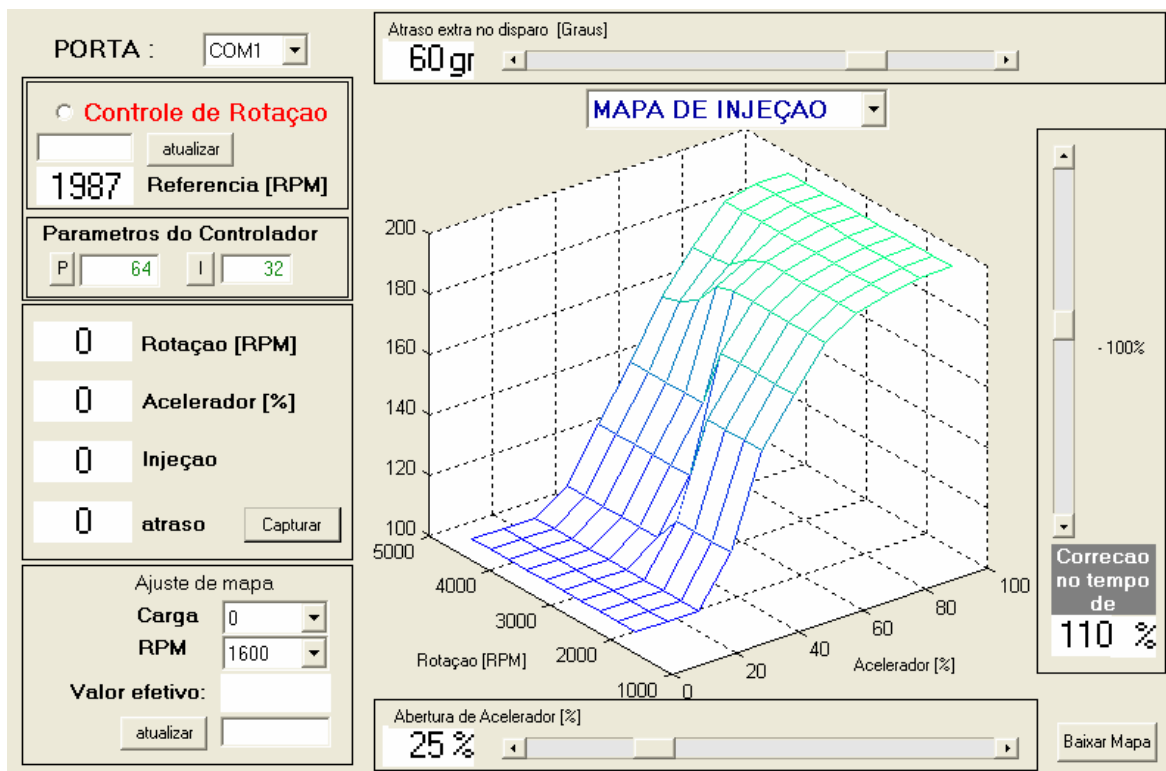


Figura 4-17: Interface do sistema de gerenciamento no computador.

À direita, acima e abaixo do gráfico encontram-se barras de rolagem para atuar na duração do comando aplicado à injeção de combustível (*Correção no tempo de Injeção*), no ângulo de início de ignição (*Atraso extra no disparo*) e na abertura desejada para o acelerador (*Abertura do Acelerador*). Os textos ao lado de barra indicam o valor real que deveria estar sendo aplicado pelo micro controlador.

À esquerda do gráfico encontram-se valores de quatro parâmetros críticos de leituras e atuação no motor, que são: a velocidade angular do motor, a abertura de acelerador, o valor de duração de pulso de injeção e o ângulo de ignição, praticados no momento. A visualização desses parâmetros reflete os cálculos realizados pelo micro controlador. Em condições normais de funcionamento, esses valores devem ser iguais aos valores indicados junto às barras de rolagem. Discrepâncias entre os valores indicam problemas de programação e/ou comunicação na central de gerenciamento. O botão *capturar* da interface requisita ao micro controlador a atualização desse conjunto de quatro medidas quando o usuário solicitar. Esses pedidos de atualização não são realizados periodicamente para evitar sobrecarregar o micro controlador utilizado com a comunicação com o computador. No canto inferior esquerdo se encontra a indicação do valor do mapa *Valor efetivo* armazenado na posição indicada pelas caixas de texto intituladas *Carga* e *RPM*. O botão

*atualizar* utiliza o valor da caixa de texto ao seu lado, enviando o novo valor ao micro controlador para armazenagem, e atualiza o gráfico do mapa.

No canto superior esquerdo se encontram os comandos de ajuste para o controlador de velocidade angular. A referência de velocidade indicada em *Referência [RPM]* mostra o valor em rotações por minuto armazenado. Um novo valor de referência deve ser inserido na caixa de texto ao lado do botão *atualizar*, logo acima. O botão captura e envia esse novo valor ao micro controlador. Os comandos nos botões *P* e *I* se referem ao ajuste dos parâmetros do controlador de velocidade angular programado no micro controlador da central de gerenciamento, que apresenta uma estrutura do tipo proporcional-integral. O controlador foi ajustado de forma empírica com o objetivo de realizar demonstrações e testes durante a fase de desenvolvimento da central de gerenciamento. A inserção de um algoritmo de controle no programa do micro controlador foi feita prevendo o funcionamento do motor em aplicações estacionárias. Os ensaios para modelagem e projeto de controlador foram realizados posteriormente e serão discutidos no capítulo 5. O controle de velocidade angular só é ativado quando requisitado. Durante o funcionamento do controle, a barra de rolagem do acelerador não produzirá efeitos no acelerador. Os valores de referência para posição angular na abertura do acelerador são enviados e armazenados no micro controlador e serão utilizados apenas quando o controle de velocidade angular for desativado.

## **4.6. Bancada de testes**

A bancada utilizada para os ensaios do motor consiste, essencialmente, em um ventilador centrífugo com obturação na passagem de entrada de ar. Ela foi projetada para ser utilizada em testes de durabilidade do motor, no centro de desenvolvimento do fabricante do motor. A Figura 4-18 apresenta uma fotografia do motor sobre a bancada de testes.

O motor (1) é montado sobre uma placa retangular (2) que serve de tampa para a carcaça (3) do ventilador centrífugo ao qual ele está acoplado. O bombeamento é realizado pela rotação de uma hélice de duas pás acoplada diretamente ao eixo do motor que está confinada na carcaça retangular. Por se tratar de um ventilador centrífugo, a potência requerida para seu funcionamento aumenta com a passagem de fluido.



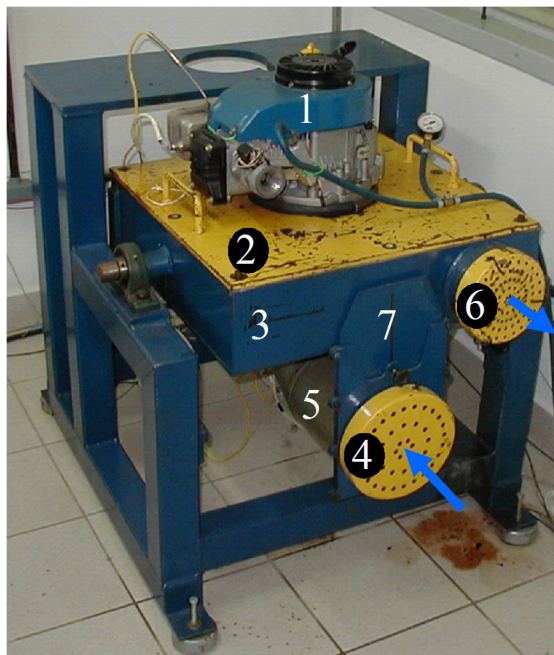


Figura 4-18: Fotografia do motor e da bancada de testes.

O fluido de trabalho do ventilador é o ar ambiente admitido axialmente, alinhado com o eixo do motor, pela parte inferior da carcaça (4 e 5) e expelido tangencialmente (6). A vazão mássica de ar pode ser regulada através da guilhotina (7), uma válvula do tipo *gaveta* na entrada, e desta forma é possível variar o torque imposto ao motor.

Existe espaço livre entre carcaça e pás, possibilitando recirculação interna significativa de fluido. Isso limita a carga mínima que a bomba impõe ao motor, e restringe a excursão de torque resistente em cada velocidade angular do motor. Os ensaios foram realizados com a *guilhotina* ora totalmente aberta, ora totalmente fechada para comparação de duas curvas de carga diferentes.

#### 4.7. Sistema de aquisição de dados

O sistema de coleta de dados ideal deve possuir a capacidade de monitorar simultaneamente e com alta frequência de amostragem todos os dados passíveis de medição no motor.

Entretanto, por questões de objetividade do trabalho diante da limitação de espaço físico, recursos materiais e de capital e tempo requerido na montagem de tais equipamentos, foi maximizada a quantidade de variáveis medidas de acordo com os equipamentos prontamente disponíveis ou mais facilmente fabricáveis.

O conjunto de variáveis medidas é suficientemente completo para abordar um dos objetivos de controle de motores: o controle de velocidade angular do motor.

O sistema de coleta de dados utilizado consiste em uma placa de aquisição micro controlada que foi desenvolvida como parte do projeto. O conjunto de variáveis na tabela 4-2 é amostrado pela placa com uma frequência de 300 Hz, e enviado ao computador para armazenamento através de comunicação serial. Os quadros enviados pela placa de aquisição ao computador são ilustrados na figura 4-19.

Medida RPM (16 bits)	Sonda $\lambda$ (16 bits)	Acelerador (16 bits)	Pressão admissão (16 bits)	Temp. Escapam. (16 bits)	T <sub>injeção</sub> (16 bits)	Atraso ignição (16 bits)
-------------------------	------------------------------	-------------------------	-------------------------------	-----------------------------	-----------------------------------	-----------------------------

Figura 4-19: Estrutura do quadro enviado pela placa de aquisição.

Tabela 4-2: Relação das variáveis adquiridas para monitoramento.

Designação	Tipo/nível	Informações obtidas
Abertura do acelerador	Analógico / sinal	Massa de ar admitida
Temperatura escapamento	Analógico / sinal	Temperatura dos componentes do escapamento como a válvula de escape
Pressão do ar no coletor de admissão	Analógico / sinal	Massa de ar admitida
Sonda Lambda	Analógico / sinal	Quantidade de oxigênio nos gases de escape, indicando falta ou excesso de combustível.
Comando do bico injetor	Digital / potência	Massa de combustível admitida, sincronia de disparo da ignição.
Sinal de Sincronia	Digital / sinal	Sincronia para injeção, ignição, e cálculo de velocidade angular.

O quadro é composto pelos valores de velocidade angular, de leitura de sonda  $\lambda$ , de posição de acelerador, de pressão de coletor, de temperatura de escapamento, de período do comando de injeção e de ângulo de atraso de ignição medidos dos sensores e das saídas da central de gerenciamento.

Convém salientar que o valor de posição angular do acelerador é coletado diretamente no potenciômetro de realimentação interno ao servo-motor.

O quadro de transmissão é acrescido de um caractere para término e outro para retorno de linha, interpretado como final de quadro na recepção dos dados no computador. A comunicação com a placa de aquisição não possui controle de fluxo de transmissão, e a frequência de transmissão de dados é definida como uma fração da frequência do relógio do micro controlador da placa. A recepção dos dados é feita pelo programa *Hyperterminal*.

Ele oferece o recurso de registro dos caracteres recebidos em um arquivo de texto, extensão *.txt*, para posterior consulta. Cada pacote de dados recebidos é armazenado em uma linha do arquivo. Essa formatação permite visualização dos dados diretamente pelo usuário, e pode ser utilizado diretamente pelo programa *Matlab*®, que importa os dados do arquivo de texto diretamente no formato de matriz. Cada coluna da matriz se refere a uma das variáveis monitoradas, e o número de linhas da matriz corresponde à quantidade de amostras coletadas para cada uma.

## 5. ENSAIOS E DISCUSSÃO

Os ensaios foram realizados para levantar as características de comportamento dinâmico da velocidade angular do eixo do motor, variando as entradas de controle definidas pela central de gerenciamento: a posição angular da borboleta do acelerador, a duração do comando de injeção e o ângulo de comando da ignição.

Primeiramente serão apresentadas considerações a respeito dos dados coletados nos ensaios, notadamente, sobre a característica das medições de pressão do ar no coletor de admissão. Em seguida serão apresentados os ensaios e os modelos para o motor e o coletor de admissão. Segundo o diagrama de blocos proposto na seção 3.1, ilustrado na figura 5-1.

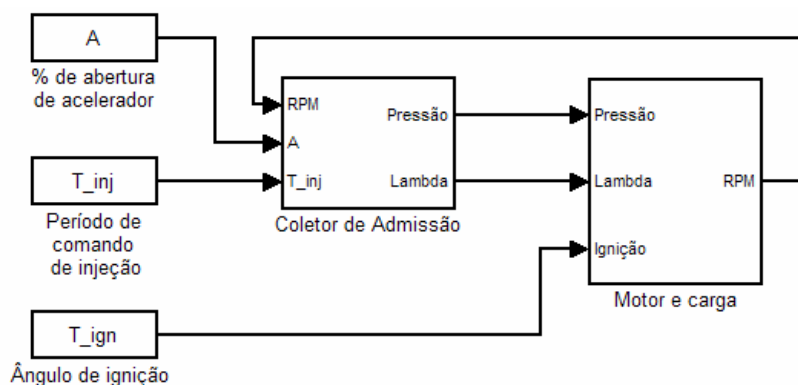


Figura 5-1: Diagrama de blocos proposto como modelo do motor e do coletor de admissão.

O modelo do coletor de admissão transforma as entradas de duração do pulso de injeção e abertura percentual de acelerador em pressão de ar do coletor e valor de  $\lambda$  da mistura.

O modelo do coletor de admissão é utilizado para:

- estimar o valor da pressão do ar no coletor de admissão utilizando os valores de abertura de borboleta de acelerador e velocidade angular do motor,
- estimar o valor de  $\lambda$  da mistura utilizando o valor estimado da pressão do ar no coletor e a duração do pulso de injeção.

O levantamento do modelo do motor foi realizado considerando que a mudança de espaço de estados de entrada realizada pelo modelo do coletor de admissão permite decorrelacionar as novas entradas de controle. Portanto, o modelo do motor foi dividido em 3 submodelos, considerando separadamente a influência de cada uma das entradas de

controle na velocidade angular do motor. O modelo do motor é dado pela soma das contribuições na velocidade angular em função dos valores de:

- $\lambda$  da mistura admitida,
- ângulo de comando de ignição aplicado,
- pressão do ar no coletor de admissão, usada na estimativa da massa de ar admitida.

## **5.1. Considerações sobre os ensaios e o sistema**

Conforme apresentado na seção 2.1.3, o motor de combustão interna necessita constantemente de ajustes na quantidade de combustível, de acordo com as variações na quantidade de ar que entra no cilindro a cada ciclo. Isso é necessário para possibilitar a ignição da mistura, e manter o motor em funcionamento.

Os ajustes da quantidade de combustível são realizados em função dos mapas de injeção e ignição pré-definidos no programa embarcado. A pesquisa dos valores nos mapas é baseada nas leituras de abertura percentual do acelerador e velocidade angular do motor. O uso de informações a jusante do processo, como a velocidade angular, caracteriza a realimentação de medidas para determinar as ações de controle.

Os mapas atuam como controladores do tipo proporcional definindo os valores de pulso de injeção e atraso de ignição. O controle implantado através dos mapas é não-linear do tipo *gain scheduling*, pois os valores armazenados variam de forma não-linear, de acordo com a região de funcionamento do motor.

Sendo assim, os dados e os modelos obtidos para o coletor de admissão e o motor correspondem ao comportamento registrado em malha fechada.

Considerando a falta de disponibilidade de medições de torque e potência no ambiente de teste desenvolvido, incrementos na potência fornecida pelo motor são detectados através do aumento na velocidade angular do motor, sendo que o torque e a potência exigidos pelo ventilador utilizado como carga aumentam em função da velocidade angular.

## **5.2. Considerações sobre a pressão de ar no coletor de admissão**

Conforme a descrição do subsistema de alimentação de ar do motor, na seção 4.2.1, o coletor de admissão possui dimensões reduzidas, e não conta com um filtro de ar de

admissão. As dimensões reduzidas e a admissão realizada para um único cilindro implicam na forma do sinal de pressão interna do coletor ilustrada na figura 5-2.

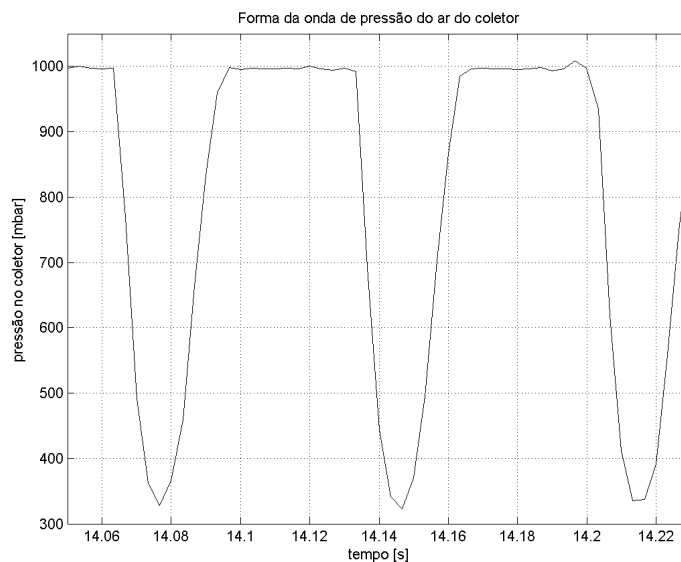


Figura 5-2: Forma do sinal de pressão do ar no coletor de admissão.

A pressão do ar no coletor baixa à medida que o ar é aspirado pelo motor. Porém, admissão intermitente do cilindro único permite que a pressão do ar no coletor retorne ao valor da pressão atmosférica antes da próxima admissão. O valor mínimo que a pressão atinge a cada admissão está relacionado à pressão interna do cilindro. Isso se apóia nas seguintes suposições:

- o valor da pressão no coletor de admissão diminui durante o período em que o motor aspira o ar,
- o volume de ar no coletor é pequeno em relação ao volume do cilindro.

Considera-se então que valor de pressão mínima durante a admissão fica definido como a estimativa do valor da pressão interna do cilindro no fechamento da válvula de admissão.

Os ensaios realizados a seguir utilizam a pressão mínima como valor de pressão de coletor, e estimativa de enchimento do cilindro, para efeitos de modelagem e de análise de resultados.

### 5.3. Modelagem do coletor de admissão

O modelo do coletor de admissão foi definido na seção 3.1.1 tendo como entradas: abertura percentual do acelerador, período do pulso de comando do bico injetor e velocidade

angular do motor. As saídas propostas são: a pressão de ar do coletor e o valor de  $\lambda$  da mistura. A figura 5-3 ilustra o diagrama de blocos da estrutura proposta para o modelo do coletor de admissão na seção 3.1.1.

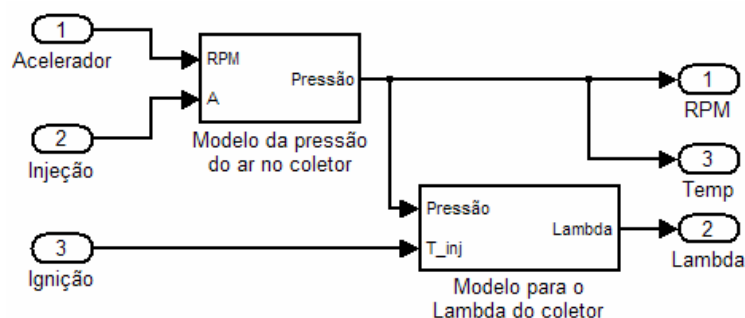


Figura 5-3: Estrutura do modelo proposto para o coletor de admissão.

Os ensaios realizados para obter as estimativas da pressão de coletor e do valor de  $\lambda$  são relacionados na tabela 5-1.

Tabela 5-1: Relação dos ensaios para modelagem do coletor de admissão.

Guilhotina aberta	Abertura de acelerador (%)								
	20	25	30	35	40	45	55	65	
Atraso (°)	70	1	1	1	1	1	1	1	1

Os ensaios foram realizados mantendo fixo o ângulo de início de ignição, no valor de 70 graus após o sinal de sincronia recebido do sensor magnético do volante de inércia (20 graus antes do PMS). A guilhotina da bancada de testes foi colocada na posição que permite a maior passagem de ar, impondo ao motor a maior resistência permitida pela bancada.

A tabela 5-2 apresenta a relação entre período do comando de injeção, velocidade angular do motor, abertura percentual de acelerador e pressão de coletor, onde a leitura da tensão da sonda EGO para  $\lambda=1$  para os ensaios da tabela 5-1.

Tabela 5-2: Relação dos pontos de referência para dosagem correta do combustível.

Ensaio	1	2	3	4	5	6	7	8
Abertura referência [%]	20	25	30	35	40	45	55	65
Abertura medida [%]	20,0	26,2	31,0	34,0	41,5	45,4	54,5	64,7
$\omega$ [RPM]	1743	2108	2270	2460	2677	2836	3082	3214
$T_{inj}$ [us]	2690	2801	3107	3257	3653	3830	4282	4557
Pressão [mbar]	329	378	446	511	587	645	761	861

### 5.3.1. Modelo para a pressão do ar do coletor

Através da modelagem da pressão do ar do coletor pretende-se eliminar a necessidade de um sensor de pressão para a determinação da vazão mássica de ar admitido pelo motor. Tal iniciativa tem por objetivo a redução de custos associados à compra e instalação de componentes necessários à implantação do sistema de gerenciamento eletrônico aqui proposto. O modelo para a pressão foi levantado considerando a seguinte estrutura:

$$p_{est}(\alpha, \omega) = g_1(\omega) \cdot g_2(\alpha) \quad (5-1)$$

$$g_1(\omega) = 70 + \frac{251100}{270 + \omega}, \quad \omega \geq 0 \quad (5-2)$$

$$g_2(\alpha) = \frac{p_{medido}(\alpha, \omega)}{g_1(\omega)} \quad (5-3)$$

A função  $g_1(\omega)$  foi obtida monitorando a pressão do coletor em função da perda de velocidade angular, com o acelerador em 0% de abertura, conforme a figura 5-4.

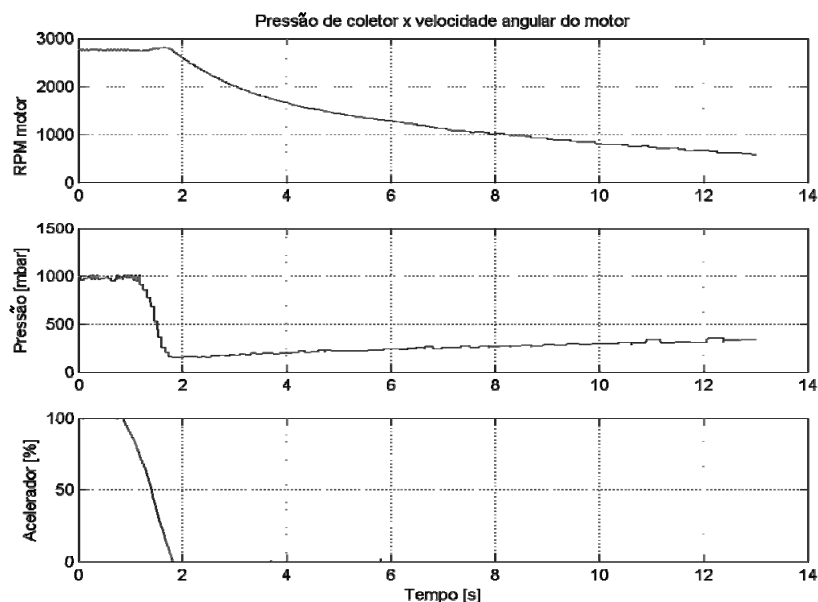


Figura 5-4: Pressão de ar do coletor em função da velocidade angular do motor.

A função  $g_2(\alpha)$  foi obtida tomando os pontos da tabela de ensaios, gerando um vetor de correção da pressão em relação à abertura de acelerador. A figura 5-5 mostra essa relação.



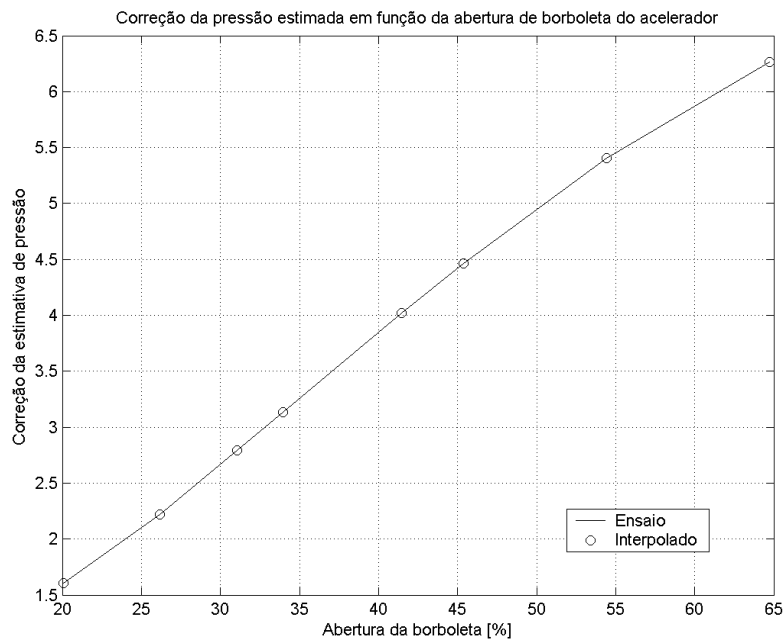


Figura 5-5: Correção da estimativa da pressão do ar no coletor pela abertura da borboleta do acelerador.

Os valores de correção em função da abertura percentual do acelerador para a estimativa de pressão fornecida por  $g_1(\omega)$  são obtidos através da interpolação linear do vetor de correções. A extrapolação usando a aproximação do vetor de correção por *splines* cúbicas fornece a curva gerada na figura 5-6.

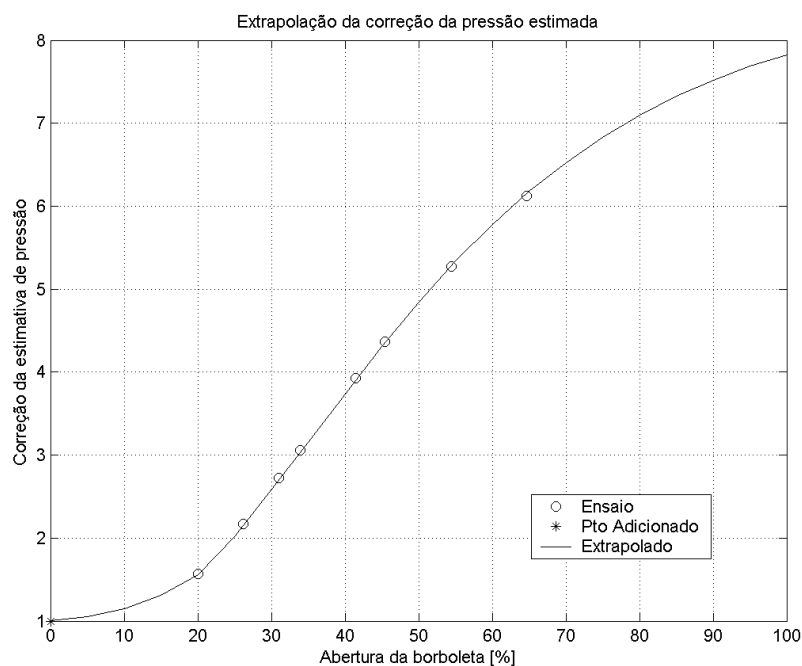


Figura 5-6: Extrapolação do vetor de correção da estimativa de pressão de ar do coletor.

Como a modelagem da pressão de coletor partiu da curva de resposta para acelerador completamente fechado, a correção que deve ser feita pela estimativa em relação à velocidade angular com nesse ponto é unitária. Por isso, foi adicionado o ponto para auxiliar na obtenção da curva de correção da estimativa de pressão em função da abertura de acelerador.

A avaliação da estimativa de pressão em função da velocidade angular e da abertura de acelerador gera uma superfície ilustrada na figura 5-7, que é utilizada como referência para interpolação, e representa o modelo de pressão do ar de coletor.

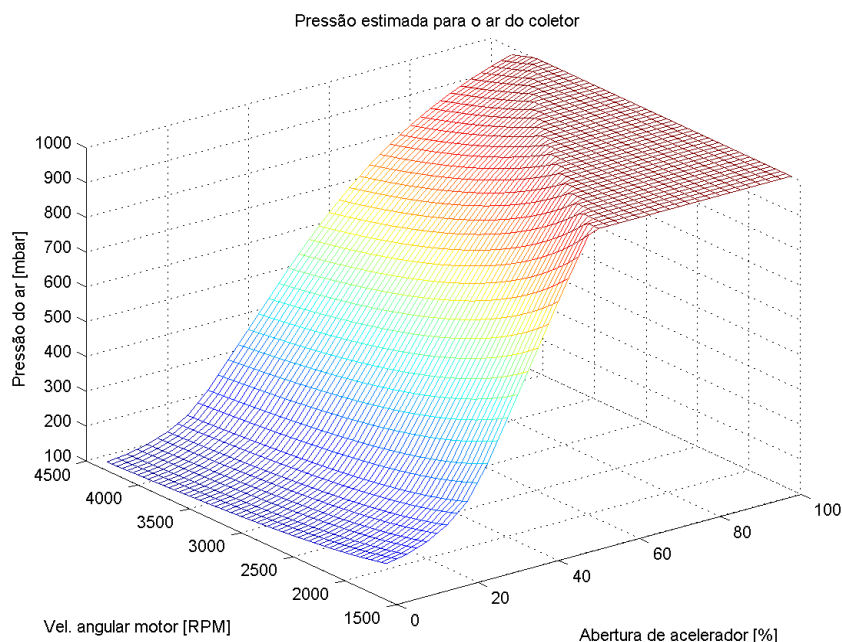


Figura 5-7: Superfície gerada pelo modelo de pressão do ar do coletor.

A figura 5-8 ilustra os valores de pressão estimados em relação aos dados coletados. Os picos de erro de estimação se devem aos períodos de mudança brusca na abertura do acelerador, que implicam em mudanças bruscas no valor de pressão. Esse erro se deve ao atraso na estimação devido à aplicação de um filtro passa-baixas no sinal de acelerador, para amenizar o ruído de medição. A medição do acelerador com menor intensidade de ruído permitiria aumentar a frequência de corte do filtro, e realizar estimativas mais exatas nos transientes. Em regime, ou para mudanças menos bruscas do acelerador, o modelo reproduz satisfatoriamente a pressão de coletor, com erros de estimação com a mesma

intensidade dos ruídos de medição na pressão de coletor, da ordem de 5%, conforme a figura 5-9.

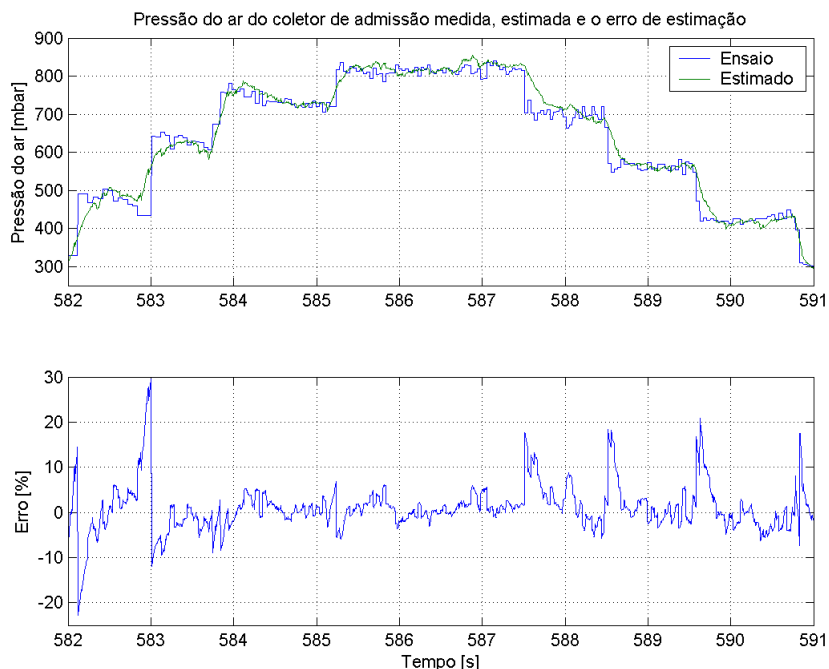


Figura 5-8: Avaliação da pressão do ar de coletor e seu erro de estimação para variações bruscas de acelerador.

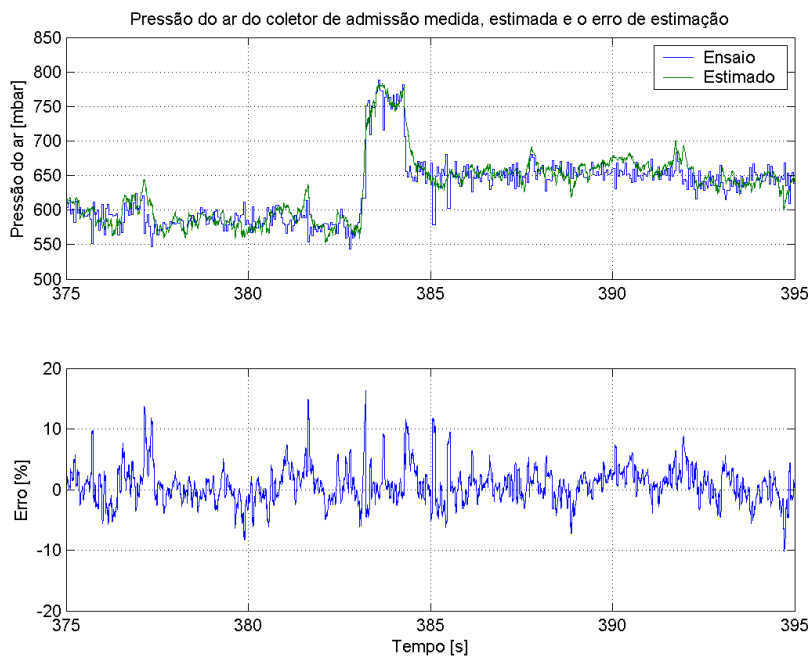


Figura 5-9: Avaliação da pressão do ar do coletor e seu erro de estimação em regime permanente.

### 5.3.2. Modelo para o valor de $\lambda$ no coletor

O modelo para a estimação do valor  $\lambda_{estimado}$  é apresentado pela equação 5-4, que relaciona o período de abertura  $T_{ref}$  estimado para obter  $\lambda=1$  com o período de comando de injeção efetivamente aplicado  $T_{inj}$ . O modelo para  $T_{ref}$  na equação 5-5 é definido como a relação  $f(p, T_{\lambda=1})$  entre a pressão estimada  $p_{estimada}$  do ar do coletor de admissão e o período de comando de injeção  $T_{\lambda=1}$  medido nos pontos onde o sensor EGO indica leitura de  $\lambda=1$ .

$$\lambda_{estimado} = \frac{T_{ref} - \theta_{abertura}}{T_{inj} - \theta_{abertura}} \quad (5-4)$$

$$T_{ref} = f(p_{estimada}, T_{\lambda=1}) \quad (5-5)$$

sendo :

$T_{ref}$  : período de comando de injeção estimado para obter  $\lambda=1$  [ $\mu s$ ];

$T_{inj}$  : período de comando de injeção aplicado ao motor [ $\mu s$ ];

$T_{\lambda=1}$  : período de comando de injeção coletado nos ensaios onde  $\lambda=1$  [ $\mu s$ ];

$p$  : pressão de ar de coletor estimada [mbar];

$\theta_{abertura}$  : período de abertura do bico injetor [ $\mu s$ ].

A figura 5-10 mostra o valor do período de injeção em relação à pressão do ar no coletor para  $\lambda$  unitário coletados durante ensaios.

O vetor dos dados dos ensaios foi extrapolado utilizando *splines* cúbicas. O ponto adicional está relacionado à suposição de que uma pressão nula de ar de entrada no cilindro requer apenas que o período do comando do bico injetor seja igual ao tempo de abertura do bico, equivalente a 2000  $\mu s$ .

A relação entre pressão e período do pulso de comando de injeção é aplicada ao mapa estimado para a pressão do ar no coletor, fornecendo a estimativa de período de comando de injeção a ser utilizado para obter o valor de  $\lambda$  unitário. A superfície gerada para os valores de período de comando do bico injetor em função da abertura da borboleta do acelerador e da velocidade angular do motor é ilustrada na figura 5-11.

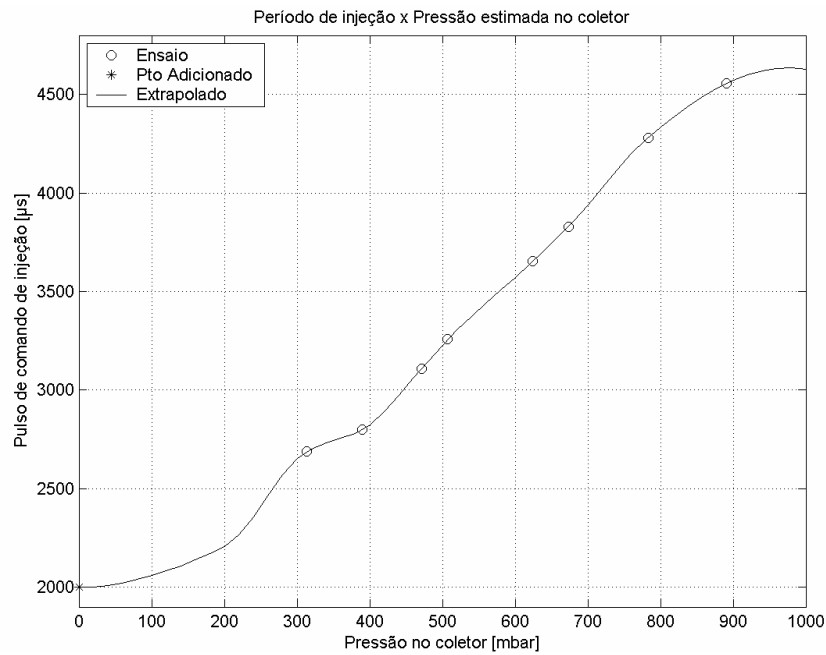


Figura 5-10: Característica de pressão do ar do coletor e período de injeção.

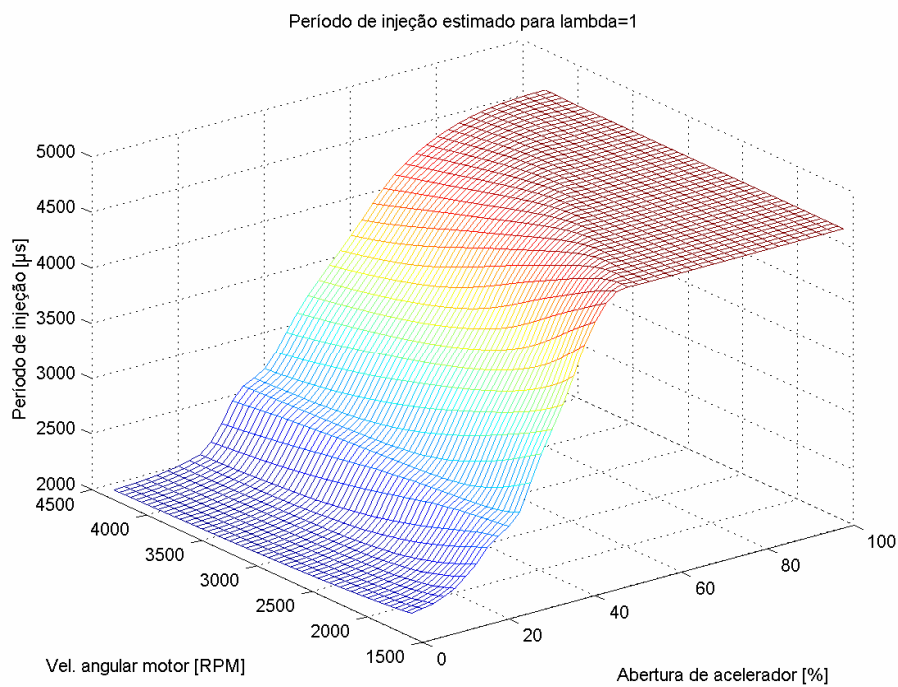


Figura 5-11: Mapa de período de injeção para  $\lambda = 1$ .

A superfície indica o valor de  $T_{ref}$  na equação 5-1 que permite calcular o valor de  $\lambda_{estimado}$ . O valor de  $lambda$  estimado  $\lambda_{estimado}$  é comparado com o valor de  $\lambda$  aproximado obtido pela leitura da sonda instalada no escapamento do motor na figura 5-12.

Levando em consideração as características não-lineares do sensor do tipo bipolar utilizado (EGO), a estimação para o valor de  $\lambda$  fornecida pelo modelo é satisfatória na medida em que acompanha a tendência do valor estimado para o  $\lambda$  oriundo da sonda.

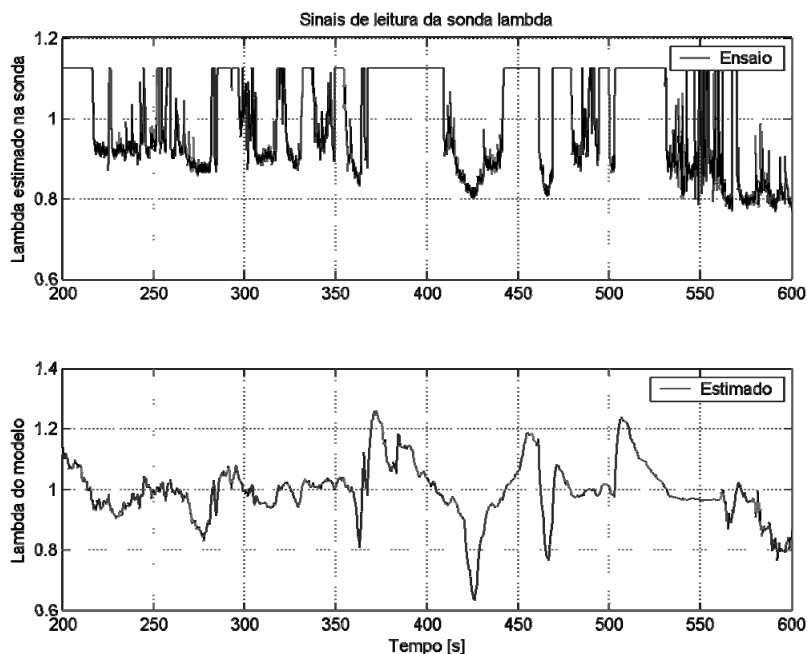


Figura 5-12: Valores estimados de  $\lambda$  pelo modelo e pelo sensor bipolar.

Para a validação da modelagem e para obter estimativas mais exatas do valor de  $\lambda$  através de melhorias no modelo é necessário recorrer ao uso de uma sonda linear (UEGO).

Mesmo assim, a estimativa fornecida pelo modelo para o valor de  $\lambda$  permite considerar o seu uso num sistema de gerenciamento eletrônico em aplicações com restrições menos severas nos níveis de emissões, onde se recomendaria a calibração periódica da central de gerenciamento.

Em aplicações nas quais as restrições de níveis de emissões são mais exigentes, faz-se necessário o uso de ajustes automáticos através do uso de uma sonda  $\lambda$  do tipo EGO ou UEGO, pois desvios na composição do combustível [14] não são detectados pelas estimativas fornecidas pelo modelo.

Apesar de estar sujeito a erros de estimação, o modelo para  $\lambda$  tem grande utilidade na comparação com as leituras do sensor EGO, permitindo identificar diferenças entre um combustível de referência (ex.: gasolina tipo C) para o qual o modelo foi calibrado e o combustível fornecido ao motor durante o funcionamento. A diferença entre os valores de  $\lambda$  lidos e estimados fornece uma informação valiosa em aplicações de sistemas de

gerenciamento bi-combustível, permitindo inferir sobre a proporção de álcool no combustível fornecido ao motor.

## 5.4. Influência do valor de $\lambda$ no comportamento do motor

O modelo é obtido considerando que as correlações do valor de  $\lambda$  com as outras entradas de controle são insignificantes, supondo então que o motor possui característica linear. O comportamento é analisado na região próxima ao valor unitário do  $\lambda$ .

### 5.4.1. Procedimento dos ensaios de $\lambda$

A medição do valor de  $\lambda$  é feita através de uma sonda *lambda* bipolar instalada no coletor de escapamento do motor. Porém, a sensibilidade da sonda utilizada limita as leituras a valores muito próximos ao estequiométrico. O valor de  $\lambda$  é calculado usando a equação 5-1 que fornece o valor estimado  $\lambda_{estimado}$ , comparando o período do pulso aplicado ao bico  $T_{inj}$  com o período referência  $T_{ref}$ . Conforme explicado na seção 4.4.6 que descreve a programação da central de gerenciamento, a injeção de combustível é comandada a cada revolução do virabrequim. São dois pulsos de comando para cada admissão, uma no começo do ciclo de expansão e outra logo antes de começar a admissão. O volume de combustível injetado para cada admissão é o dobro daquele correspondente à duração do pulso de injeção dado pela curva de calibração do bico injetor, indicada na figura 4-5. Para evitar os efeitos dinâmicos durante variações de abertura de acelerador e mudanças do período de injeção, as medidas no motor foram realizadas após a estabilização da velocidade angular. Portanto, o modelo obtido representa somente o comportamento estático da velocidade angular do motor em relação ao valor de  $\lambda$ .

Os ensaios foram realizados seguindo a seqüência:

- definir uma abertura para o acelerador,
- esperar estabilizar a velocidade angular do motor,
- modificar a quantidade de combustível, em relação às medições fornecidas pela sonda *lambda* bipolar instalada no escapamento do motor,
- repetir a partir do passo 2 modificando a proporção ar-combustível,
- repetir a partir do passo 1 para diferentes valores de abertura de acelerador.

Os ensaios realizados se encontram na tabela 5-1, na seção de modelagem do coletor de admissão.

### 5.4.2. Discussão e análise dos ensaios de $\lambda$

Um dos ensaios realizados pode ser visto na figura 5-13, que mostra as leituras de tensão da sonda  $\lambda$  bipolar, de período de comando do bico injetor e de velocidade angular do motor. A característica estática entre os valores de velocidade angular em função e  $\lambda_{estimado}$  pode ser visualizada na figura 5-14.

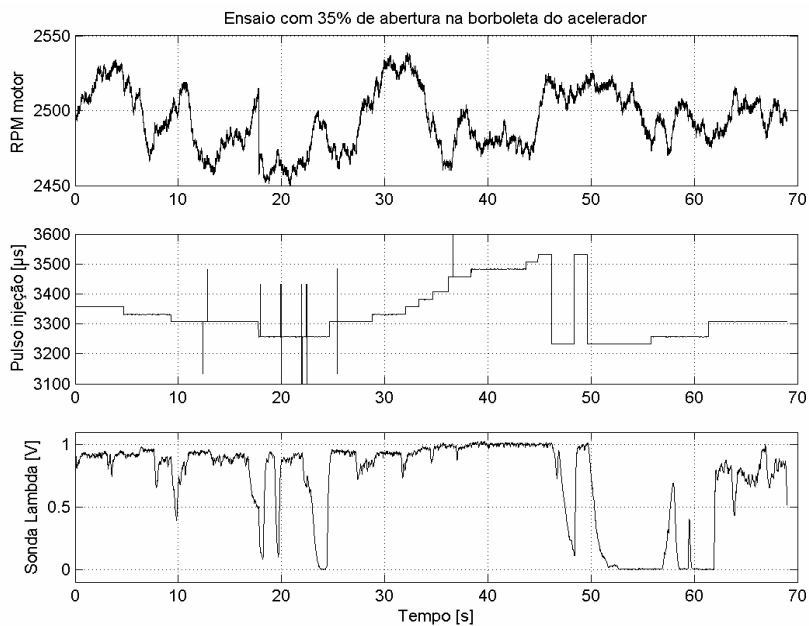


Figura 5-13: Ensaio de variação da relação ar-combustível.

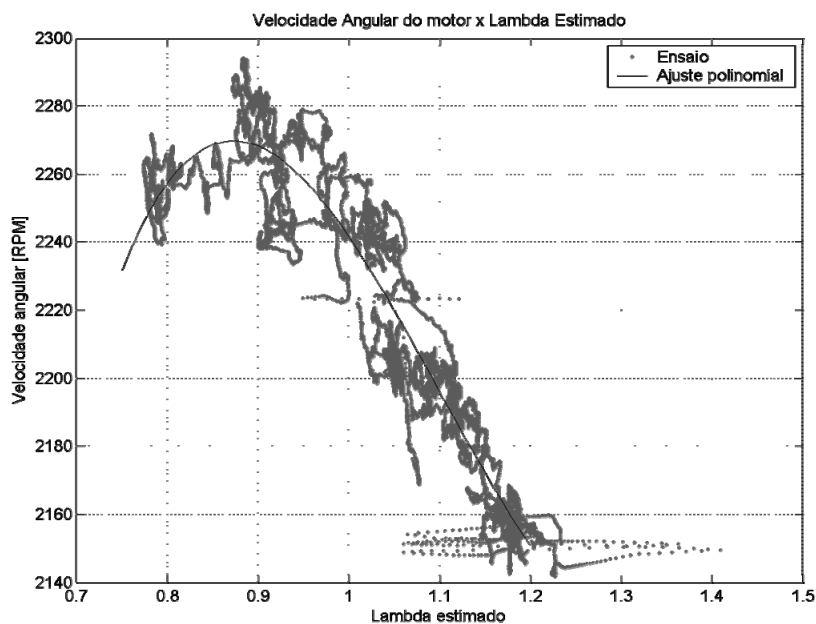


Figura 5-14: Velocidade angular em função do valor de  $\lambda_{estimado}$ .



O ajuste polinomial na figura 5-14 representa a tendência dos dados. Nesse ensaio, os maiores valores de velocidade angular são alcançados ao redor de  $\lambda_{estimado}=0,88$ . Observa-se também que a velocidade angular diminui com maior intensidade para valores de  $\lambda > 1$  (mistura pobre em combustível) do que para  $\lambda < 1$  (mistura rica em combustível).

A tabela 5-3 apresenta os valores de  $\lambda_{estimado}$  e o ganho de velocidade angular relação ao valor registrado para  $\lambda=1$  nos ensaios realizados.

Tabela 5-3:  $\lambda_{estimado}$  em relação à velocidade angular do motor.

Ensaio	1	2	3	4	5	6	7	8
$\omega$ para $\lambda=1$ [RPM]	1743	2108	2270	2460	2677	2836	3082	3214
$\omega$ máximo [RPM]	1760	2125	2294	2537	2710	2860	3103	3246
$\lambda_{estimado}$	0,922	0,855	0,881	0,935	0,922	0,953	0,935	0,943
Ganho de $\omega$ [%]	0,98	0,81	1,06	3,13	1,23	0,85	0,68	1,00

A média dos valores de  $\lambda_{estimado}$  para atingir a maior velocidade angular é 0,916. O aumento médio de velocidade angular é de 1,22%.

Conclui-se que a definição do valor do período do comando de injeção deve ser feita com base em outros critérios, já que o aumento da velocidade angular não é significativo para o motor aqui considerado.

## 5.5. Influência do ângulo de comando de ignição

Os ensaios de variação do ângulo de início de ignição foram realizados no sentido de definir a relação dinâmica da velocidade angular do eixo do motor em relação ao ângulo de início de ignição. A modelagem é realizada considerando que as correlações do ângulo de comando de ignição com as outras entradas de controle são insignificantes, supondo então que o motor possui característica linear.

Convém salientar que a medida do ângulo de ignição foi definida em relação ao sinal de sincronia captado pelo sensor magnético instalado próximo ao volante de inércia, descrito na seção 4.2. O sensor foi instalado aproximadamente 90 graus antes do PMS.

Para efeitos da discussão a seguir, os valores de posição angular para o comando da ignição serão definidos em função do ângulo percorrido a partir da posição do sensor.

### 5.5.1. Procedimento dos ensaios de atraso de ignição

Os ensaios de variação do ângulo de comando da ignição foram realizados seguindo a seqüência:

- definir uma abertura para o acelerador,
- esperar estabilizar a velocidade angular do motor,
- aplicar uma seqüência binária pseudo-aleatória, ora subtraindo 10 graus no atraso de ignição, ora retornando ao valor inicial,
- esperar a seqüência terminar, com o ângulo de comando de ignição retornando ao valor inicial,
- repetir a partir do passo 1 para diferentes valores de abertura de borboleta do acelerador e de ângulos de comando de ignição.

Os ensaios foram realizados para os valores percentuais de abertura de acelerador e ângulo de comando de ignição definidos nas tabelas 5-4 e 5-5.

Tabela 5-4: Ensaios de variação no ângulo de comando de ignição com a maior carga.

Guilhotina aberta		Abertura de acelerador (%)			
		25	35	60	90
Atraso (°)	70	1	1	1	1
	80	1	1	1	1

A tabela 5-4 se refere aos ensaios realizados com a guilhotina da bancada de testes na posição de maior fluxo de ar (maior carga), enquanto que a tabela 5-5 indica os ensaios referentes à guilhotina na posição de menor fluxo de ar (menor carga).

Tabela 5-5: Ensaios de variação no ângulo de comando de ignição com a menor carga.

Guilhotina Fechada		Abertura de acelerador (%)	
		25	35
Atraso (°)	70	1	1
	80	1	1

### 5.5.2. Considerações sobre o comando de ignição

Um dos ensaios realizados pode ser visto na figura 5-15, que mostra os valores das leituras de velocidade angular do motor frente a variações no ângulo de comando de ignição.

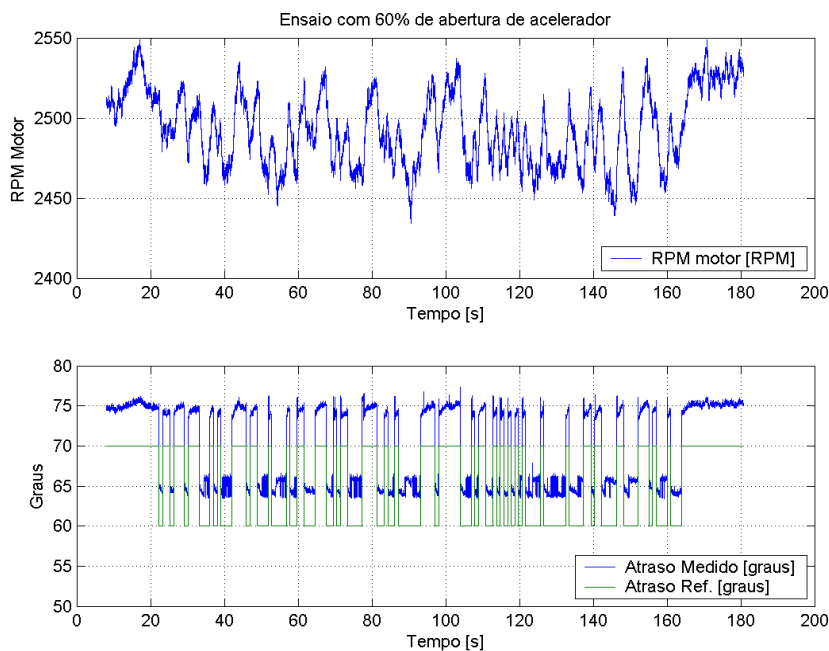


Figura 5-15: Ensaio de variação no atraso do comando de ignição.

Existe um desvio sistemático entre os valores de atraso de ignição desejados e os atrasos efetivamente aplicados pela central de gerenciamento, que no ensaio apresentado corresponde a aproximadamente 5 graus para mais. Para visualizar com maior clareza a relação estática entre as variáveis, a figura 5-16 mostra o gráfico da velocidade angular em função do atraso de ignição (medido em relação ao sensor de posição angular do virabrequim).

O instante para comando da ignição é calculado como uma fração do período de rotação correspondente à posição angular desejada para que seja produzida a faísca. O tempo é contado a partir da detecção do pulso emitido pelo sensor de posição angular do volante de inércia, localizado aproximadamente 90 graus antes do PMS. O comando da ignição é aplicado após o término dessa fração do período, que corresponde ao ângulo avanço de ignição desejado.

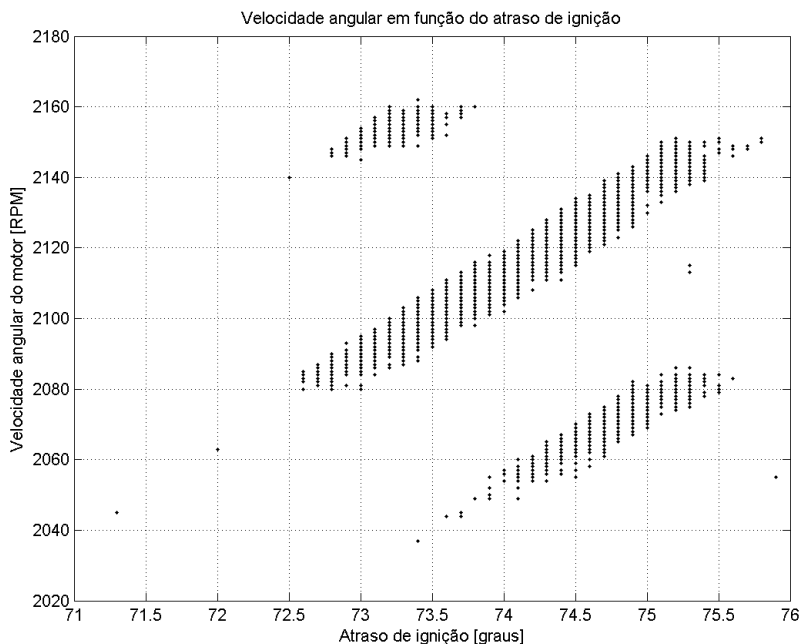


Figura 5-16: Velocidade angular em relação ao ângulo de comando da ignição.

A exatidão do momento de comando de ignição depende da resolução de medição do período de rotação, da resolução de aplicação dos sinais de controle e do arredondamento numérico do algoritmo escolhido para calcular o valor do atraso. A figura 5-17 ilustra a relação entre o atraso de ignição e o período de rotação do eixo do motor.

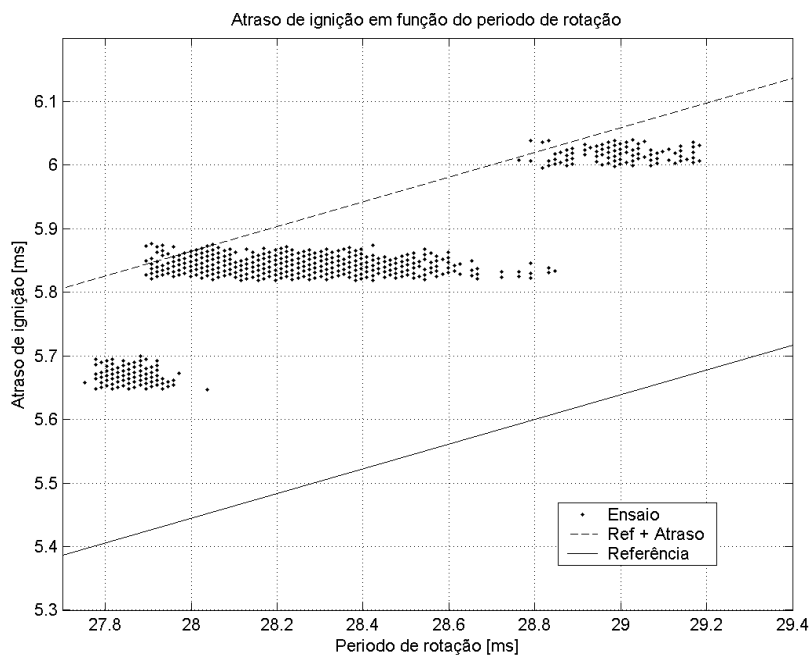


Figura 5-17: Período de rotação em relação à espera para comando de ignição.

Os valores de espera para o comando da ignição são inicialmente calculados como a fração do período de rotação que corresponde ao ângulo desejado. Por exemplo, um atraso de 60 graus (avanço de 30 graus em relação ao PMS) é calculado como 1/6 do período de rotação. Na figura 5-17, a curva denominada *referência* indica a espera desejada para o comando da ignição.

A aplicação do sinal calculado está sujeita a:

- o atraso na detecção do pulso emitido pelo sensor de posição angular do virabrequim,
- a velocidade de resposta dos componentes eletrônicos do circuito de ignição.

Esses dois fatores incrementam o tempo de espera desejado com uma parcela fixa de tempo, indicada na figura pela curva *ref+atraso*.

Finalmente, o algoritmo utilizado na central de gerenciamento introduz erros de arredondamento numérico ao cálculo do instante de comando desejado que aplicado à curva *ref+atraso* gera os valores coletados nos ensaios.

Esses desvios no ângulo de comando da ignição podem ser compensados, ou contornados, pois sua característica é conhecida.

### 5.5.3. Discussão e análise dos ensaios de atraso de ignição

A obtenção do modelo de variação da velocidade angular em relação instante de comando da ignição foi realizada usando um algoritmo de identificação baseado em modelo linear do tipo auto-regressivo com entrada externa ou *ARX (Auto Regressive with eXternal inputs)*. A modelagem foi realizada considerando apenas a característica de um sistema de primeira ordem, sem zeros, com um ganho e uma constante de tempo a serem definidos, a saber:

$$g_n(s) = \frac{k_n}{\tau_n s + 1}, \quad 1 \leq n \leq 12 \quad (5-6)$$

Os valores de ganhos e constantes de tempo obtidos para os ensaios realizados estão indicados na tabela 5-6.

Tabela 5-6: Parâmetros dos modelos obtidos com nos ensaios de variação de ângulo de comando de ignição.

Ensaio	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Acelerador [%]	25	25	35	35	60	90	25	25	35	35	60	90
Atraso ref. [graus]	70	70	70	70	70	70	80	80	80	80	80	80
Guilhotina [a/f]	a	f	a	f	a	a	a	f	a	f	a	a
K	0	0	4,49	5,42	13,3	1,79	-8,94	-5,44	-1,63	-3,34	-2,29	-5,01
$\tau$ [s]	0	0	0,64	1,37	2,53	0,24	3,70	3,05	0,54	0,69	0,06	0,25

Os primeiros 6 ensaios iniciam com 70 graus (20 graus antes do PMS) e alternam para 60 graus (30 graus antes do PMS). Os últimos 6 ensaios iniciam com 80 graus (10 graus antes do PMS) e alternam para 70 de atraso (20 graus antes do PMS). Os ensaios foram realizados ora com a bancada oferecendo a maior ora a menor carga possível ao motor, para capturar o comportamento do motor em diferentes velocidades angulares e valores de carga.

O critério de avaliação escolhido para quantificar a qualidade da estimação dos dados fornecidos pelos modelos foi o do coeficiente de correlação múltipla (CRM):

$$crm = 1 - \frac{\sum_{k=1}^n (y(k) - y_{est}(k))^2}{\sum_{k=1}^n (y(k) - \bar{y})^2} \quad (5-7)$$

sendo :

$y(k)$ : valores de saída do processo real;

$y_{est}(k)$ : valores de saída do modelo;

$\bar{y}$ : média aritmética das saídas ao longo do ensaio;

$n$ : número de amostras do ensaio.

Para os ensaios realizados, os valores de CRM obtidos são mostrados na tabela 5-7. Um dos ensaios com a resposta do modelo pode ser visto na figura 5-18.

Tabela 5-7: Avaliação dos modelos para a variação no ângulo de comando da ignição.

Ensaio	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Acelerador [%]	25	25	35	35	60	90	25	25	35	35	60	90
Atraso ref. [graus]	70	70	70	70	70	70	80	80	80	80	80	80
Guilhotina [a/f]	a	f	A	f	A	a	a	f	a	F	a	A
CRM	0	0	0,76	0,26	0,46	0,23	0,59	0,46	0,19	0,44	0,27	0,54

a: aberto; f: fechado

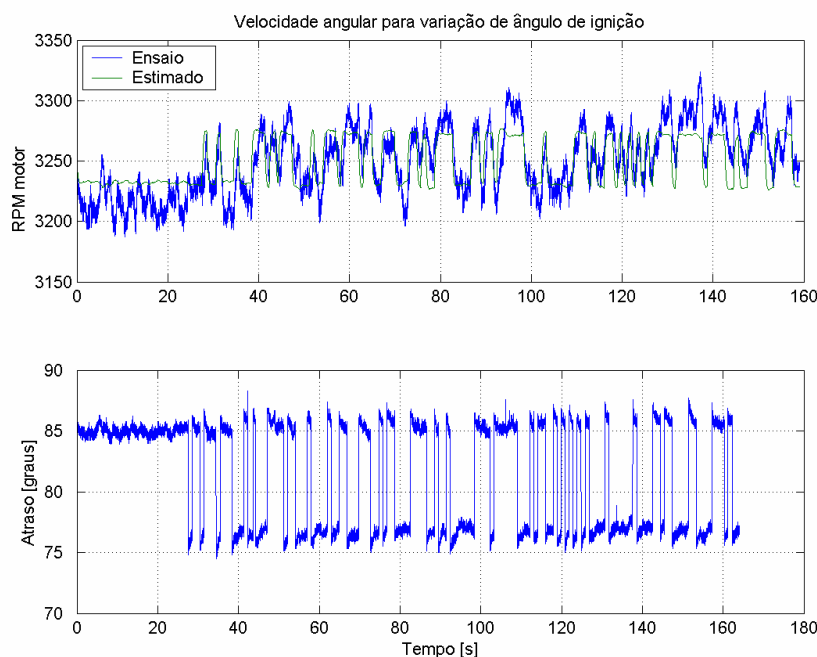


Figura 5-18: Velocidade angular do motor e do modelo identificado para variações no ângulo de comando de ignição.

Os valores obtidos para o CRM são tidos como baixos, devido à pequena amplitude na velocidade angular causada pela variação do ângulo para comando de ignição quando comparada às perturbações externas na velocidade angular do motor.

Todavia, os modelos identificados a partir dos ensaios representam corretamente a tendência da velocidade angular para alterações no ângulo de comando de ignição. Os modelos apresentam ganhos negativos para ensaios iniciando em 80 graus (10 graus antes do PMS) e ganhos positivos para os ensaios iniciando em 70 graus (20 graus antes do PMS). Isso indica que a velocidade angular do motor tende a diminuir para valores maiores ou menores que 70 graus. Considerando o desvio do ângulo de ignição aplicado pela central em relação à referência, o valor de ângulo efetivamente aplicado é de 75 graus (15 graus antes do PMS).

O sinal do ganho indica o sentido para o qual o comando de ignição deve ser modificado para obter maior velocidade angular. Valores de ganho positivo indicam que a ignição deve ser iniciada mais tarde, assim como valores negativos indicam que a ignição deve ocorrer mais cedo. O valor de atraso de ignição exibe o mesmo comportamento do valor de  $\lambda$ , assumindo um valor para o obter maior velocidade angular do motor, que varia de acordo os parâmetros de funcionamento do motor.

Considerando os valores de ganho como gradientes de primeira ordem da velocidade angular na direção do ângulo de atraso de ignição, é possível estimar os valores de posição angular para comando da ignição que fornecem a maior velocidade angular para o motor. A estimativa é realizada com pares de ensaios com a mesma abertura da borboleta do acelerador e instantes de comando de ignição diferentes. É traçada uma reta entre os valores de ganho de cada um. Essa reta estima os valores de gradiente entre os dois pontos. O ponto onde a reta tem valor nulo corresponde à variação nula da velocidade angular do motor em relação ao ângulo de comando da ignição. Outros valores tendem a diminuir a velocidade angular. Portanto, o ponto indica o valor do ângulo de comando de ignição para atingir a maior velocidade angular. O procedimento é corresponde à determinação de pontos de máximos ou mínimos locais para funções através da determinação do valor nulo da primeira derivada.

$$\left. \frac{df(x)}{dx} \right|_{x_0} = 0 \quad (5-8)$$

sendo :

$x_0$  = ponto de máximo ou mínimo local.

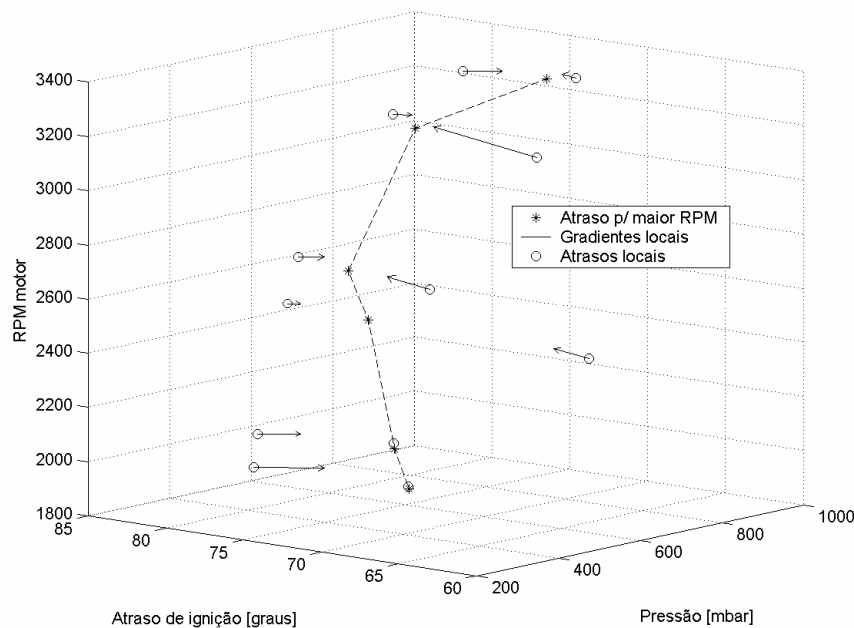


Figura 5-19: Valores estimados de ângulo de comando de ignição para obtenção de maior velocidade angular.



Os valores de ângulo de comando de ignição (em relação à posição do sensor do volante de inércia) calculados dessa forma são mostrados na figura 5-19 que mostra os valores de velocidade angular em função da pressão do ar do coletor de admissão e do ângulo de comando da ignição.

## **5.6. Influência da pressão do ar do coletor de admissão**

De acordo com a perspectiva da divisão do modelo do coletor de admissão e do motor, a variável de entrada de um dos 3 submodelos do motor é a pressão do ar do coletor de admissão. Porém, essa pressão deve ser indiretamente alterada através da posição angular da borboleta do acelerador. Assim sendo, os ensaios de influência da pressão do ar do coletor de admissão sobre a velocidade angular do motor são realizados com variações no percentual de abertura da borboleta do acelerador.

Considera-se que a escolha de variáveis, proposta na seção 3.1, desconcorrelacione as entradas para que a influência de cada uma sobre a velocidade angular possa ser modelada de forma independente e as contribuições somadas para obter a velocidade angular. Baseado na suposição da característica linear, os ensaios apresentados foram aproximados por modelos lineares.

### **5.6.1. Procedimento dos ensaios de variação na pressão do ar no coletor de admissão**

Os ensaios foram realizados de forma a capturar o comportamento da velocidade angular do motor em relação à pressão de coletor, para pequenas alterações no percentual de abertura na borboleta do acelerador.

Os ensaios de variação de pressão do ar do coletor foram realizados segundo os passos:

- definir uma abertura para a borboleta do acelerador,
- esperar estabilizar a velocidade angular do motor,
- aplicar uma seqüência binária pseudo-aleatória, ora somando, ora subtraindo uma pequena variação ao valor inicial de abertura da borboleta do acelerador para produzir alterações na pressão de ar do coletor de admissão,
- esperar a seqüência terminar, e a abertura da borboleta de acelerador retornar ao valor inicial,

- repetir a partir do passo 1 para diferentes valores de abertura de borboleta de acelerador e ângulo de comando de ignição.

Os ensaios foram realizados para os valores de percentual de abertura da borboleta do acelerador e ângulos de comando de ignição definidos nas tabelas 5-8 e 5-9.

Tabela 5-8: Ensaios de variação na pressão do ar do coletor com a maior carga.

Guilhotina aberta		Abertura de acelerador (%)					
		20	25	30	35	45	50
Atraso (°)	60	1	1	1	1		
	70	1	1		1	1	1
	80	1					

A tabela 5-8 se refere aos ensaios realizados com a guilhotina da bancada de testes na posição de maior fluxo de ar (maior carga), enquanto que a tabela 5-9 indica os ensaios referentes à guilhotina na posição de menor fluxo de ar (menor carga).

Tabela 5-9: Ensaios de variação na pressão do ar do coletor com a menor carga.

Guilhotina fechada		Abertura de acelerador (%)					
		20	25	30	35	45	50
Atraso (°)	60	1	1	1	1		1
	70	1	2		2	1	
	80	1					

### 5.6.2. Discussão e análise dos ensaios de pressão do ar no coletor de admissão

A obtenção do modelo de variação da velocidade angular em relação à pressão de ar do coletor foi realizada usando um algoritmo de identificação baseado em modelo linear do tipo auto-regressivo com entrada externa ou *ARX* (*Auto Regressive with eXternal inputs*). A modelagem foi realizada considerando apenas a característica de um sistema de primeira ordem, sem zeros, com um ganho e uma constante de tempo a serem definidos.

Com os modelos de comportamento local identificados, procede-se à definição de um modelo global. O modelo global possui a mesma estrutura dos modelos locais, sendo que o valor de constante de tempo e de ganho é definido por meio de *gain scheduling*. As superfícies para a consulta dos parâmetros do modelo global são obtidas em função do ângulo de comando da ignição e da abertura percentual da borboleta do acelerador,

utilizando os valores dos parâmetros identificados nos modelos locais para o ajuste dessas superfícies.

A figura 5-20 ilustra um dos ensaios realizados com variações na pressão do ar do coletor de admissão geradas através de variações no percentual de abertura da borboleta do acelerador. A figura 5-21 mostra um exemplo da comparação da velocidade angular do motor coletada durante o ensaio com a estimativa fornecida pelo respectivo modelo linear.

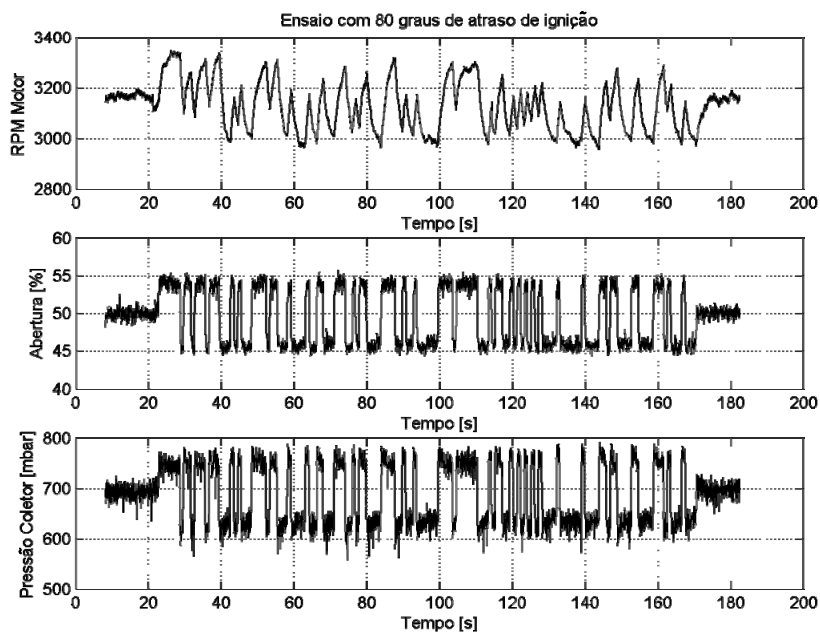


Figura 5-20: Ensaio de variação de pressão do ar do coletor de admissão.

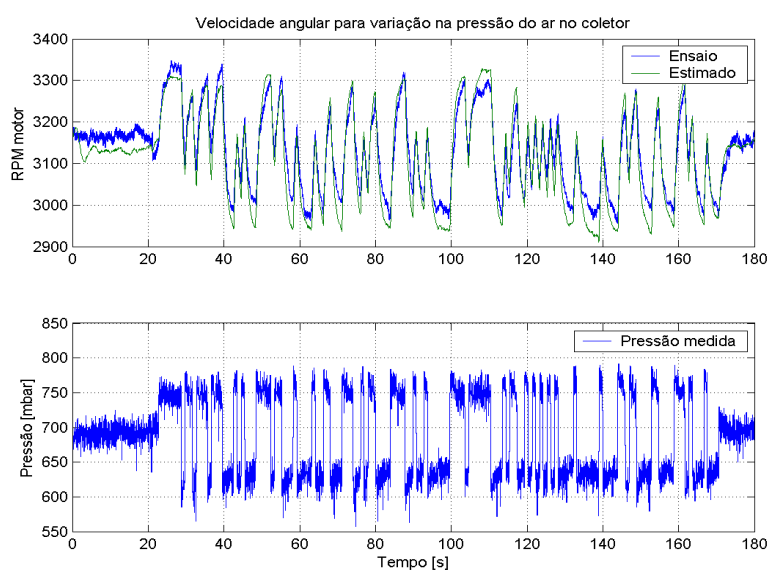


Figura 5-21: Comparação entre modelo e ensaio para variações na pressão do ar do coletor de admissão.

Os modelos locais são apresentados na tabela 5-10, que relaciona o ganho, a constante de tempo e o coeficiente de correlação múltipla calculado para cada um dos ensaios.

Tabela 5-10: Modelos locais de variação da pressão do ar do coletor de admissão.

Ensaio	Acelerador [%]	Atraso de ignição [graus]	$\omega$ motor [RPM]	$K_{ident}$ [RPM/grau]	$\tau$ [s]	CRM
1	20	60	1746	5,72	3,19	0,73
2	20	60	1845	8,44	4,02	0,66
3	20	70	1743	7,20	3,48	0,70
4	20	60	1843	8,43	4,01	0,65
5	20	80	1684	7,03	2,74	0,79
6	20	80	1821	10,13	4,73	0,29
7	25	60	1943	5,40	2,99	0,90
8	25	60	2130	5,74	2,58	0,84
9	25	70	2005	5,11	2,49	0,88
10	25	70	2138	5,36	2,18	0,88
11	25	70	2097	5,58	2,48	0,77
12	30	60	2200	3,05	1,86	0,70
13	30	60	2384	4,35	2,16	0,85
14	35	60	2468	2,90	1,60	0,83
15	35	60	2621	3,02	1,67	0,86
16	35	70	2524	2,69	1,39	0,82
17	35	70	2678	4,03	2,25	0,48
18	35	70	2625	3,36	1,69	0,80
19	45	70	2835	2,03	1,16	0,69
20	45	70	2993	1,86	1,08	0,39
21	50	60	3165	2,20	1,00	0,87
22	50	70	2965	1,64	0,76	0,93

Com os ganhos e constantes de tempo de cada ensaio, pretende-se obter uma lei de formação para inferir sobre esses valores para outra condição de funcionamento, para obtenção do modelo global. A função proposta para a variação dos parâmetros é:

$$\tau_{est}(\alpha, \theta) = f_1(\alpha) \cdot f_2(\theta) \quad (5-9)$$

$$f_1(\alpha) = a_3\alpha^3 + a_2\alpha^2 + a_1\alpha + a_0 \quad (5-10)$$

$$f_2(\theta) = b_2\theta^2 + b_1\theta + b_0 \quad (5-11)$$

$$K_{est}(\alpha, \theta) = g_1(\alpha) \cdot g_2(\theta) \quad (5-12)$$

$$g_1(\alpha) = c_3\alpha^3 + c_2\alpha^2 + c_1\alpha + c_0 \quad (5-13)$$

$$g_2(\theta) = d_2\theta^2 + d_1\theta + d_0 \quad (5-14)$$

A estimativa dos parâmetros é feita através do produto de duas funções. Tomando como exemplo o ganho estimado  $K_{est}(\alpha, \theta)$  para os modelos, as funções  $g_1(\alpha)$  e  $g_2(\theta)$  estimam a variação em relação à abertura percentual da borboleta do acelerador  $\alpha$  e ao ângulo de comando de ignição  $\theta$ . A estimativa do valor de constante de tempo  $\tau_{est}(\alpha, \theta)$  dos modelos utiliza as funções  $f_1(\alpha)$  e  $f_2(\theta)$  que foram definidas da mesma forma que  $g_1(\alpha)$  e  $g_2(\theta)$ . A obtenção dessas funções é apresentada a seguir utilizando  $g_1(\alpha)$  e  $g_2(\theta)$  como exemplo.

As funções  $g_1(\alpha)$  e  $g_2(\theta)$  são desconhecidas e por isso são aproximadas por polinômios. O polinômio escolhido para representar  $g_1(\alpha)$  é de grau 3, e seus coeficientes são determinados por um algoritmo que minimiza o erro quadrático do ajuste de um polinômio em relação aos pontos fornecidos.

A função  $g_2(\theta)$  é calculada sobre o erro de estimação  $h_2(\theta)$  que  $g_1(\alpha)$  possui em relação ao ganho  $K_{ident}(\alpha, \theta)$  obtido pela identificação dos modelos lineares locais:

$$h_2(\theta) = \frac{K_{ident}(\alpha, \theta)}{g_1(\alpha)} \quad (5-15)$$

O polinômio escolhido para representar  $g_2(\theta)$  é de grau 2, e seus coeficientes são determinados utilizando um algoritmo que minimiza o erro quadrático do ajuste de um polinômio em relação aos pontos fornecidos.

A avaliação dos modelos  $K_{est}(\alpha, \theta)$  e  $\tau_{est}(\alpha, \theta)$  para diferentes valores de ângulo de comando de ignição e abertura percentual da borboleta do acelerador gera uma superfície para o ganho (figura 5-22) e outra para a constante de tempo (figura 5-23) a serem utilizados pelo modelo de variação de velocidade angular do motor para variações na pressão do ar do coletor de admissão.

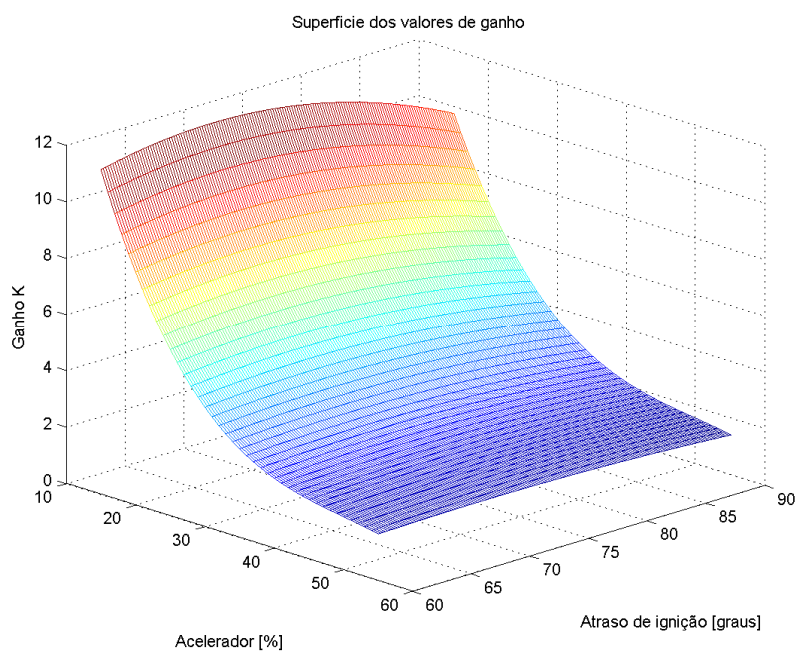


Figura 5-22: Superfície estimada para os valores de ganho.

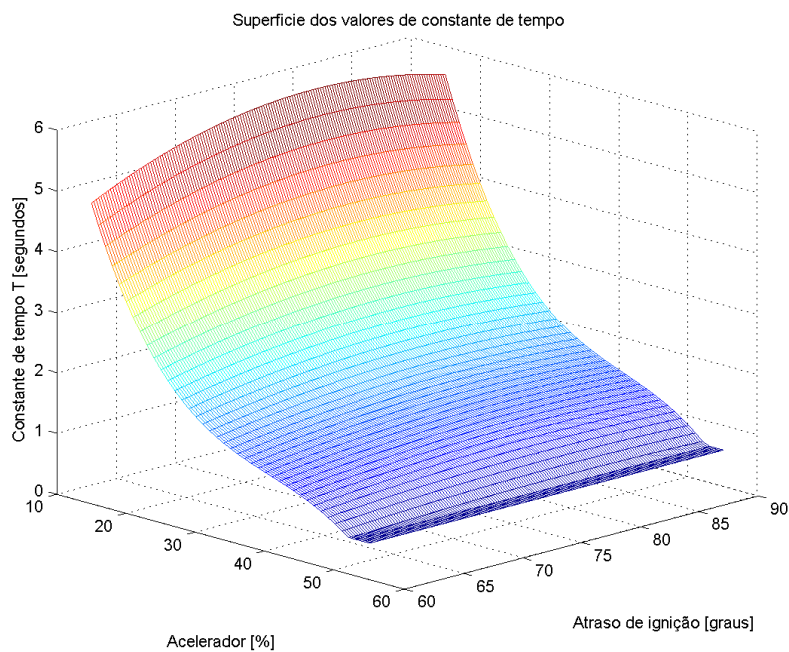


Figura 5-23: Superfície estimada para os valores de constante de tempo.

Os valores desses parâmetros são utilizados no esquema de simulação da figura 5-24 que apresenta o diagrama de blocos para comparação com os dados dos ensaios.

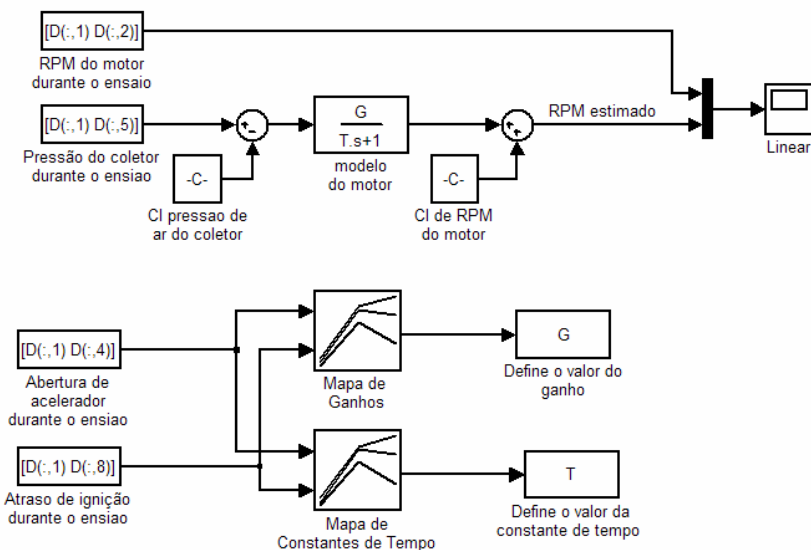


Figura 5-24: Diagrama de blocos de comparação do modelo global para variação na pressão do ar do coletor de admissão com os dados dos ensaios.

A avaliação da estimativa fornecida pelo modelo global é feita calculando novamente o coeficiente de correlação múltipla (*CRM*) entre as saídas do modelo e os valores coletados durante os ensaios para a velocidade angular do motor. A figura 5-25 apresenta os valores de *CRM* dos modelos locais e do modelo global para cada um dos ensaios.

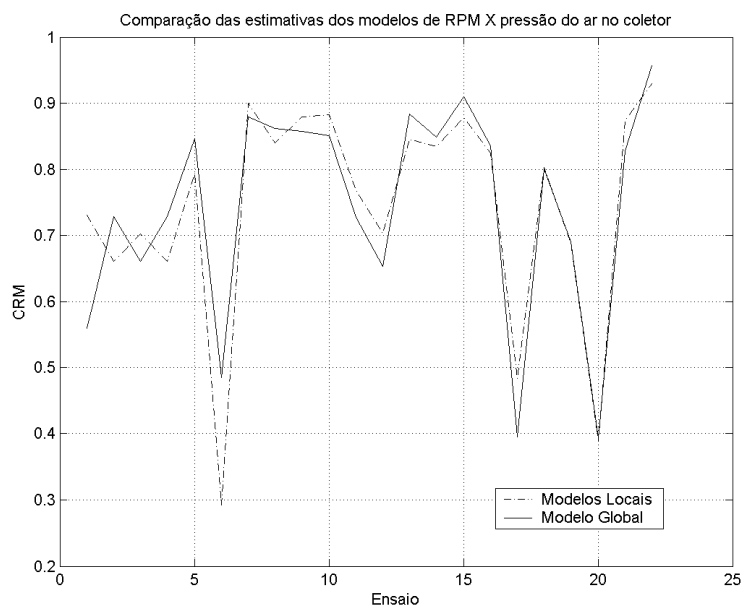


Figura 5-25: Comparação entre modelos locais e modelo global proposto.

Conclui-se que as estimações de velocidade angular fornecidas pelo modelo global são similares às estimativas fornecidas pelos modelos locais.

## 5.7. Discussão sobre os resultados dos ensaios

De forma sucinta, pode-se afirmar que apesar das limitações do ambiente de testes, os dados coletados permitem obter informação suficiente para identificar modelos simplificados do motor e do coletor de admissão para uso em controle. Esses modelos podem ser refinados com melhorias no ambiente de testes e com maior número variáveis na coleta de dados.

As estimativas fornecidas pelos modelos representam de forma satisfatória o comportamento do motor, com destaque para os modelos de:

- velocidade angular em função da abertura de acelerador,
- estimativa de  $\lambda$  para a mistura de ar e combustível no coletor.

O primeiro é fundamental para o ajuste da posição angular da borboleta do acelerador no controle de velocidade angular do motor, por exemplo. O segundo permite considerar aplicações de injeção eletrônica com emissões reduzidas sem o uso de um sensor de concentração de oxigênio nos gases de escape, usando apenas o valor estimado para a relação ar/combustível para ajustar o de período de comando de aplicado ao bico injetor. Ajustes periódicos da calibração da central de gerenciamento podem ser realizados para compensar os desvios de calibração, como é o caso em [7].

Os modelos de pressão de ar de coletor e de velocidade angular do motor em função do ângulo de comando de ignição podem ser utilizados para definir o instante de ignição no sentido de melhorar o desempenho do motor, assim como auxiliar no controle de rotação de *marcha lenta* conforme proposto em [15].



## 6. CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS

Face ao que foi apresentado nas seções anteriores, são tecidos alguns comentários a respeito dos resultados obtidos. Em seguida são feitas propostas de melhorias no sistema desenvolvido como sugestões para o prosseguimento das atividades.

### 6.1. Conclusões

Em primeiro lugar, são apresentadas considerações sobre o equipamento desenvolvido. Foram realizadas as alterações num motor mono-cilíndrico de pequeno porte (potência nominal inferior a 20kW) com carburador para uso do sistema de gerenciamento eletrônico. As alterações foram limitadas aos componentes externos, demonstrando assim que é viável a adaptação do sistema de gerenciamento em projetos já existentes. As alterações externas no motor são divididas entre a instalação de sensores e de atuadores. Os sensores instalados no motor permitem a detecção da posição do volante de inércia, da concentração de oxigênio nos escapamentos e pressão de ar do coletor de admissão. Os atuadores englobam um sistema de ignição por colapso de campo transistorizado, um sistema de injeção eletrônica e um sistema de acelerador eletrônico. Esses atuadores permitem o controle sobre a vazão mássica de ar, de combustível e o instante de início da combustão.

Para definir as ações dos atuadores foi construída uma central de gerenciamento eletrônico, que tem a função de definir os valores de ação de controle em função do comportamento desejado para as variáveis medidas no motor. O programa embarcado permite o funcionamento do motor em modo de controle de velocidade angular, modo de controle de abertura da borboleta do acelerador ou modo de ensaios que possibilita alterações de alguns dos parâmetros da central com alta frequência.

O programa embarcado permite também ajustes em alguns de seus parâmetros durante o funcionamento do motor, notadamente os valores armazenados nos mapas de injeção e ignição e no valor de referência para o controlador de velocidade angular.

Para os testes de calibração do motor e da central de gerenciamento, foi desenvolvido um sistema de aquisição de sinais com capacidade de realizar 300 amostras por segundo de 7 parâmetros do motor e da central. A placa de aquisição é conectada através de uma interface RS-232 ao computador para armazenar os dados coletados.

A bancada de testes utilizada foi fornecida, sem a realização de ajustes. A bancada de testes utilizada permite o ensaio do motor em uma pequena região de funcionamento, devido à variação limitada no torque exigido ao motor.

De forma geral, as escolhas tecnológicas no desenvolvimento foram feitas procurando utilizar componentes mais prontamente disponíveis no mercado brasileiro, facilitando assim a manutenção e replicação do equipamento.

Feitas as considerações sobre os equipamentos, são apresentadas as conclusões obtidas a partir dos ensaios realizados.

Os ensaios foram conduzidos no sentido de obter o comportamento da velocidade angular do eixo do motor face a alterações nas entradas de controle. Esse comportamento foi quantificado na forma de modelos identificados a partir dos dados dos ensaios.

Foi proposta a divisão entre modelo do motor e modelo do coletor de admissão, para facilitar a modelagem do motor. O modelo proposto para o motor é obtido através de 3 submodelos individuais, relacionando a velocidade angular à pressão de ar do coletor, ao  $\lambda$  da mistura de ar e combustível aspirada pelo motor e ao ângulo de comando de ignição.

O modelo proposto para o coletor de admissão estima de característica estática dos valores de abertura da borboleta do acelerador e do período de comando de injeção de combustível aos valores de pressão de ar do coletor de admissão e de  $\lambda$  da mistura ar e combustível. A modelagem obtida para o coletor de admissão é encorajadora, e permite considerar o uso desses modelos para substituir os sensores de pressão de ar de coletor e a sonda  $\lambda$ , em aplicações onde as restrições nos níveis de emissão de poluentes sejam suficientemente tolerantes. O custo de adaptação de um sistema de injeção eletrônica nesses casos seria extremamente reduzido devido à necessidade de poucos sensores.

Maiores desenvolvimentos podem levar ao controle de torque em aplicações veiculares graças ao uso do atuador na abertura da borboleta do acelerador. Esse atuador permite também o uso do sistema de gerenciamento em aplicações estacionárias, sendo que o modo de operação em controle de velocidade angular já foi previsto no programa embarcado que conta com um controlador calibrado de forma empírica.

## 6.2. Perspectivas

Como sugestões para trabalhos futuros ficam as propostas de melhorias para os equipamentos e na programação utilizada.

Em primeiro lugar, fica como sugestão o desenvolvimento e teste de algoritmos de controle utilizando os modelos propostos, para avaliação da modelagem e do desempenho do sistema proposto.

Para a avaliação do sistema, fica proposta também a conversão da bancada de testes para um sistema que permita realizar a medição de torque resistente e o controle de velocidade angular do motor, com preferência para um sistema baseado em motores elétricos. O uso de motores elétricos permitiria aplicar torques positivos e negativos ao motor e estudar o comportamento do motor em baixas velocidades angulares e situações de partida, por exemplo.

Com o uso de uma bancada de testes com carga controlada, os ensaios do motor e do sistema de gerenciamento podem ser realizados para diferentes condições do motor, levando à proposição para um sistema de coleta de dados aprimorado.

O aumento na quantidade de parâmetros medidos no motor, incluindo temperaturas em diversos pontos, o uso de uma sonda  $\lambda$  linear, medições de torque e de consumo de combustível, permitiriam a identificação e utilização de modelos mais completos para reprodução de maior número de aspectos de seu funcionamento e com maior exatidão nas estimativas.

As modificações subseqüentes passam pela modificação da arquitetura da central de gerenciamento principalmente pela troca de micro controlador. A modificação permitiria contar com poder de processamento suficiente para aplicar as novas leis de controle que serão propostas em função dos modelos obtidos pelos ensaios com o sistema de aquisição e a bancada de testes revisados. Outras modificações de atualização tecnológica como a migração para a interface de comunicação *USB* com o computador para a interface gráfica de usuário devem ser consideradas na definição da nova arquitetura.

## GLOSSÁRIO

- $\lambda$ : letra grega *lambda*, representa a razão normalizada entre massas de ar e combustível.  $\lambda > 1$  indica excesso de ar e  $\lambda < 1$  indica excesso de combustível.
- $\mu C$ : abreviação para micro controlador.
- AFR*: *Air/Fuel Ratio* ou relação ar/combustível, indicando a razão de massas na mistura de comburente e combustível utilizado no motor.
- AFR<sub>e</sub>*: *Stoichiometric Air/Fuel Ratio* ou relação ar/combustível estequiométrica, indicando a razão de massas entre comburente e combustível para balancear a respectiva equação química de combustão.
- ARX*: *Auto Regressive with eXternal inputs* ou auto-regressivo com entradas externas, denotando uma estrutura para modelos dinâmicos lineares utilizado por técnicas de identificação de sistemas.
- CRM*: *Coefficiente de Correlação Múltipla*, métrica para avaliação da qualidade das estimativas fornecidas por um modelo. *CRM=1* representa uma modelagem perfeita.
- Gain scheduling*: tipo de modelo dinâmico não-linear, utilizando uma estrutura de modelo linear cujos parâmetros variam em função dos valores de seus estados.
- PMI*: *Ponto Morto Inferior*, posição de menor distância entre pistão e virabrequim onde a velocidade instantânea do pistão é nula.
- PMS*: *Ponto Morto Superior*, posição de maior distância entre pistão e virabrequim onde a velocidade instantânea do pistão é nula.
- RS-232*: padrão de interface de comunicação serial com o computador.
- Sensor EGO*: *Exhaust Gas Oxygen*, denominando o sensor com característica bipolar utilizado para medir a concentração relativa de oxigênio nos gases de escape do motor com alto ganho na região de  $\lambda=1$  e saturação da saída em outras regiões.
- Sensor UEGO*: *Wide Band Exhaust Gas Oxygen*, denominando o sensor com característica linear utilizado para medir a concentração relativa de oxigênio nos gases de escape do motor para grandes variações em relação a  $\lambda=1$ .
- USB*: *Universal Serial Bios*, padrão de interface de comunicação serial com o computador para alta velocidade de transmissão de dados.
- $T_{inj}$ : período de comando do pulso de tensão a ser aplicado ao bico injetor.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ABRACICLO (Associação Brasileira dos Fabricantes de Motocicletas, Ciclomotores, Motonetas, Bicicletas e Similares) Vendas de Motociclos em 2006. Disponível em: <<http://www.abraciclo.com.br/>> - último acesso em 3 de fevereiro de 2007.
- [2] Honda Motos, modelos nacionais comercializados no Brasil em janeiro de 2007. Disponível em: <<http://www.honda.com.br/web/index.asp?pp=noticias&ps=noticia&ps2=motos&id=1302>> - último acesso em 3 de fevereiro de 2007.
- [3] Yamaha Motos, modelos nacionais comercializados no Brasil em janeiro de 2007. Disponível em: <<http://www.yamaha-motor.com.br/cmi/pagina.aspx?1145&categoria=motos>> - último acesso em 3 de fevereiro de 2007.
- [4] PROCONVE / IBAMA. Normas de restrição para emissão de poluentes em veículos automotores. Disponível em <<https://www.ibama.gov.br/proconve/login.php>> - último acesso em 3 de fevereiro de 2007
- [5] Emission comparison between a carburetor and an electronic fuel injection system for utility engines - Swanson, Mark - SAE Special Publications , no. 883, p. 17-27. 1991.
- [6] RICHMOND, F. Scott. *Emission Reduction Benefits of Adapting Closed-loop Fueling Control on a Mechanically Controlled Spark Ignited Engine*. Morgantown, 1998. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica e Aeroespacial, Universidade de West Virginia.
- [7] Yamaha Motos, especificação técnica do modelo Fazer 250®. Disponível em: <<http://www.yamaha-motor.com.br/Cmi/Pagina.aspx?856>> - último acesso em 3 de fevereiro de 2007.
- [8] LORENTZ, Nathan; BAUER, Tim; WILLSON, Bryan. Design of a Direct Injection Retrofit Kit for Small Two-Stroke Engines. *JSAE SETC2005*, n. 2005-32-0095, p. 1-7, Oct. 2005.
- [9] ARCHER, M.; BELL, Greg. Advanced Electronic Fuel Injection Systems – An Emission Solution for both 2- and 4-Stroke Small Vehicle Engines. SAE Technical Paper, no. 2001-01-0010, 2001.

- [10] HANZEVACK, E.L.; LONG, T.W.; ATKINSON, C.M. *et al.* Virtual sensors for spark ignition engines using neural networks - NeuroDyne Inc., Cambridge, MA, USA. In: AMERICAN CONTROL CONFERENCE, 1997. *Proceedings*: Albuquerque, NM, Jun. 1997. p. 669-673 vol.1
- [11] Wikipédia, a enciclopédia livre – edição em português. Disponível em: <<http://pt.wikipedia.org/>> - último acesso em 10 de fevereiro de 2007.
- [12] KIENCKE, U.; NIELSEN, L. *SAE Automotive Control Systems – For Engine, Driveline and Vehicle*. New York, Ed. Springer. 1971.
- [13] LENZ, H. P. *Gemischbildung Bei Ottomotoren*. Springer-Verlag, Wien, New York; ISBN 3-211-82193-7; Capítulo 2. 1990.
- [14] Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. *Relatório Mensal de Acompanhamento de Mercado – Gasolina Comun*. Nov. 2006
- [15] MACLAY, D.; DOREY, R.E. A controller and design implementation environment for the idle speed control of an internal combustion engine. In: IEE COLLOQUIUM ON APPLIED CONTROL TECHNIQUES USING MATLAB (26 Jan. 1995; London). *Proceedings*: London, 26 Jan. 1995 . p. 2-3.