



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA

“DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE
GERENCIAMENTO ELETRÔNICO PARA MOTORES DE
IGNIÇÃO POR CENTELHA”

FABRÍCIO JOSÉ PACHECO PUJATTI

Belo Horizonte, 31 de agosto de 2007

Fabício José Pacheco Pujatti

**“DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE
GERENCIAMENTO ELETRÔNICO PARA MOTORES DE
IGNIÇÃO POR CENTELHA”**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica.

Área de concentração: Projeto Mecânico

Orientador: Prof. Dr. Ramón Molina Valle

Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG

Belo Horizonte

Escola de Engenharia da UFMG

2007

"O progresso da mecânica aparentemente não tem fim. Tanto no passado como no futuro, cada passo dado em qualquer direção sempre irá remover limites e transpor barreiras, permitindo que novamente se possa caminhar em outras direções. Assim o que antes parecia ser uma barreira passará a ser uma nova direção".

Osborne Reynolds (1842 – 1912)

“Essa é apenas mais uma ferramenta para que todos aqueles interessados e, principalmente, apaixonados possam continuar a trabalhar com o que sempre foi e sempre será a motivação e o pivô da minha realização profissional: Os Veículos Automotores.”

O Autor

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela perseverança na conquista de mais esse objetivo e pela paz espiritual, encontrada nos momentos mais difíceis dessa caminhada. Os momentos de dificuldade e de alegria foram compartilhados e, em todos eles, a certeza da Tua presença representou a calma dos dias de tormento. Aos meus pais e irmãos, pelo apoio dedicado e pela compreensão da importância dessa conquista.

Agradeço à Patrícia, minha esposa, que caminhou ao meu lado durante toda essa jornada iniciada na graduação. Agradecimentos são pequenos gestos meus, perto da dedicação e da paciência de me ouvir a cada dia tendo novas idéias, vontades, expectativas, vitórias e decepções. Seu sorriso nas conquistas e seus gestos de carinho para dividir e diluir minhas preocupações, foram fundamentais para superar mais essa etapa. Conto com o seu amor para as próximas. Mais uma vez, você soube entender cada momento da minha ausência, ainda que presente.

Ao amigo e Prof. Ramón Molina Valle, orientador desse trabalho, que possibilitou, orientou e incentivou sua execução, pela oportunidade, confiança, apoio e cobrança nas horas certas, possibilitando um grande crescimento profissional e pessoal. Os churrascos de sexta-feira e as reuniões de acompanhamento dos trabalhos (“puxões de orelha”) foram fundamentais para a conquista dessa etapa. Muito obrigado. Conte comigo em todos os seus projetos visando à pesquisa e o desenvolvimento dos motores de combustão interna, dos veículos automotores e nos churrascos da área de lazer.

Ao amigo e Prof. Marcos Antônio Severo Mendes, co-orientador incondicional desse trabalho, juntamente com os amigos Gabriel Teixeira Braga, Túlio Charles de Oliveira Carvalho e Valdênio Miranda de Araújo. Agradeço por abraçarem essa idéia no tempo em que o termo “central aberta” significava pouco mais que um desejo e alguns componentes automotivos mutilados em prol da ciência. A vocês, todo o meu agradecimento pela grande ajuda, pela amizade e pelo aprendizado nesses anos de convívio. Espero que continuemos trabalhando juntos no desenvolvimento de novos projetos e que os limites dos sistemas eletrônicos continuem sendo somente a nossa imaginação.

Agradeço de forma especial aos Professores Porfírio Cabaleiro Cortizo e Paulo Seixas, pelo grande apoio para a realização desse trabalho e ao colega e Professor José Guilherme Coelho Baêta, pioneiro na utilização de sistemas de gerenciamento eletrônicos programáveis na UFMG. Ao amigo Bruno de Souza Baptista pela dedicação e pela paciência na execução dos testes do sistema implementado e por acreditar na capacidade e utilizar os recursos desenvolvidos neste trabalho no seu mestrado.

Agradeço também aos coordenadores, funcionários e contratados da Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais – CETEC, especialmente aos grandes amigos dos Laboratórios de Ensaio de Motores e de Emissões Veiculares, da Oficina Mecânica e dos Setores de Eletromecânica e de Testes Físicos. Obrigado por acreditarem e investirem no desenvolvimento da ciência e de tecnologia no Brasil.

Agradeço ainda ao CNPq e à FAPEMIG que apoiaram e financiaram parte dessa pesquisa e a todos os professores, alunos e funcionários do Departamento de Engenharia Mecânica da UFMG que, direta ou indiretamente, colaboraram na realização deste trabalho. À Fiat Automóveis S.A. e A Fiat Powertrain Technologies S.A. pela disponibilidade de recursos e pelo apoio recebido através de funcionários e colegas de trabalho, fundamentais para a realização desta pesquisa.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	3
LISTA DE TABELAS E QUADROS.....	6
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS.....	7
SIMBOLOGIA E LETRAS GREGAS	12
RESUMO.....	13
ABSTRACT.....	14
CAPÍTULO 1.....	15
INTRODUÇÃO.....	15
CAPÍTULO 2.....	17
OBJETIVOS E RELEVÂNCIA DO TRABALHO.....	17
CAPÍTULO 3.....	19
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
3.1 Os motores de combustão interna de ignição por centelha	20
3.2 Admissão de ar nos motores de combustão interna	22
3.3 Formação da mistura ar/combustível	30
3.4 Classificação dos sistemas de formação da mistura ar/combustível	35
3.4.1 Sistema de Injeção Indireta Monoponto.....	38
3.4.2 Sistema de Injeção Indireta Multiponto	39
3.5 Ignição da mistura ar/combustível.....	41
3.5.1 Sistemas mecânicos de ignição.....	46
3.5.2 Sistema de ignição eletrônica mapeada	49
3.5.3 Sistemas de Ignição sem distribuidor (<i>Distributorless</i>).....	51
3.6 Controle da mistura ar/combustível.....	54
3.6.1 Controle em malha aberta.....	55
3.6.2 Controle em malha fechada	57
3.7 Mapas de Calibração.....	66
3.8 Sistemas de Gerenciamento Eletrônico	68
3.9 Sistemas de gerenciamento eletrônico programáveis.....	72
3.9.1 Sistema MoTeC	73
3.9.2 Sistema Haltech	82
3.10 Trabalhos desenvolvidos por outros autores	88
3.11 Considerações Finais.....	91
CAPÍTULO 4.....	93
METODOLOGIA.....	93
4.1 Definição do Micro-processador	94
4.2 Definição dos Sensores e Sinais correspondentes	96
4.2.1 Velocidade angular e posição do eixo de manivelas	96
4.2.2 Temperatura do ar no coletor de admissão	98
4.2.3 Temperatura do líquido de arrefecimento	101
4.2.4 Pressão do ar no coletor de admissão.....	103
4.2.5 Posição da válvula borboleta	105
4.2.6 Concentração de Oxigênio no coletor de escapamento	106
4.3 Definição da Arquitetura da Unidade de Controle Eletrônico – ECU.....	109
4.3.1 Sistema de gerenciamento eletrônico implementado	110
4.3.2 Interface Homem Máquina (IHM).....	112
4.3.3 <i>Software</i> implementado	115
4.3.4 Estratégia de controle implementada.....	117

4.3.5	Método de Interpolação implementado.....	122
4.3.6	Implementação do Mapa de tempo base de injeção	131
4.3.7	Implementação do Controlador de Avanço de Ignição	134
4.3.8	Estratégia de Partida a Frio	138
4.3.9	Estratégia de Enriquecimento em Aceleração	139
4.3.10	Implementação do Controlador de Mistura Ar/Combustível.....	140
4.3.11	Implementação do Controlador de Marcha Lenta	150
4.3.12	Implementação do Controlador da Injeção de Combustível	158
4.4	Considerações Finais	161
CAPÍTULO 5.....		162
RESULTADOS E DISCUSSÃO.....		162
5.1	Sistema de Gerenciamento Eletrônico Implementado	163
5.2	Resultados obtidos para o Motor FIASA 1.0 8V m.p.i	166
5.2.1	Curvas características de desempenho	166
5.2.2	Validação do Controlador de Injeção de Combustível	170
5.3	Resultados obtidos para o Motor FIAT FIRE 1.3 8V	176
5.3.1	Curvas características de desempenho	176
5.4	Resultados obtidos para o Motor GM 1.8 8V GIII Flex	180
5.4.1	Curvas características de desempenho	180
5.4.1.1	Resultados dos testes a plena carga	183
5.4.1.2	Resultados dos testes em cargas parciais.....	187
5.4.2	Testes com o método de interpolação implementado.....	190
5.4.2.1	Resultados obtidos com a calibração 10x500.....	191
5.4.2.2	Resultados com a Calibração 20x1000	195
5.5	Considerações Finais	199
CAPÍTULO 6.....		200
CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....		200
CAPÍTULO 7.....		203
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS		203
ANEXOS.....		209
Anexo A: Incertezas máximas de medição.....		209
Anexo B: Calibrações Motor GM 1.8 8V GIII Flex – E25		210
Calibração 5x250 - SGEM Implementado		210
Calibração 5x250 – MoTeC M4		211
Calibração 10x500 – SGEM Implementado.....		212
Calibração 10x500 – MoTeC M4		213
Calibração 20x1000 – SGEM Implementado.....		214
Calibração 20x1000 – MoTeC M4		215

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Diagrama esquemático de um MCI de 04 tempos (Adler, 1993).	20
Figura 3.2 – Ciclo de quatro tempos de um MCI de ignição por centelha (Adler, 1988). ...	21
Figura 3.3 – Queda de pressão ao longo do sistema de admissão (Heywood, 1995).	22
Figura 3.4 – Diagrama de válvulas (Adler, 1988).	23
Figura 3.5 – Medição de vazão de ar, (a) sistema convencional (<i>hot wire</i>), (b) <i>reverse flow detection</i> (Konzelmann e Hecth, 1995).	26
Figura 3.6 – Razão em volume para combustão estequiométrica de Gasolina (Adler, 1988).....	31
Figura 3.7 – Influência da variação de λ na potência indicada e de consumo específico de combustível (a) e na composição das emissões de poluentes (b) (Adler, 1988).	33
Figura 3.8 – Condições de operação de um MCI (Bauer, 1999).	34
Figura 3.9 – Tipos de eletroinjetores (a) eletroinjetor em corte (b) (Bauer, 1999).....	36
Figura 3.10 – Tensão de acionamento (5,0 ms) aplicada ao eletroinjetor (Mendes <i>et al</i> , 2004).....	36
Figura 3.11 – Unidade <i>Mono-jetronic</i> (a) e posição do eletroinjetor (b) (Adler, 1993).....	38
Figura 3.12 – Posição dos eletroinjetores em um motor de quatro cilindros (Bauer, 1999).	39
Figura 3.13 – Bobina de ignição convencional em corte (Adler, 1988).	41
Figura 3.14 – Diferentes condições de saturação no primário da bobina.	43
Figura 3.15 – Influência do avanço de ignição na pressão do cilindro (Bauer, 1999).	44
Figura 3.16 – Componentes do sistema de ignição mecânico (Denton, 2000).	47
Figura 3.17 – Avanço de ignição obtido por sistemas distintos (Denton, 2000).	49
Figura 3.18 – Mapas de avanço de ignição (Denton, 2000).	50
Figura 3.19 – Bobina de ignição convencional (a), Bobina estática (b) (Bauer, 1999).....	51
Figura 3.20 – Bobina de ignição individual (Denton, 2000).	53
Figura 3.21 – Sistema de controle em malha aberta (Ogata, 1993).	55
Figura 3.22 – Correção de $A/F_{(r)}$ em função da temperatura do motor (Ribbens, 1998). ..	57
Figura 3.23 – Sistema de controle em malha fechada (Ogata, 1993).	57
Figura 3.24 – Controle da mistura ar/combustível em malha fechada (Ribbens, 1998)....	59
Figura 3.25 – Sinal de saída do EGO em função de lambda (Pinto, 2001).....	59
Figura 3.26 – Resposta do controlador de mistura à entrada degrau (Leone <i>et al</i> , 1997).	60
Figura 3.27 – Variação de Lambda para aumento da eficiência catalítica (Bauer, 1999). 61	
Figura 3.28 – Eficiência do catalisador em função de Lambda (Ribbens, 1998).	62
Figura 3.29 – Curva de calibração sensor HEGO em função de λ (Bauer, 1999).....	62
Figura 3.30 – Curva de calibração de uma sonda linear em função de λ (Bauer, 1999). .63	
Figura 3.31 – Fator de correção C_L em função do sinal de O_2 (Ribbens, 1998).	64
Figura 3.32 – Mapa de tempo de injeção (t_{inj}) de um motor de combustão interna.....	66
Figura 3.33 – Sistema de gerenciamento eletrônico digital (Ribbens, 1998).	69
Figura 3.34 – Fases de implantação do PROCONVE (CETESB, 2006).	71
Figura 4.1 – Medição da posição e rotação do eixo de manivelas (Adler, 1993).	97
Figura 4.2 – Circuito condicionador do sinal de rotação.....	97
Figura 4.3 – Sinal de entrada (a) e de saída (b) do circuito condicionador.	98
Figura 4.4 – Circuito condicionador do sinal de temperatura do ar na admissão.....	98
Figura 4.5 – Pontos de calibração do sensor de temperatura.	100
Figura 4.6 – Interpolação dos pontos da curva de calibração dos sensores.....	101
Figura 4.7 – Pontos de calibração do sensor de temperatura do líquido de arrefecimento.	103
Figura 4.8 – Circuito condicionador do sinal de pressão absoluta do coletor de admissão.	104
Figura 4.9 – Curva de calibração do sensor de pressão absoluta.	105

Figura 4.10 – Circuito condicionador do sinal do sensor de posição da borboleta.	105
Figura 4.11 – Curva de calibração do sensor de posição da borboleta.	106
Figura 4.12 – Circuito condicionador do sinal do sensor <i>HEGO</i>	107
Figura 4.13 – Curvas de calibração do sensor <i>HEGO</i>	108
Figura 4.14 – Diagrama de blocos do hardware da <i>ECU</i> , incluindo periféricos do <i>DSP</i>	109
Figura 4.15 – Módulos do sistema de gerenciamento Eletrônico do Motor.	110
Figura 4.16 – Tela de configurações principais da IHM.	113
Figura 4.17 – Tela de parametrização dos sistemas de ignição e injeção.	113
Figura 4.18 – Diagrama de blocos do software implementado.	116
Figura 4.19 – Fluxograma simplificado da rotina de controle implementada.	117
Figura 4.20 – Configuração do dente referente ao PMS, cilindros 1 e 4.	120
Figura 4.21 – (a) Saída em PWM para comando de ignição e (b) sinal de rotação.	120
Figura 4.22 – Pontos obtidos durante a calibração. Motor Fire 1.3 8V Gasolina.	123
Figura 4.23 – Pontos de referência a plena carga. Motor Fire 1.3 8V Gasolina.	124
Figura 4.24 – Pontos de referência a 5000 RPM. Motor Fire 1.3 8V Gasolina.	126
Figura 4.25 – Mapa de tempo base de injeção (% <i>JPU</i>). Motor Fire 1.3 8V Gasolina. ...	132
Figura 4.26 – Mapa de avanço estático de ignição. Motor Fire 1.3 8V Gasolina.	134
Figura 4.27 – Diagrama do sistema de controle de ignição implementado.	135
Figura 4.28 – Configuração da estratégia de enriquecimento em partidas a frio.	138
Figura 4.29 – Configuração da estratégia de enriquecimento em aceleração rápida.	139
Figura 4.30 – Resposta dinâmica do sistema real à entrada degrau positiva (a) e negativa (b), com amplitude de 0,15 ms no tempo base de injeção.	141
Figura 4.31 – Resposta dinâmica do sistema real à entrada degrau positiva (a) e negativa (b), com amplitude de 0,30 ms no tempo de injeção.	142
Figura 4.32 – Malha de controle de Lambda com re-alimentação não-linear (EGO).	143
Figura 4.33 – Configuração do controlador de mistura ar/combustível via IHM.	143
Figura 4.34 – Fluxograma do controlador de mistura ar/combustível implementado.	147
Figura 4.35 – Resposta dinâmica do sistema real e do modelo à entrada degrau positiva com amplitude de 5 passos no atuador de marcha lenta.	151
Figura 4.36 – Resposta dinâmica do sistema real e do modelo à entrada degrau negativa de 10 passos no atuador de marcha lenta.	152
Figura 4.37 – Resposta dinâmica do sistema real e do modelo à entrada degrau negativa de 10 passos no atuador de marcha lenta, com estratégia de enriquecimento.	153
Figura 4.38 – Configuração dos parâmetros do controlador de marcha lenta.	154
Figura 4.39 – Circuito de acionamento do atuador de marcha lenta (Braga, 2007).	155
Figura 4.40 – Fluxograma de acionamento do atuador de marcha lenta (Braga, 2007).	156
Figura 4.41 – Estrutura do controlador de injeção de combustível (Braga, 2007).	158
Figura 5.1 – Placa de circuito impresso do SGEM e seus componentes principais.	163
Figura 5.2 – Vista geral do motor em teste acoplado ao dinamômetro.	167
Figura 5.3 – Curva de Torque Corrigido (NBR 1585).	168
Figura 5.4 – Curva de Potência Corrigida (NBR 1585).	169
Figura 5.5 – influência do Fator Lambda na rotação do motor.	170
Figura 5.6 – Controle de marcha lenta e lambda em malha fechada usando sensor EGO.	173
Figura 5.7 – Curva de Torque Corrigido (NBR 1585).	178
Figura 5.8 – Curva de Potência Corrigida (NBR 1585).	179
Figura 5.9 – Curva de Torque Corrigido (NBR 1585). Calibração 5x250.	183
Figura 5.10 – Curva de Potência Corrigida (NBR 1585). Calibração 5x250.	183
Figura 5.11 – Curva de avanço de ignição a plena carga. Calibração 5x250.	184
Figura 5.12 – (A) Temperatura do catalisador, (B) Consumo Especifico de Combustível e (C) Fator Lambda em função da rotação a plena carga. Calibração 5x250.	185
Figura 5.13 – Curvas de referência a 50% de carga. Calibração 5x250.	187
Figura 5.14 – (A) Temperatura do catalisador, (B) Consumo Especifico de Combustível e (C) Fator Lambda em função da rotação a 50% carga. Calibração 5x250.	188
Figura 5.15 – Diferenças de avanço de ignição a 50% de carga. Calibração 5x250.	189

Figura 5.16 – Curva de avanço e tempo de Injeção a plena carga. Calibração 10x500.	191
Figura 5.17 – Curvas de Torque e Potência Corrigidos (NBR 1585). Calibração 10x500.	192
Figura 5.18 – (A) Temperatura do catalisador, (B) Consumo Especifico de Combustível e (C) Fator Lambda em função da rotação a plena carga. Calibração 10x500.....	194
Figura 5.19 – Curva de avanço e tempo de injeção a plena carga. Calibração 20x1000.	195
Figura 5.20 – Curvas de Torque e Potência Corrigidos (NBR 1585). Calibração 20x1000.	196
Figura 5.21 – (A) Temperatura do catalisador, (B) Consumo Especifico de Combustível e (C) Fator Lambda a plena carga. Calibração 20x1000.....	198

LISTA DE TABELAS E QUADROS

Tabela III.1 – Sistemas de medição da massa de ar admitida existentes no mercado.	25
Tabela III.2 – Relação A/F estequiométrica em função do combustível (Pereira, 2001)...	31
Tabela III.3 – Sistemas de ignição existentes no mercado.	46
Tabela III.4 – Curva de avanço de um distribuidor convencional (VW, 1996).....	48
Tabela III.5 – Exemplo de correção do tempo de injeção em função da temperatura.	66
Tabela IV.1 – Descrição dos sensores e natureza dos sinais medidos.	94
Tabela IV.2 – Descrição dos atuadores e dos sinais de comando.....	95
Tabela IV.3 – Dados de calibração do sensor de temperatura do ar de admissão.....	100
Tabela IV.4 – Dados de calibração do sensor de temperatura do ar de admissão.....	102
Tabela IV.5 – Dados de calibração do sensor de pressão absoluta.	104
Tabela IV.6 – Dados obtidos na verificação do sensor de Oxigênio (HEGO).	108
Tabela IV.7 – Exemplo e regra de inferência de ordem zero (Sugeno, 2002).	122
Tabela IV.8 – Interpolação com carga constante e rotação variável.....	125
Tabela IV.9 – Interpolação com rotação constante e carga variável.....	126
Tabela IV.10 – Interpolação com carga e rotação variáveis.....	127
Tabela IV.11 – Pontos utilizados para determinação de condições específicas.	130
Tabela IV.12 – Redução do avanço de ignição em função da temperatura do ar admitido.	137
Tabela IV.13 – Correção do tempo base de injeção em função da temperatura liquido de arrefecimento do motor.....	138
Tabela IV.14 – Parâmetros de entrada da simulação e do modelo de 1ª Ordem com tempo morto para controle de mistura ar/combustível.	141
Tabela IV.15 – Parâmetros do controlador de mistura ar/combustível.....	144
Tabela IV.16 – Mapa de referência para controlador de mistura ar/combustível.	145
Tabela IV.17 – Tempo de operação em malha aberta em função da temperatura do motor.....	148
Tabela IV.18 – Condições de operação do controlador de mistura ar/combustível.	149
Tabela IV.19 – Parâmetros de entrada positiva da simulação e do modelo de 1ª Ordem com tempo morto para controle de marcha lenta.	151
Tabela IV.20 – Parâmetros de ajuste do controlador de marcha lenta.	154
Tabela IV.21 – Seqüência de comandos para movimentação do obturador.....	155
Tabela V.1 – Características técnicas do Motor FIASA 1.0 8V m.p.i.	166
Tabela V.2 – Valores de ajuste do controlador de injeção de combustível (Braga, 2007)	172
Tabela V.3 - Características técnicas do Motor FIRE 1.3 8V.	176
Tabela V.4 – Parâmetros iniciais para configuração da ECU (Baeta <i>et al</i> , 2004).	177
Tabela V.5 – Características técnicas do Motor GM 1.8 8V Flex GIII.	180
Tabela V.6 – Parâmetros iniciais para configuração do sistema.....	181
Tabela V.7 – Características individuais das calibrações testadas.	190
Tabela A.1 – Incertezas máximas associadas (Baeta, 2006).....	209
Tabela A.2 – Faixa de medição e incertezas dos sistemas (Baeta, 2006).....	209

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A	- Área
A/C	- Sistema de ar condicionado
A/Con	- Sistema de ar condicionado inserido
A/D	- Conversor Analógico-Digital
$A/F_{(d)}$	- Relação ar/combustível desejada
$A/F_{(r)}$	- Relação ar/combustível real
$A/F_{(s)}$	- Relação ar/combustível estequiométrica
Assembly	- Linguagem de programação
$Av_{máx}$	Ângulo máximo de avanço de ignição, configurado no sistema
BAC	- Valvula de controle de marcha lenta (<i>By-pass Air Control valve</i>)
By-pass	- Caminho alternativo ao escoamento normal de um fluido
C	- Linguagem de programação
C++	- Linguagem de programação
C_c	- Ponto de carga mapeado imposto no instante de operação (c)
$C_{(c+i_{carga})}$	- Ponto de carga mapeado imposto no instante de operação ($c+i_{carga}$)
CAN	- Protocolo de Comunicação (<i>Controller Area Network</i>)
CANopen	- Protocolo de Comunicação aberto (<i>Controller Area Network open</i>)
CETEC	- Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais
C_i	- Carga instantânea imposta ao motor medida pelo sistema de aquisição
CKP	- Sensor de rotação/ posição do eixo virabrequim (<i>Crankshaft Position</i>)
C_L	- Fator de correção de Lambda para controle em malha fechada
$C_{máx}$	- Carga máxima imposta ao motor controlado pelo EMS
C_{min}	- Carga mínima imposta ao motor controlado pelo EMS
CMD	- Conjunto medidor de densidade do ar (temperatura e pressão)
CMP	- Sensor de fase do motor (<i>Cameshaft Position</i>)
CO	- Monóxido de Carbono
COUNT 2	- Contador interno do DSP
CO ₂	- Dióxido de Carbono
C_p	- Capacitância
CPU	- Unidade de processamento de dados (<i>Control Processor Unit</i>)
CT	- Temperatura do motor (<i>Coolant Temperature</i>)
C ₂ H ₅ OH	Fórmula molecular do álcool hidratado (E100)
C ₈ H ₁₈	- Fórmula molecular da gasolina pura (E0)
D	- Distância entre duas placas de um capacitor
Dash-Pot	- Condição de desaceleração do veículo com marcha inserida
DEMEC	- Departamento de Engenharia Mecânica
DFT	- Transformada Discreta de Fourier (<i>Discrete Fourier Transform</i>)
Distributor-less	- Sistema de Ignição que não utiliza distribuidor

<i>Drive-by-Wire</i>	- Sistema de controle eletrônico da borboleta através de atuador eletro-mecânico
<i>Driver</i>	- Módulo de potência para acionamento de atuadores
<i>DSP</i>	- Processador Digital de Sinais (<i>Digital Signal Processor</i>)
<i>Duty cycle</i>	- Período de acionamento do eletroinjeter
D_t	- Tempo de permanência (<i>dwel time</i>)
D_{ti}	- Tempo de permanência ideal
$D_{tmáx}$	- Tempo de permanência máximo controlado pelo sistema
<i>ECT</i>	- Sensor de temperatura do motor (<i>Engine Coolant Temperature</i>)
<i>ECU</i>	- Central de Controle Eletrônico (<i>Electronic Control Unit</i>)
<i>EGO</i>	- Sensor de O_2 (Exhaust Gas Oxygen Sensor)
<i>SEM</i>	- Sistema de Gerenciamento Eletrônico (<i>Electronic Management System</i>)
<i>EPROM</i>	- Tipo de memória física reprogramável
<i>E0</i>	- Sigla de designação para gasolina pura
<i>E22</i>	- Sigla de designação para gasolina comum com 22% de álcool anidro
<i>E100</i>	- Sigla de designação para álcool comum hidratado
<i>FFT</i>	- Transformada Rápida de Fourier (<i>Fast Fourier Transform</i>)
<i>Flash</i>	- Tipo de memória física reprogramável
<i>Flex</i>	- Sigla de designação de sistemas de gerenciamento multi-combustível
<i>firing point</i>	- Instante de ignição
f_p	- Frequência de pulsação do ar no coletor de admissão
<i>FS</i>	- Fator de segurança que torna N_{APMS} um número inteiro
<i>Fuel cutoff</i>	- Corte de injeção de combustível durante desaceleração do veículo (<i>Dash-Pot</i>)
<i>H</i>	- Período de amostragem
<i>HC</i>	- Hidrocarboneto
<i>HEGO</i>	- Sensor de O_2 com aquecimento (Heated Exhaust Gas Oxygen Sensor)
<i>HW</i>	- Hardware
<i>Hz</i>	- Hertz
H_2O	- Molécula da água
i_1	- Corrente no enrolamento primário da bobina de ignição, quando ligada
i_{carga}	- Incremento da posição da borboleta no mapa de calibração
i_i	- Corrente na entrada inversora no amplificador do sensor de temperatura
i_p	- Corrente induzida na sonda linear (<i>wide-band O_2 sensor</i>)
i_{rot}	- Incremento da rotação no mapa de calibração
<i>IHM</i>	- Interface Homem-Máquina
<i>IJPU</i>	- Tempo máximo de injeção
<i>Intercooler</i>	- Trocador de calor tipo ar/ar para reduzir a temperatura do ar na admissão
<i>Kbps</i>	- Quilobytes por segundo (Transferência de dados a 10^3 bytes por segundo)
<i>kV</i>	- Quilovolts (10^3 volts)
<i>Keyword</i>	- Palavra digital composta e 8 bits

L_1	- Indutância do enrolamento primário da bobina de ignição
LEM	- Laboratório de Ensaios de Motores do CETEC
<i>light off</i>	- Tempo de Inoperância do sistema de controle de mistura em malha fechada
<i>lookup tables</i>	- Tabelas de correção para parametrização do sistema de controle
M	- Número de colunas que compõe a matriz de calibração
MCI	- Motor de Combustão Interna
m_a	- Massa do ar em uma condição específica
MAF	- Sistema de medição de vazão mássica de ar (<i>Massic Air Flow</i>)
MAP	- Pressão do ar no coletor de admissão (<i>Manifold Absolute Pressure</i>)
Ms	- Milisegundo (10^{-3} Segundos)
$m_{a,i}$	- Massa de ar real introduzida no cilindro por ciclo
mJ	- MiliJoule (10^{-3} Joules)
ML	- Regime de marcha lenta
MoTeC	- Fabricante de sistemas de gerenciamento eletrônico de motores
mV	- Milivolt (10^{-3} Volts)
N	- Número de linhas que compõe a matriz de calibração
N	- Número de rotações do motor por minuto (RPM)
<i>Narrow Band</i>	- Sensor de O_2 de banda estreita
n_c	- Número de ciclos computacionais realizados pelo controlador de Lambda
n_{cil}	- Número de cilindros do Motor
NTC	- Coeficiente negativo de temperatura (<i>Negative Temperature Coefficient</i>)
N_{AP}	- Nitrogênio aparente
N_{APMS}	- Dente equivalente ao PMS mais próximo à falha da roda dentada (referência)
N_{th}	- Número de dentes da roda dentada
N_2	- Nitrogênio
O_2	- Oxigênio
OBD	- Sistema de autodiagnose para controle de emissões (<i>On Board Diagnostics</i>)
<i>On/Off</i>	- Controlador de dois estados
<i>Overboost</i>	- Pressão de sobre-alimentação
$p_{a,i}$	- Pressão absoluta do ar introduzido no cilindro por ciclo
P	- Pressão
P_0	- Pressão absoluta do ar na condição-padrão
P'	- Pressão de ar no cilindro
p_{Atm}	- Pressão Atmosférica
P_{ind}	- Potência Indicada
PC	- Computador (Personal Computer)
PD	- Controlador Proporcional Derivativo
PI	- Controlador Proporcional Integral
PID	- Controlador Proporcional Integral Derivativo

PMI	- Ponto Morto Inferior
PMS	- Ponto Morto Superior
<i>Priming Map</i>	- Mapa de correção utilizado nas partidas a frio do motor
<i>PTC</i>	- Coeficiente positivo de temperatura (<i>Positive Temperature Coefficient</i>)
<i>PWM</i>	- Modulador de Largura de Pulso (<i>Pulse Width Module</i>)
$Q_{a,i}$	- Vazão mássica de ar introduzida no cilindro por ciclo
$Q_{f,i}$	- Vazão mássica de combustível introduzido no cilindro por ciclo
R	- Número de rotações do motor por segundo (RPS)
r_c	- Relação de compressão
R_{NTC}	- Resistência do termistor utilizado na medição de temperatura
RV_N	- Razão volumétrica entre a concentração de N_{AP} e O_2 na atmosfera (3,764)
R_f	- Vazão mássica de um eletroinjeter por milissegundo de tensão aplicada
R_j	- Rotação instantânea do motor medido pelo sistema de aquisição
$R_{máx}$	- Rotação máxima de operação do motor controlado pelo EMS
R_{min}	- Rotação mínima de operação do motor controlado pelo SEM
R_n	- Ponto de rotação mapeado no instante de operação (n)
$R_{(n+i_{rot})}$	- Ponto de rotação mapeado no instante de operação (n+i _{rot})
RPM	- Rotação por minuto
RPS	- Rotação por segundo
R_x/T_x	- Protocolo de comunicação serial
R^2	- Fator de Linearização
<i>Set point</i>	- Valor de referência para um controlador (valor desejado)
<i>SFC</i>	- Consumo específico de combustível (<i>Specific Fuel Consumption</i>).
SGEM	- Sistema de gerenciamento eletrônico de motores de combustão interna
<i>shift light</i>	- Indicação luminosa de ocorrência de fenômeno
<i>SI</i>	- Ignição por centelha (<i>Spark Ignition</i>)
<i>Stall Saver</i>	- Válvula de passagem de ar acionada para facilitar a partida
T_0	- Temperatura do ar na condição-padrão
$T_{a,i}$	- Temperatura do ar real introduzido no cilindro por ciclo
T_{APMS}	- Tempo de processamento do sistema posterior à identificação da falha
T_{AV}	- Tempo associado ao ângulo de avanço na condição imposta
T_{CL}	- Tempo-base de injeção calculado pelo controle em malha fechada
$T_{c,j}$	- Tempo de injeção na condição de carga mapeada (c) e rotação medida (j)
$T_{(c+i_{carga}),j}$	- Tempo de injeção condição de carga mapeada (c+i _{carga}) e rotação medida (j)
$T_{c,n}$	- Tempo de injeção nas condições mapeadas de carga (c) e rotação (n)
$T_{(c+i_{carga}),n}$	- Tempo de injeção nas condições mapeadas de carga (c+i _{carga}) e rotação (n)
$T_{c,(n+i_{rot})}$	- Tempo de injeção nas condições mapeadas de carga (c) e rotação (n+i _{rot})
$T_{(c+i_{carga}),(n+i_{rot})}$	- Tempo de injeção condições mapeadas de carga (c+i _{carga}) e rotação (n+i _{rot})
$T_{e,i}$	- Temperatura do líquido de arrefecimento do motor (<i>ECT</i>)
t_{inj}	- Tempo de Injeção

$T_{i,j}$	- Tempo de injeção nas condições de carga (i) e rotação (j) medidas
$T_{i,n}$	- Tempo de injeção na condição de carga medida (i) e rotação mapeada (n)
$T_{i,(n+i_{rot})}$	- Tempo de injeção na condição de carga medida (i) e rotação mapeada ($n+i_{rot}$)
T_{loop}	- Tempo gasto para processamento de um ciclo computacional completo (<i>loop</i>)
T_{OL}	- Tempo-base de injeção calculado para controle em malha aberta
<i>TPS</i>	- Sensor de posição da válvula borboleta (<i>Throttle Position Sensor</i>)
<i>TWC</i>	- Conversor catalítico de três vias (<i>three way catalyst</i>)
<i>Twin Spark</i>	- Sistema de Ignição com duas velas por cilindro (centelha gêmea)
UFMG	- Universidade Federal de Minas Gerais
<i>UHC</i>	- Combustível não-queimado durante a combustão (<i>Unburned Hydrocarbon</i>)
<i>ULEV</i>	- Veículos de baixos níveis de emissões (<i>Ultra-Low Emissions Vehicle</i>)
V_a	- Volume do ar em uma condição específica
$V_{a,i}$	- Volume real de ar introduzido no cilindro por ciclo
$V_{a,i}$	- Vazão volumétrica ideal de ar admitido por ciclo
$V_{a,i,r}$	- Vazão volumétrica real de ar admitido por ciclo
V_d	- Volume deslocado pelo movimento do cilindro
V_{EGR}	- Vazão volumétrica de gases recirculados
V_i	- Tensão de alimentação do sensor de pressão absoluta (<i>MAP</i>)
V_{in}	- Tensão de entrada amplificador do sensor de temperatura
V_o	- Tensão de saída do sensor de pressão absoluta (<i>MAP</i>)
<i>Warm up</i>	- Período de aquecimento do motor
<i>Waste gate</i>	- Válvula de alívio para controle da pressão em turbo-compressores
<i>Wide Band</i>	- Sensor de O_2 de banda larga ou sensor linear
W_{sp}	- Energia fornecida pela bobina de ignição
<i>WOT</i>	- Condição de plena carga (<i>Wide Open Throttle</i>)
XDS	- Módulo de interface para comunicação com DSP

SIMBOLOGIA E LETRAS GREGAS

α_z	-	ângulo de ignição (<i>ignition timing</i>)
η_v	-	Eficiência volumétrica
μs	-	Microsegundo (10^{-6} segundo)
ρ_0	-	Massa específica do ar na condição-padrão
$\rho_{a,i}$	-	Massa específica do ar admitido
ρ_a	-	Massa específica do ar em uma dada condição
λ	-	Fator Lambda
ϵ_r	-	Constante dielétrica de um material

RESUMO

Desde a concepção e construção do primeiro motor de combustão interna, diversos sistemas de formação e ignição da mistura ar/combustível vêm sendo desenvolvidos. A inclusão de dispositivos eletrônicos possibilita otimizar seu rendimento, reduzindo o impacto ambiental causado pelos automóveis que o utilizam. A tarefa de calibração e ajuste, visando essa otimização, necessita de sistemas de gerenciamento eletrônicos programáveis denominadas centrais eletrônicas de desenvolvimento que, apesar dos diferentes fabricantes existentes, apresentam um custo elevado e um nível de acesso incompatíveis com as necessidades de um grupo de pesquisa independente. Este trabalho visa projetar, construir e testar um sistema de gerenciamento eletrônico de ignição e de injeção de combustível programável que permita analisar os parâmetros de funcionamento de um motor de combustão interna, bem como as estratégias de controle associadas a essa função. O desenvolvimento desses sistemas é uma tarefa multidisciplinar que envolve especialistas de diferentes áreas de atuação que utilizam, entre outros recursos, micro-controladores digitais de alto desempenho como os DSP's, para realizar essa otimização. Neste trabalho é apresentada a metodologia e os testes de implementação de um sistema de gerenciamento programável, suas vantagens, desvantagens e limitações. Os resultados obtidos mostram que o sistema desenvolvido apresenta o mesmo comportamento de um sistema comercial, com a vantagem de proporcionar condições de acesso à elaboração de novas estratégias de controle, permitindo refinar ainda mais a pesquisa em motores de combustão interna.

Palavras Chaves: sistema de gerenciamento eletrônico, DSP, motor de combustão interna, sistema programável, central eletrônica, controle, MCI.

ABSTRACT

Since the conception and first built of internal combustion engine (ICE), many control intake fuel systems and spark systems are being developed. The inclusion of electronic control systems enables to optimize their efficiency, reducing the vehicle environmental impact. The task of calibration and adjustment, to this optimization, needs to electronic management systems called Electronic Computer Unit (ECU). Although exist many different manufactures, it has a high cost and an access level incompatible with the needs of an independent research group. This work are intend to design, build and test a new adjustable electronic management system, able to modify all engine work parameters, as well as the control strategies associated with this function. The development of this kind of systems is a multidisciplinary task involving experts from different areas, among other resources, high performance digital computers, as DSP's, to achieve this optimization. This work shows the methodology of the implementation, tests of a new adjustable electronic management system, their advantages and limitations. The results, which were obtained shows that developed system could get the same results of commercial systems, with the advantage of providing access conditions for the development of new control strategies, allowing, refine the research of internal combustion engines.

Key Words: *electronic management system, DSP, internal combustion engine, ECU, reprogrammable system, electronic control unit, control, spark engine.*

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Desde a concepção do primeiro motor de combustão interna, e sua construção, diversos sistemas de controle da formação e ignição da mistura ar/combustível estão sendo desenvolvidos visando um objetivo comum: fornecer ao veículo torque suficiente para a sua locomoção, através da transformação da energia química do combustível em energia cinética rotacional no eixo de manivelas. A rápida evolução desses sistemas fez com que os sistemas mecânicos, como o carburador e o platinado, se tornassem ineficientes sob o ponto de vista de economia de combustível, eficiência de ignição e controle de emissão de poluentes (Passarini, 1993).

A aplicação de dispositivos eletrônicos aos sistemas de controle de formação e ignição da mistura ar/combustível, possibilitou a criação de um sistema mecânico-eletrônico combinado que, controlado por sistemas de gerenciamento eletrônico, proporcionam economia de combustível e reduzem o impacto ambiental causado pelos automóveis. A principal tarefa de um sistema de gerenciamento eletrônico é fornecer o torque demandado pelo condutor enquanto assegura máxima economia de combustível, maximiza a vida útil do motor e reduz a emissão de poluentes (Gerhardt, 1998).

Os avançados sistemas existentes são capazes de controlar todos os parâmetros de funcionamento do motor, transformando uma maior parcela da energia contida no combustível em trabalho útil. O aumento de rendimento associado às novas tecnologias mecânicas, como variadores de fase, sobre-alimentadores e novos materiais possibilitaram a concepção de motores de baixa cilindrada, leves e capazes de gerar valores de potência e torque superiores, quando comparados aos seus antecessores.

Em particular, os sistemas eletrônicos mantêm a mistura ar/combustível dentro de limites pré-definidos, proporcionando um maior desempenho do motor com economia de combustível, conforto e dirigibilidade (Denton, 2000). Para a determinação desses limites são realizados ensaios em bancos dinamométricos, onde diferentes condições de operação do motor são simuladas. Deve-se ressaltar ainda a necessidade

de atendimento às resoluções do Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA, através do Programa Nacional de Controle de Emissões Veiculares – PROCONVE, impostas à homologação e comercialização de um veículo (CETESB, 2006).

A necessidade de se obter calibrações individuais para os diferentes veículos faz com que os fabricantes desses sistemas disponibilizem às montadoras centrais eletrônicas de desenvolvimento ou “centrais abertas”. Essas ferramentas são utilizadas para gerar os mapas de referência do motor em uma aplicação específica, transferidos às “centrais dedicadas” que equipam os veículos em produção.

Diversos são os fabricantes desses sistemas que, por diferentes razões, não visualizam a importância da disponibilidade das centrais de desenvolvimento nas instituições de ensino superior ou de pesquisa. Esse fato faz com que pesquisadores e alunos busquem soluções para a realização de estudos de novos conceitos aplicados a motores de combustão interna e de combustíveis alternativos.

Este trabalho visa desenvolver o projeto de um sistema aberto de gerenciamento eletrônico de ignição e de injeção de combustível, levando-se em conta todas as características e estratégias de funcionamento, quando aplicados ao desenvolvimento de motores de ignição por centelha. Devido à disponibilidade de sistemas de gerenciamento eletrônico no mercado, pretende-se manter os componentes aplicados aos veículos de série (sensores e atuadores), focalizando apenas o sistema de controle. Pretende-se desenvolver um sistema capaz de realizar o gerenciamento eletrônico de um motor de combustão interna, cuja arquitetura permita a modificação dos parâmetros de funcionamento (parametrização), bem como às estratégias de controle associadas a cada um desses parâmetros (programação).

Diversos estudos realizados pelo Laboratório de Motores do Departamento de Engenharia Mecânica (DEMEC) da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) em parceria com o Laboratório de Ensaios de Motores (LEM) da Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais (CETEC), utilizando sistemas comerciais, apresentaram resultados satisfatórios dentro do que foi possível avaliar. Contudo, a utilização de um sistema de gerenciamento aberto permitiria uma análise mais aprofundada sobre a influência dos parâmetros de funcionamento dos motores de combustão interna no seu desempenho e, dessa forma, obter resultados ainda mais conclusivos sobre esses experimentos.

CAPÍTULO 2

OBJETIVOS E RELEVÂNCIA DO TRABALHO

Este trabalho visa projetar, construir e testar um sistema de gerenciamento eletrônico de ignição e de injeção de combustível programável, cuja arquitetura possibilite a implementação de novas estratégias de controle e a parametrização de motores de ignição por centelha, através do acesso às matrizes de ajuste e ao *software* de controle.

Esse sistema é constituído por um módulo principal (*hardware*), por rotinas específicas dedicadas ao controle do motor (*software*), por *interface* de comunicação para parametrização e definição de ajustes específicos (*IHM*) e por um ambiente de acesso ao *software* para implementação de estratégias de controle do motor.

Concebido como plataforma de desenvolvimento, possibilita a proposição e viabiliza a realização de novos trabalhos de pesquisa associados à Engenharia da Mobilidade, onde os custos e a indisponibilidade de sistemas comerciais similares, restringem novos desenvolvimentos.

Em relação a um sistema de gerenciamento eletrônico comercial, disponível apenas para importação, o sistema desenvolvido apresenta características similares a um custo reduzido, permitindo o acesso à parametrização através de uma Interface Homem-Máquina de forma similar ao sistema comercial, além da vantagem de possibilitar a implementação de novas estratégias de controle ou métodos de interpolação, a partir do acesso às rotinas dedicadas ao controle do motor (*software*).

Outra grande relevância é o fato dos módulos que constituem o sistema de gerenciamento eletrônico implementado são desenvolvidos e fabricados no Brasil, baseados em componentes disponíveis no mercado nacional. Todo o projeto dos circuitos eletrônicos está disponível para consulta, proposição e até modificação por profissionais relacionados à pesquisa em motores de combustão interna, que buscam o conhecimento, a formação e o crescimento junto à universidade.

A partir da viabilidade de aplicação desse sistema em veículos experimentais, é possível expandir essa aplicação aos protótipos desenvolvidos na UFMG, que vão desde propostas para redução do consumo de combustível até protótipos de alto desempenho. Essa expansão pode também atingir os veículos que compõe a frota nacional que não foram equipados com esse tipo de sistema, de diferentes marcas e modelos, visando a redução das emissões de poluentes.

Em ambos os casos o objetivo é comum, focado na tecnologia, no aprendizado e no desenvolvimento de competências através da qualificação de profissionais em diferentes áreas, pilares de sustentação da Engenharia da Mobilidade.

Essa é mais uma ferramenta de trabalho criada para que os grupos independentes, que ainda pesquisam alternativas e o desenvolvimento de novas tecnologias nacionais aplicadas aos motores de combustão interna, possam dar continuidade à suas pesquisas. Pretende-se auxiliar a busca de um mínimo comum na direção do aumento de eficiência desses motores e da redução do impacto ambiental causado pelos veículos que os utilizam.

O presente texto apresenta as etapas necessárias ao desenvolvimento de um sistema de gerenciamento eletrônico para motores de ignição por centelha. Para facilitar o entendimento do leitor foi dividido em capítulos, sendo a revisão bibliográfica (Capítulo 3) uma fonte de consulta dos tópicos abordados na metodologia (Capítulo 4), aos resultados aqui apresentados (Capítulo 5) e as respectivas conclusões sobre os testes realizados para validação do sistema desenvolvido (Capítulo 6). Finalmente, sugere-se as referências bibliográficas citadas no capítulo 7 como fonte de consulta para estudos mais aprofundados nos diversos temas aqui abordados.

Como a implementação de um sistema de gerenciamento eletrônico é um tarefa multidisciplinar, se apresenta aqui o trabalho de um grupo de pessoas e os resultados obtidos até o momento com a utilização desse sistema. Os trabalhos apresentados por Braga (2004), Pujatti *et al* (2004), Mendes *et al* (2004), Mendes *et al* (2005), Carvalho (2005), Braga (2007) são parte integrante desse desenvolvimento, visto que esses autores compõem a equipe que propôs e desenvolve o SGEM apresentado. Já Gomes *et al* (2005), Gomes (2005) e Baptista (2007) apresentam resultados em trabalhos de pesquisa utilizando os benefícios desse sistema de gerenciamento eletrônico, em tentativas de desenvolver novas tecnologias aplicadas aos motores de combustão interna.

CAPÍTULO 3

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Desde a concepção do primeiro motor de combustão interna de quatro tempos em 1862 pelo físico francês Alphonse Beau de Rochas, e a sua construção experimental em 1872 por Nikolaus Otto, diversos sistemas de controle da formação e de ignição da mistura ar/combustível vêm sendo desenvolvidos visando fornecer ao veículo o torque suficiente para a sua locomoção, através da transformação da energia química contida no combustível em energia cinética no eixo de manivelas (Passarini, 1993).

A rápida evolução dos motores fez com que sistemas mecânicos como o carburador e o platinado, utilizados amplamente no Brasil até 1980, se tornassem ineficientes sob o ponto de vista de economia de combustível, eficiência de ignição e controle da emissão de poluentes. A inserção dos dispositivos eletrônicos nos sistemas de controle de formação de mistura ar/combustível possibilitou a criação de um sistema “*mecatrônico*” que proporciona, além da economia de combustível, a redução do impacto ambiental causado pelos veículos automotores. Os Sistemas de Gerenciamento Eletrônico (*Electronic Management Systems – EMS*) possibilitam o fornecimento do torque demandado pelo condutor enquanto asseguram economia de combustível, maximizam a vida útil do motor e reduzem a emissão de poluentes (Gerhardt, 1998).

Este capítulo apresenta um estudo dos motores de combustão interna (MCI) de ignição por centelha (*SI*), descrevendo suas principais características de funcionamento e destacando os aspectos importantes do seu desenvolvimento. Aos leitores não familiarizados com os MCI's, recomenda-se uma consulta às referências apresentadas por Giacosa (1979), Heywood (1988) e Denton (2000). Trata ainda da evolução dos sistemas eletromecânicos e “*mecatrônicos*” de controle da formação da mistura ar/combustível e de sua ignição, onde são apresentados alguns detalhes fundamentais para o entendimento deste trabalho, sendo abordados de forma a esclarecer eventuais dúvidas inerentes ao assunto.

3.1 Os motores de combustão interna de ignição por centelha

Nos motores de combustão interna de ignição por centelha, que operam em ciclo de quatro tempos, um ciclo de trabalho corresponde a duas voltas completas do eixo de manivelas. Através de um sistema biela-manivela (dimensões: $L \times r$), o movimento alternativo é transformado em um movimento rotativo do eixo de manivelas, sendo o curso total de deslocamento dos pistões definido entre o ponto morto superior (PMS) e o ponto morto inferior (PMI), como mostrado na Figura 3.1 (Heywood, 1995).

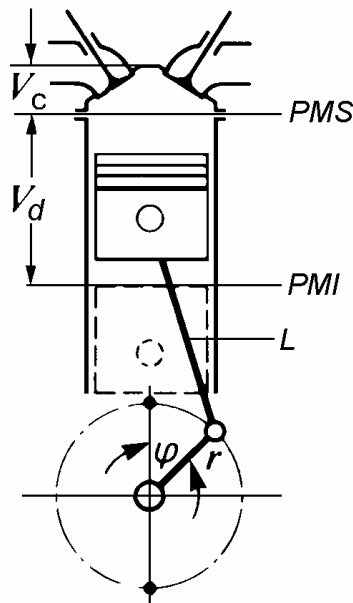


Figura 3.1 – Diagrama esquemático de um MCI de 04 tempos (Adler, 1993).

Define-se como V_d o volume deslocado pelo movimento do pistão ao longo de todo seu curso (de PMS a PMI), e como V_c o volume da câmara de combustão, o volume delimitado pelo cabeçote e o pistão em PMS. Aqui se introduz o conceito de relação volumétrica de compressão (r_c) como a redução de volume com o deslocamento do pistão de PMI a PMS, definida pela equação (Heywood, 1995):

$$r_c = \frac{\text{volume total do cilindro}}{\text{volume mínimo do cilindro}} = \frac{V_d + V_c}{V_c} \quad (3.1)$$

Os quatro tempos que classificam esses motores ocorrem de maneira sincronizada entre o movimento alternativo dos pistões e um conjunto de válvulas presentes no interior da câmara de combustão. Esse mecanismo controla a admissão e a exaustão do motor, como apresentado na Figura 3.2.

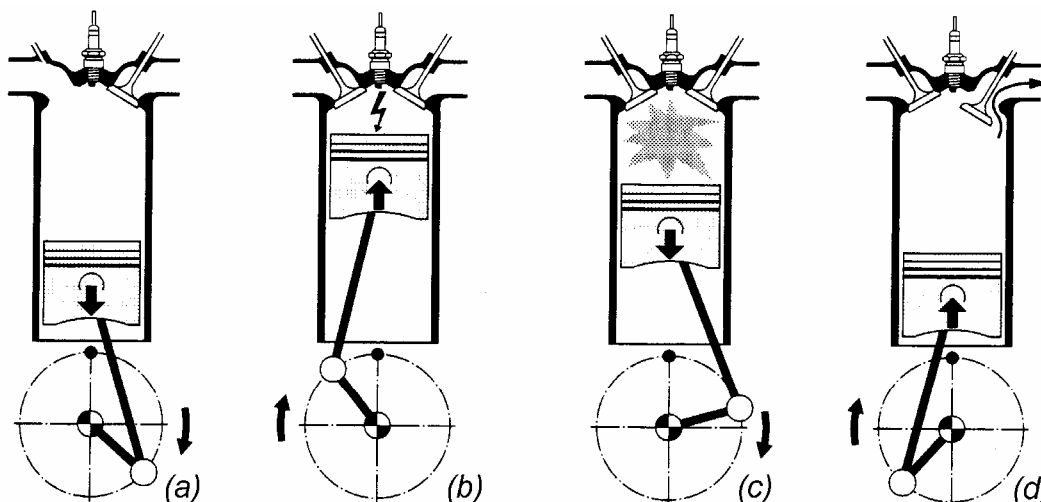


Figura 3.2 – Ciclo de quatro tempos de um MCI de ignição por centelha (Adler, 1988).

O primeiro deles é o tempo de admissão mostrado na Figura 3.2-a. É caracterizado pelo movimento descendente do pistão (de PMS a PMI) com a válvula de admissão aberta e a válvula de descarga fechada. Nessa condição, a mistura ar/combustível formada no coletor de admissão é introduzida no motor devido à queda de pressão gerada pelo aumento do volume do cilindro durante a movimentação do pistão.

Devido ao sincronismo das válvulas e do eixo de manivelas, a válvula de admissão se fecha completamente no instante em que o pistão atinge o PMI e inicia o movimento ascendente em direção ao PMS, comprimindo a mistura admitida e iniciando o tempo denominado de compressão (Figura 3.2-b). Devido à necessidade da introdução de energia para a ignição da mistura comprimida, uma centelha elétrica produzida pelo sistema de ignição é introduzida no ciclo através da vela de ignição, promovendo o início da combustão dentro do cilindro.

A combustão da mistura promove um aumento da pressão no cilindro, fazendo com que a força exercida sobre o pistão no PMS seja suficiente para vencer as inércias e perdas mecânicas e movimentá-lo até o PMI (Figura 3.2-c), transmitindo parte dessa força ao eixo de manivelas através da biela. Esse tempo é denominado de expansão e termina com o pistão no PMI e com a abertura da válvula de descarga.

A abertura da válvula de descarga inicia o tempo de exaustão, onde os gases provenientes da combustão da mistura admitida pelo motor são comprimidos para fora do cilindro durante a movimentação ascendente do pistão, como mostra a Figura 3.2-d. Ao término desse tempo, o pistão encontra-se no PMS, sincronizando o fechamento da válvula de descarga e a abertura da válvula de admissão para iniciar um novo ciclo.

3.2 Admissão de ar nos motores de combustão interna

O sistema de admissão de ar dos motores de ignição por centelha (S.I.) é composto basicamente por um filtro de ar e seus condutos, pelo carburador ou por componentes do sistema de injeção eletrônica de combustível, pela válvula borboleta e pelo coletor de admissão. Nesses motores, a solicitação de carga é realizada pela variação da quantidade mássica de ar admitida durante seu funcionamento e controlada por meio da variação da posição angular da válvula borboleta. Schirm (2003) mostra um estudo experimental do desempenho de um MCI com variação do ângulo de abertura da válvula de admissão, com o objetivo de remover a válvula borboleta.

Durante o processo de aspiração normal do ar à pressão atmosférica (p_{Atm}), as perdas de carga do sistema de admissão induzem uma queda de pressão que altera significativamente a pressão de admissão do motor desde o filtro de ar até o interior do cilindro. A pressão varia ainda com a rotação do motor, com a resistência ao escoamento de cada componente, com a área da seção transversal do duto de admissão, com a densidade do fluido de trabalho e com os efeitos pulsativos no coletor de admissão (Hanriot, 2001). A Figura 3.3 apresenta um diagrama esquemático da queda de pressão ao longo de todo o sistema de admissão, onde p' é a pressão do ar no cilindro conduzido através do sistema de admissão.

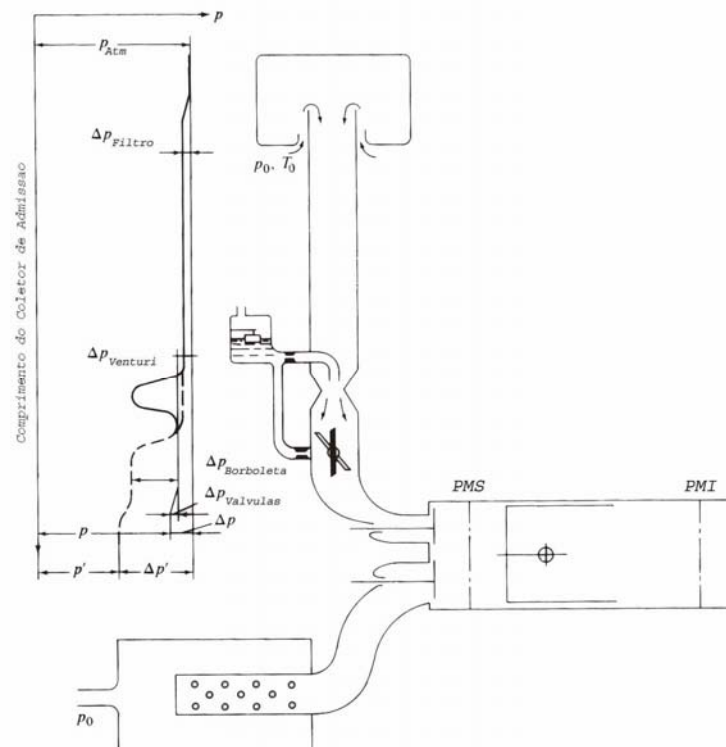


Figura 3.3 – Queda de pressão ao longo do sistema de admissão (Heywood, 1995).

Os motores de ignição por compressão (C.I.) apresentam uma grande vantagem em relação aos de ignição por centelha por não possuírem em seu sistema de admissão de ar o carburador e a válvula borboleta, o que faz com que as perdas de carga deste sistema sejam menores quando comparadas com os motores S.I. (Heywood, 1995).

No intuito de aumentar a quantidade de ar admitido pode-se iniciar a abertura da válvula de admissão antes do fechamento da válvula de descarga, entre os tempos de descarga e de admissão, visando o aproveitamento da inércia dos gases no sistema de admissão e de descarga. Este fenômeno é conhecido como cruzamento de válvulas (*overlap period*), sendo definido em função do ângulo do eixo de manivelas durante o qual as válvulas de admissão e descarga permanecem abertas simultaneamente (Hanriot, 2001). A Figura 3.4 apresenta o diagrama de enquadramento das válvulas de admissão e descarga em função do ângulo do eixo de manivelas, onde esse fenômeno é mostrado no ângulo compreendido entre os pontos (1) e (5) que representam, respectivamente, o instante de abertura da válvula de admissão e o fechamento da válvula de descarga. Apresenta ainda faixas de valores típicos para o atraso no fechamento da válvula de admissão (2), do ângulo de avanço de ignição (3) e do ângulo de abertura antecipada da válvula de descarga (4).

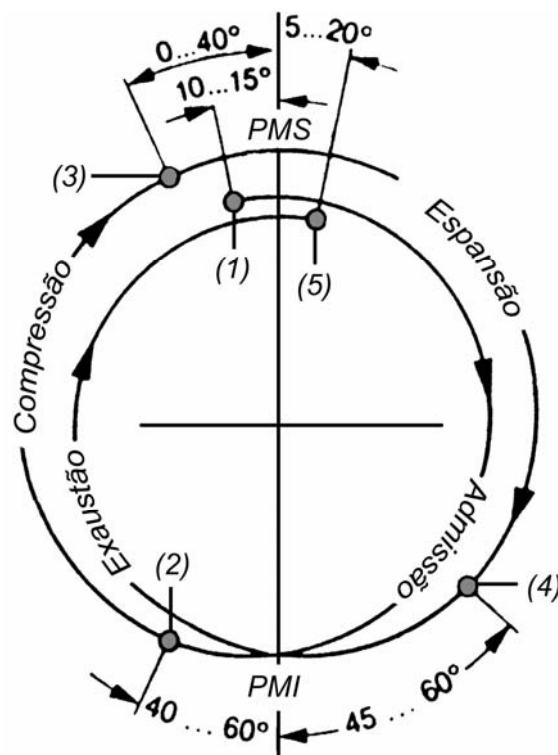


Figura 3.4 – Diagrama de válvulas (Adler, 1988).

Outros fatores de grande influência na quantidade de ar admitido é a configuração das válvulas (dimensões) e suas características de deslocamento, velocidade e aceleração do came que as aciona e a característica pulsativa do escoamento do ar através dos condutos do coletor de admissão. Harriot (2001) apresenta um estudo sobre esses fenômenos que, devido às grandes variações de volume no cilindro em função do movimento do pistão, produzem perturbações que se propagam como ondas de rarefação e compressão ao longo do conduto, durante a abertura e fechamento das válvulas de aspiração e descarga.

No intuito de caracterizar o processo de admissão de ar nesses motores, pode-se definir um volume de controle delimitado pelo sistema, onde os principais parâmetros são a vazão, a pressão e a temperatura do ar na entrada e na saída do volume de controle. A caracterização deste processo é de grande importância no estudo de um MCI, visto que a potência indicada ou fornecida por ele é diretamente proporcional à quantidade de ar inserida em relação ao volume dos cilindros do motor (cilindrada). Essa relação é definida como eficiência volumétrica η_v sendo representada pela seguinte equação para um motor de quatro tempos (Harriot, 2001):

$$\eta_v = \frac{2 \cdot m_{a,i}}{\rho_{a,i} \cdot V_d \cdot n} \quad (3.2)$$

Onde:

η_v = eficiência volumétrica;

$m_{a,i}$ = vazão mássica de ar real admitida no cilindro por ciclo [kg/min];

$\rho_{a,i}$ = massa específica do ar admitido [kg/m³];

V_d = volume deslocado pelo cilindro (PMS – PMI) [m³];

n = número de rotações do motor [RPM].

A vazão mássica de ar real admitida no cilindro por ciclo ($m_{a,i}$) é o parâmetro de referência para a introdução da quantidade de combustível visando sempre a formação da mistura ar/combustível em função do regime de operação do motor. Nos sistemas mecânicos, a quantidade de combustível introduzida no motor é função direta da velocidade do ar admitido pelo motor devido a sua passagem através de um tubo tipo venturi instalado antes da válvula borboleta. A queda de pressão no interior do venturi, causada pela passagem do ar, aspira o combustível da cuba através de um duto e um furo calibrado formando a mistura ar/combustível.

O calibre do furo é modificado até que se alcance a condição de mistura estequiométrica em cargas parciais. Como a velocidade do ar admitido varia desde a rotação de partida (~300 RPM/borboleta fechada) até condições de rotação e carga máxima (~6500 RPM/borboleta aberta), o efeito venturi apresenta problemas de baixa queda de pressão em baixas rotações e de elevada perda de carga em elevadas rotações. As situações de enriquecimento da mistura ar/combustível durante a partida, no regime de marcha lenta, acelerações rápidas e em condições de plena carga, somente são obtidas através de instalação de sistemas auxiliares. Diversos são esses sistemas que, devido ao extenso tempo de utilização¹, evoluíram de sistemas mecânicos para os sistemas de controle eletrônicos (carburadores eletrônicos). Como não é objetivo desse trabalho o estudo da evolução desses sistemas, recomenda-se aos interessados uma consulta às referências apresentadas por Obert (1971), Giacosa (1979) e Denton (2000).

A evolução dos sistemas eletrônicos, principalmente nas décadas de 80 e 90 do século XX, promoveu uma ampla mudança dos sistemas de formação e controle da mistura ar/combustível onde os “*sistemistas*”, em especial a Robert Bosch GmbH, apontada como pioneira, desenvolveram e desenvolvem diferentes mecanismos e princípios de medição da quantidade de ar mássica admitida pelo motor. A Tabela III.1 apresenta os principais sistemas de medição existentes no mercado, classificando-os pelo princípio de funcionamento, pelo fabricante e pela forma de determinação.

Tabela III.1 – Sistemas de medição da massa de ar admitida existentes no mercado.

Descrição:	Princípio de medição:	Fabricante:	Determinação:
Medidor de fluxo de ar (válvula prato)	Mecânico, através de sistema de alavancas.	Bosch	Direta
Medidor de fluxo de ar (válvula prato) com realimentação	Mecânico/elétrico, através de sistema de alavancas, realimentado por potenciômetro linear.	Bosch	Direta
Medidor do fluxo de ar (MAF)	Mecânico/elétrico, movimento de um <i>flap</i> acoplado à um potenciômetro linear associado a um sensor de temperatura do ar.	Bosch	Direta
Anemômetro de fio-quente	Variação da corrente causada pela passagem do ar sobre um filamento aquecido.	Bosch	Direta
Speed Density	Medição da pressão, da velocidade do motor e da temperatura do ar no coletor.	Magneti Marelli	Indireta
Ultra-sônico	Variação do tempo de propagação de uma onda através do ar admitido	Bosch	Indireta
Kármán Vortex	Medição da frequência do escoamento turbulento através do sensor.	Bosch	Indireta

¹ Pode-se denominar esse tempo como extenso quando se considera a aplicação do carburador desde sua primeira construção em 1872 até o fim da aplicação em veículos nacionais novos, em meados da década de 90 (Passarini, 1993).

A Tabela III.1 classifica os sistemas de medição como diretos e indiretos. O primeiro deles utiliza um sensor de fluxo de ar inserido diretamente no duto de aspiração, antes da válvula borboleta, sendo capazes de medir a vazão volumétrica de ar na entrada do motor. Sauer (1980) afirma que sistemas térmicos de medição direta foram amplamente utilizados nos primeiros sistemas de controle e formação da mistura ar/combustível para detecção da condição instantânea de carga nos MCI's. Afirma ainda que esse sistema, devido à utilização de um resistor de platina aplicado sobre um substrato cerâmico, necessita de um tempo mínimo até que a resposta do sistema seja capaz de reconhecer a condição do motor, principalmente durante a partida.

Sauer (1988) apresenta então, como solução para a redução do tempo de resposta dos sistemas térmicos de medição, os anemômetros de fio quente (*Bosch hot wire*), onde a redução da inércia térmica associada ao elemento sensor diminui significativamente os efeitos apresentados anteriormente.

Pelo fato dos sistemas citados detectarem o escoamento de ar através do elemento sensor, a variação da direção do fluxo, causada pela característica pulsativa desse escoamento, era a principal fonte de incerteza da medição. Dessa forma, Konzelmann e Hecth (1995) apresentam um sistema capaz de detectar a direção do fluxo e de compensar a característica pulsativa no coletor de admissão (*reverse flow detection*). Esse conceito é baseado na utilização de dois sensores de temperatura posicionados na região anterior (T_1) e posterior (T_2) de uma zona de aquecimento. Dessa forma é possível avaliar o sinal de ΔT ($\Delta T = T_2 - T_1$). A Figura 3.5 apresenta os resultados comparativos entre os sistemas.

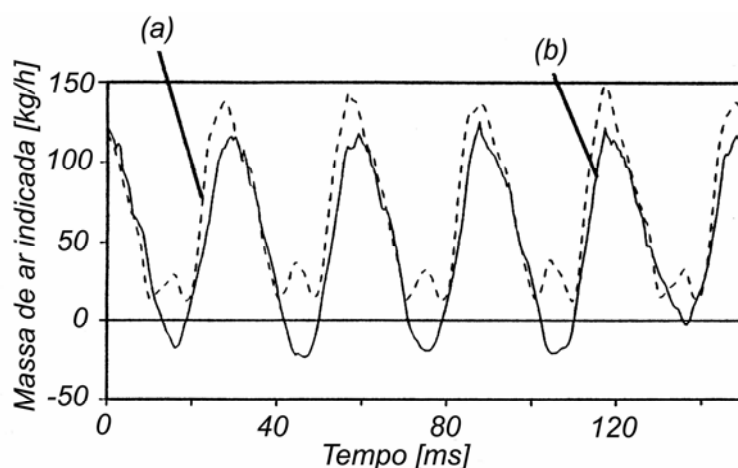


Figura 3.5 – Medição de vazão de ar, (a) sistema convencional (*hot wire*), (b) *reverse flow detection* (Konzelmann e Hecth, 1995).

Os sistemas classificados como de medição indireta (Tabela III.1) utilizam equações de correlação entre propriedades físicas do ar no coletor de admissão (temperatura e pressão) para determinar a quantidade de ar admitida. Ribbens (1998) cita que, dentre os sistemas mencionados, o *Speed-density* se apresenta como um dos mais aplicados aos veículos de passeio, cuja principal diferença em relação aos que realizam medição direta, está na posição em que realiza a medição.

O *Speed-density* realiza medições da temperatura e da pressão no coletor de admissão após a válvula borboleta, permitindo a determinação da massa específica do ar na entrada do cilindro através de tabelas e equações termodinâmicas. Para um dado volume de ar (V_a), a uma pressão (p_a) e temperatura (T_a), a massa específica (ρ_a) pode ser determinada em função da massa de ar (m_a) pela equação (Ribbens, 1998):

$$\rho_a = \frac{m_a}{V_a} \quad \therefore \quad m_a = V_a \cdot \rho_a \quad (3.3)$$

Wyllen (1998) afirma que, a partir da pressão absoluta do ar no coletor de admissão ($p_{a,i}$) e sua temperatura ($T_{a,i}$), é possível determinar a massa específica de ar presente no coletor ($\rho_{a,i}$) nas diversas condições de operação do MCI. No *Speed-density*, $p_{a,i}$ e $T_{a,i}$ são determinados por meio de sensores e a massa específica ($\rho_{a,i}$) através de tabelas e equações termodinâmicas (gás ideal). Normalmente o valor de $\rho_{a,i}$ é calculado em relação às condições-padrão do ar como massa específica (ρ_0), temperatura (T_0) e pressão (p_0), de acordo com a equação (Ribbens, 1998):

$$\rho_{a,i} = \rho_0 \left(\frac{p_{a,i}}{p_0} \right) \cdot \left(\frac{T_0}{T_{a,i}} \right) \quad (3.4)$$

No sistema citado, $T_{a,i}$ é medida através de um elemento resistivo, cuja variação da temperatura provoca uma variação de resistência (Termistores). Essa variação altera a corrente nominal do circuito, promovendo diferentes valores em função da variação de temperatura no elemento. Carvalho (2005) afirma que se a variação da resistência for diretamente proporcional à temperatura, esse termistor possui coeficiente positivo de temperatura, sendo classificado como PTC (*Positive Temperature Coefficient*). Por outro lado, se a variação for inversamente proporcional à temperatura, possui um coeficiente negativo, sendo classificado como NTC (*Negative Temperature Coefficient*).

A curva de calibração desse sensor (PTC ou NTC) deve ser determinada de forma a correlacionar o valor da tensão de saída em função da temperatura do elemento resistivo, na mesma condição de alimentação e de conexão ao sistema, de forma a minimizar as incertezas associadas à medição. Esta curva é obtida através de verificação do valor da tensão lida pelo sistema de aquisição de dados, sendo esses valores correlacionados à temperatura medida pelo padrão de referência em condições estabilizadas. Pelo fato da curva de calibração representar para o sistema de gerenciamento eletrônico a referência para cálculo da vazão mássica de ar e da condição de operação do motor, a qualidade do sensor prima pela menor incerteza associada a essa medição.

Assim como a temperatura, a pressão absoluta do coletor, $p_{a,i}$, é utilizada para a determinação não só da vazão mássica de ar no coletor, mas também para referência da condição de carga imposta ao motor. Nos atuais sistemas de gerenciamento eletrônico, a pressão absoluta do coletor de admissão é utilizada como parâmetro de referência para ajuste do motor, sendo, juntamente com a rotação, a variável que define, por exemplo, o mapa de avanço-base de ignição. Por se tratar de uma medição absoluta da pressão, essa grandeza permite ainda que o sistema de gerenciamento realize as devidas correções nos parâmetros atrelados a este sinal, em função das variações de pressão atmosférica, desde o nível do mar até às localidades de elevada altitude.

Para esta aplicação, a indústria automotiva utiliza geralmente dois tipos de transdutores, os capacitivos e os extensométricos (*strain gauge*). Carvalho (2005) mostra que os transdutores capacitivos utilizam a variação da pressão no coletor para alterar a distância (d) entre duas placas paralelas de área (A), separadas por um material de constante dielétrica (ϵ_r), de acordo com a equação:

$$C = \frac{\epsilon_r A}{d} \quad (3.5)$$

Já os transdutores extensométricos são compostos por quatro elementos resistivos (R_1 , R_2 , R_3 e R_4) conectados segundo uma configuração em ponte de Wheatstone (Doebelin, 2004) e aplicados sobre um diafragma de silício. Esse diafragma isola a câmara de vácuo incorporada ao sensor, da pressão do coletor da admissão. Dessa forma, as variações de pressão no coletor são determinadas de forma absoluta em relação ao vácuo da câmara. A Tensão de saída (V_o) é linearmente proporcional ao produto da pressão no coletor de admissão (variação de R_1 , R_2 , R_3 e R_4) pela tensão de alimentação do sensor (V_i), segundo a equação (Carvalho, 2005):

$$V_o = \left[\left(\frac{R_1}{R_1 + R_4} \right) - \left(\frac{R_2}{R_2 + R_3} \right) \right] \cdot V_i \quad (3.6)$$

Um dos inconvenientes de se medir a pressão absoluta do ar está associado à existência de pulsações no interior do coletor de admissão causadas principalmente pelo movimento alternativo dos pistões e pela abertura/fechamento das válvulas. Segundo Carvalho (2005), a frequência da flutuação da pressão pode ser determinada em função da rotação do motor (n) e do número de cilindros (N_{cil}), segundo a equação:

$$f_p = \frac{n \cdot N_{cil}}{120} \quad (3.7)$$

A vazão mássica de ar admitido por ciclo ($m_{a,i}$) pode então ser determinada pelo produto da vazão volumétrica de ar ($V_{a,i}$) pela massa específica ($\rho_{a,i}$) calculada. Ribbens (1998) apresenta uma forma de determinar a vazão volumétrica de ar ($V_{a,i}$). Supondo que o sistema de admissão e o motor funcionem segundo condições ideais, tem-se que $V_{a,i}$ é função direta da cilindrada do motor (D) e de sua rotação (n) segundo a equação:

$$V_{a,i} = \left(\frac{n}{60} \right) \cdot \left(\frac{D}{2} \right) \quad (3.8)$$

A Equação 3.2 apresenta a eficiência volumétrica η_v e a define como a quantidade de ar inserida em relação à quantidade ou volume dos cilindros do motor. Dessa forma é possível determinar $V_{a,i,r}$ real de um motor de 04 tempos através da equação (Ribbens, 1998):

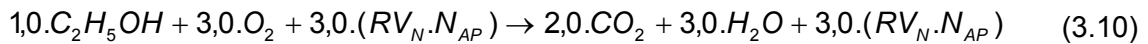
$$\dot{V}_{a,i,r} = \left(\frac{n}{60} \right) \cdot \left(\frac{D}{2} \right) \cdot \eta_v \quad (3.9)$$

A eficiência volumétrica η_v é representada através de um número adimensional que pode variar de 0 a 1 para motores comerciais naturalmente aspirados. Em caso de motores que utilizam sistema de recirculação dos gases de descarga para controle de emissões (EGR), deve-se reduzir a vazão volumétrica dos gases recirculados (V_{EGR}) pela natureza inerte que apresentam à reação de combustão.

3.3 Formação da mistura ar/combustível

A quantidade de combustível introduzida no motor é função direta da quantidade mássica de ar admitido, sendo o processo de admissão caracterizado pela quantidade de mistura ar/combustível, denominada de fluido de trabalho, inserida ou bombeada para o interior dos cilindros de um MCI.

Essa mistura é considerada ideal ou estequiométrica se o Oxigênio (O_2) presente na massa de ar admitida for suficiente para reagir completamente com a massa de combustível inserida, obtendo-se como produtos da combustão o Dióxido de Carbono (CO_2), a Água (H_2O) e os gases inertes presentes no ar de admissão (N_{AP}). A Equação 3.10 apresenta, a título de exemplo, a reação balanceada de combustão de uma molécula de Álcool Etílico (C_2H_5OH) com ar atmosférico (Pereira, 2001).



Onde:

N_{AP} = Nitrogênio aparente (concentração volumétrica de N_2 e demais elementos presentes no ar atmosférico não-reagentes ao processo de combustão);

RV_N = Razão volumétrica entre N_{AP} e O_2 , presente na atmosfera ($79,01/20,99=3,764$).

Em função do número de moles apresentado na Equação 3.10 é possível determinar as massas de ar e de combustível que reagem durante a combustão e, dessa forma, determinar a relação ar/combustível estequiométrica ($A/F_{(s)}$) da reação. A Equação 3.11 apresenta o cálculo da massa de ar (m_{ar}) consumida na reação.

$$m_{ar} = [3,000.(1 + 3,764) mol].[28,960 g / mol] = 413,89 [g] \quad (3.11)$$

De forma similar, a Equação 3.12 apresenta o cálculo da massa de combustível (m_{comb}) consumida na reação.

$$m_{comb} = [1,0 mol].[(24,0 + 6,0 + 16,0) g/mol] = 46,0 [g] \quad (3.12)$$

Determinados m_{ar} e m_{comb} , a relação $A/F_{(s)}$ é calculada segundo a equação:

$$A/F_{(s)} = \frac{m_{ar}}{m_{comb}} = 9,0 \quad \Rightarrow \quad A/F_{(s)} = 9,0 : 1 \quad (3.13)$$

Para efeitos comparativos em razão de volume, a quantidade de ar necessária para a combustão estequiométrica de 1,0 litro de Gasolina Pura (E0) é de aproximadamente 10000 litros, considerando a relação $A/F_{(s)} = 14,7:1$. A Figura 3.6 apresenta essa proporção.

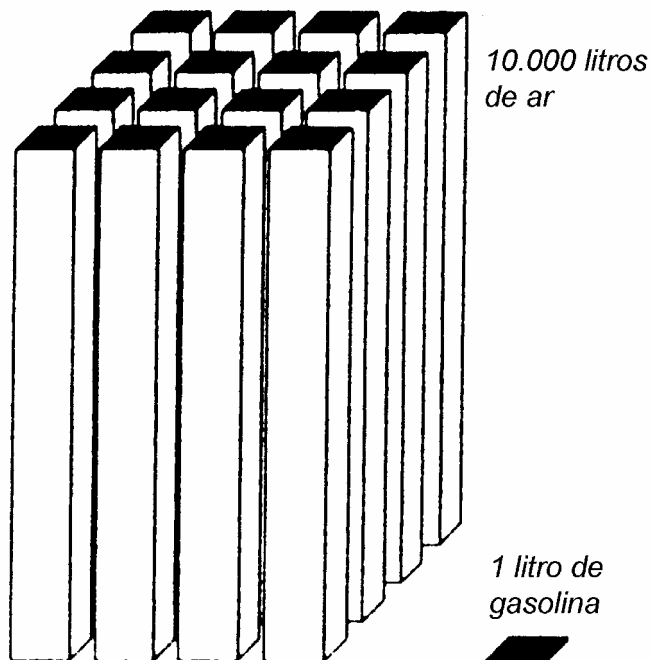


Figura 3.6 – Razão em volume para combustão estequiométrica de Gasolina (Adler, 1988).

A relação ar/combustível estequiométrica ($A/F_{(s)}$) varia de acordo com o tipo de combustível utilizado, como mostra a Tabela III.2, tendo-se sempre como referência a concentração de O_2 presente no ar atmosférico.

Tabela III.2 – Relação A/F estequiométrica em função do combustível (Pereira, 2001).

Combustível:	$A/F_{(s)}$ [kg/kg]:
Gasolina Pura (E0)	14,7:1
Etanol (E100)	9,0:1
Gasolina Comum (E22)	13,2:1
Diesel	15,2:1
Metanol	6,4:1
Metano (CH_4)	17,2:1
Propano (C_3H_8)	15,6:1
Butano (C_4H_{10})	15,4:1
Hidrogênio	34,0:1

Em função do tipo de combustível e da vazão mássica de ar na entrada do cilindro ($\dot{Q}_{a,i}$) é possível determinar a quantidade mássica de combustível ($\dot{Q}_{f,i}$) necessária para a operação do motor em condições ideais de combustão de acordo com a equação:

$$\dot{Q}_{f,i} = \frac{\dot{Q}_{a,i}}{A/F_{(s)}} \quad (3.14)$$

Devido a variação dos valores de $A/F_{(s)}$ entre os diferentes combustíveis define-se um fator, conhecido como Lambda (λ), obtido a partir da divisão dos valores de relação ar/combustível real e estequiométrica segundo a equação (Adler, 1988):

$$\lambda = \frac{A/F_{(r)}}{A/F_{(s)}} \quad (3.15)$$

Dessa forma, define-se de uma maneira simples e direta a condição de operação instantânea de um MCI a partir da análise do fator λ , que define, para valores diferentes de 1,00, o excesso ou a falta de ar presente na combustão. Adler (1988) define λ como o fator de excesso de ar (*excess-air factor*) e apresenta considerações a respeito. Em condições de $\lambda = 1,00$, a quantidade mássica de ar corresponde à quantidade teórica necessária para combustão completa da massa equivalente de combustível. Leone *et al* (1997) citam que uma das formas de se obter veículos com valores reduzidos de emissões (*Ultra-Low Emissions Vehicle – ULEV*) e economia de combustível está em obter um controle da mistura ar/combustível em torno da condição estequiométrica ($\lambda = 1,00$) e reduzindo o tempo de enriquecimento nas regiões onde são necessários, como nos regimes de aceleração rápida (*transient throttle operation*).

Por outro lado, situações de $\lambda < 1,00$ representam uma condição de mistura rica que, na faixa de $0,85 < \lambda < 0,95$ (5 a 15% de enriquecimento), possibilitam atingir a potência máxima desenvolvida pelos MCI's de ignição por centelha (Adler, 1988).

Em casos de empobrecimento da mistura ar/combustível na faixa de $1,10 < \lambda < 1,20$ (10 a 20% de empobrecimento) são alcançadas as melhores condições de economia de combustível, porém uma redução da potência útil do motor ocorrerá nessa condição, causando um aumento no consumo específico de combustível (S_{fc}). Para valores de λ superiores a 1,3 (superiores a 30% de empobrecimento) a ocorrência do fenômeno de extinção da combustão (*misfire*) é favorecida, comprometendo o funcionamento do MCI (Leone *et al*, 1997; Lenz e Schroeder, 1997; Adler, 1988).

A Figura 3.7-a apresenta a influência da variação do fator λ na potência indicada (P_{ind}) e no consumo específico de combustível (SFC). Já a Figura 3.7-b apresenta a influência de λ na composição das emissões de poluentes.

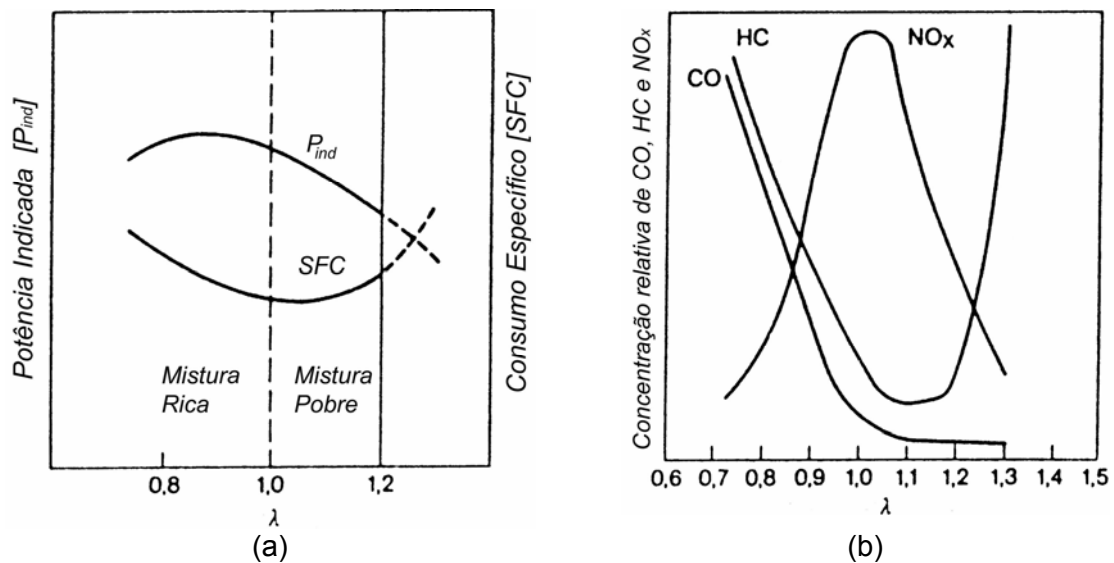


Figura 3.7 – Influência da variação de λ na potência indicada e de consumo específico de combustível (a) e na composição das emissões de poluentes (b) (Adler, 1988).

Nos motores SI são requeridas diferentes relações ar/combustível em função da sua condição de operação. Ribbens (1998) classifica as condições de operação do motor, como:

- Partida do motor;
- Aquecimento;
- Marcha lenta;
- Cargas parciais;
- Aceleração rápida;
- Plena carga;
- Desaceleração.

De um modo geral, a relação ar/combustível real ($A/F_{(r)}$) varia entre situações de enriquecimento ($\lambda < 1,00$), empobrecimento ($\lambda > 1,00$) e condições ideais ($\lambda = 1,00$) durante as diferentes condições de operação citadas. Na partida do motor, por exemplo, existe a necessidade do enriquecimento da $A/F_{(r)}$ ($\lambda < 1,00$), associada principalmente à baixa velocidade do eixo de manivelas (± 300 RPM). Já nas condições de cargas parciais, a redução do consumo específico de combustível (SFC) e dos níveis de emissão de poluentes é favorecida em condições ideais da $A/F_{(r)}$ ($\lambda = 1,00$).

Por outro lado, em condições de desaceleração do motor existe a necessidade de empobrecimento da $A/F_{(r)}$ ($\lambda > 1,00$) visando principalmente a redução das emissões veiculares (Leone *et al*, 1997).

Devido à necessidade de variar a relação ar/combustível ($A/F_{(r)}$) em função da condição de operação do motor, nos sistemas dotados de carburador puramente fluido-mecânico, a tarefa de se realizar a adequação da $A/F_{(r)}$ para a real condição de funcionamento do motor torna-se árdua (Giacosa, 1979).

Por essa razão, reconhecer a condição instantânea de operação de um MCI é fundamental para a definição dos parâmetros de funcionamento, principalmente da mistura ar/combustível real a ser utilizada.

Pelo fato da quantidade de combustível ser diretamente proporcional a quantidade mássica de ar admitido pelo motor por ciclo de trabalho, o primeiro passo para o controle da mistura $A/F_{(r)}$ é a determinação da vazão mássica do ar admitido ($m_{a,i}$) nas diferentes condições de operação como citado no Item 3.2. Essas diferentes condições de operação são apresentadas por Bauer (1999) e podem ser representadas graficamente, em função da rotação e do torque do motor, demandado pelo condutor através do acionamento da válvula borboleta, de acordo com a Figura 3.8.

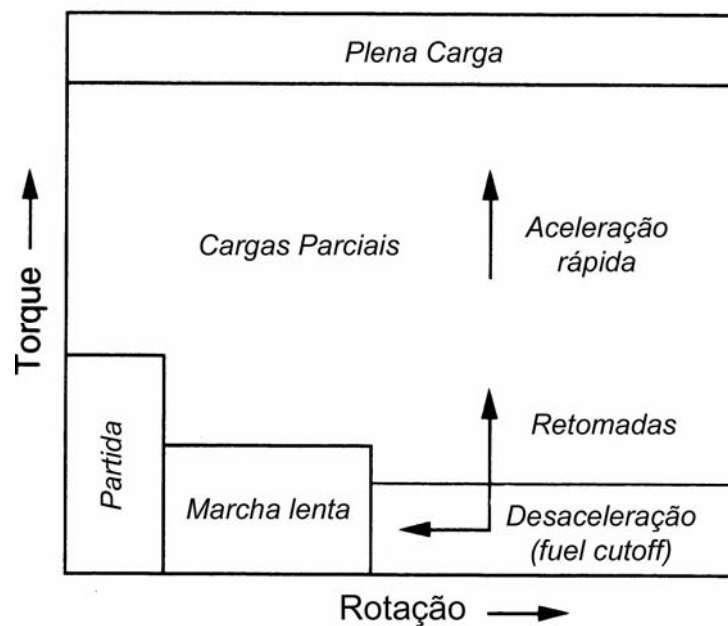


Figura 3.8 – Condições de operação de um MCI (Bauer, 1999).

3.4 Classificação dos sistemas de formação da mistura ar/combustível

O controle da quantidade de combustível introduzido no motor, depois de determinada direta ou indiretamente a quantidade mássica de ar admitida, garante a formação da mistura ar/combustível em todas as condições de operação dos MCI's. A evolução dos sistemas fluido-mecânicos apresentados por Adler (1998) mostra que os primeiros sistemas de injeção mecânica de combustível aplicados aos motores de ignição por centelha (SI) eram capazes de realizar o controle da quantidade de combustível em função da quantidade de ar admitido utilizando, para tal, dosadores mecânicos. Os sistemas mecânicos, que apresentaram superior eficiência em relação aos carburadores convencionais, se tornaram ineficientes principalmente sob a ótica do controle de emissões de poluentes durante sua vida útil. Por se tratar de dosadores mecânicos, variações relacionadas ao desgaste natural do motor necessitavam de correções e ajustes posteriores, além de maior susceptibilidade a falhas relacionadas aos componentes móveis desses dosadores (Adler *et al*, 1993).

O controle da quantidade de ar admitido pelos motores SI é realizado pela válvula borboleta. Nesses motores, a solicitação de carga demandada pelo condutor é realizada pela variação da posição angular da válvula borboleta que altera a quantidade mássica de ar admitida durante seu funcionamento. Para o sistema de gerenciamento eletrônico, a posição da válvula borboleta é de fundamental importância para as estratégias de marcha lenta, aceleração rápida, desaceleração e de economia de combustível (*fuel cutoff*). Normalmente, essa posição é monitorada através da variação de tensão de saída de um potenciômetro linear solidário ao seu eixo (Denton, 2000).

De forma a criar um compromisso entre o aumento da demanda de potência requerida aos MCI's e a garantia do controle de emissões promovida pela melhor atomização do combustível, os denominados Eletroinjetores (*fuel injector*) foram desenvolvidos baseados no princípio de funcionamento de eletroválvulas acionadas por solenóides. A Figura 3.9 apresenta diferentes tipos de eletroinjetores (a) e um eletroinjetor em corte (b) (Bauer, 1999).

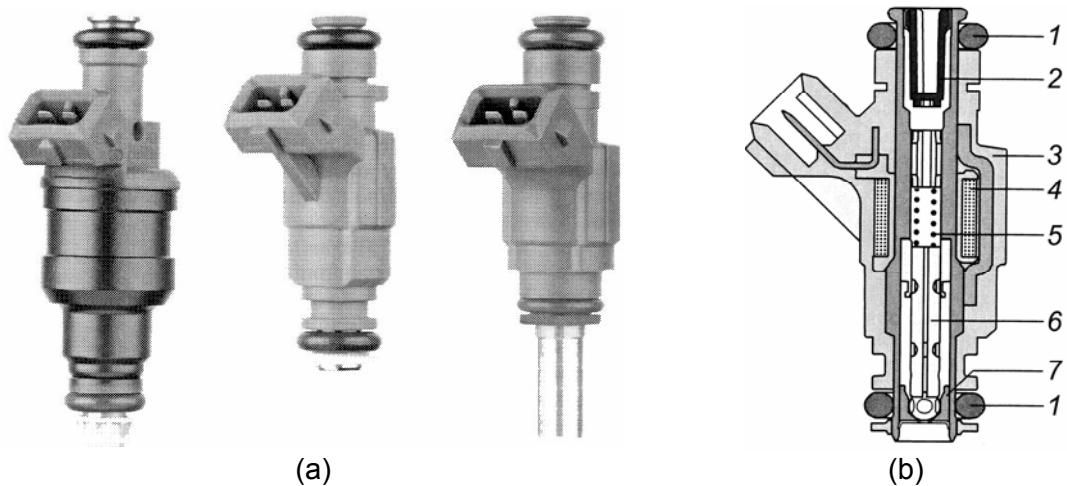


Figura 3.9 – Tipos de eletroinjetores (a) eletroinjetor em corte (b) (Bauer, 1999).

Esses componentes são atuadores capazes de controlar a quantidade de combustível presente em uma linha pressurizada através da modulação da largura de um pulso de tensão (*Pulse Width Modulation – PWM*). Em função da largura do pulso (*duty cycle*) aplicado à bobina de indução (4), o campo magnético gerado desloca a agulha (6) permitindo a passagem do combustível desde a entrada (1) até a válvula de vedação (7) montada na saída do eletroinjetor (8) (Bauer, 1999).

No instante em que a bobina de indução (4) é desenergizada, a mola (5) comprime novamente a agulha (6) contra a válvula de vedação (7), bloqueando a passagem do combustível. No momento da desenergização (*driver switch off*), ocorre o surgimento de uma tensão reversa nos terminais do eletroinjetor, induzindo na agulha (6) uma força no sentido de fechamento da válvula de vedação (7) que reduz o tempo de fechamento do eletroinjetor. A Figura 3.10 apresenta a forma de onda da tensão de acionamento aplicada ao eletroinjetor equivalente a 5,0 ms (t_{inj}) e a respectiva tensão reversa induzida no momento da desenergização (Mendes *et al*, 2004).

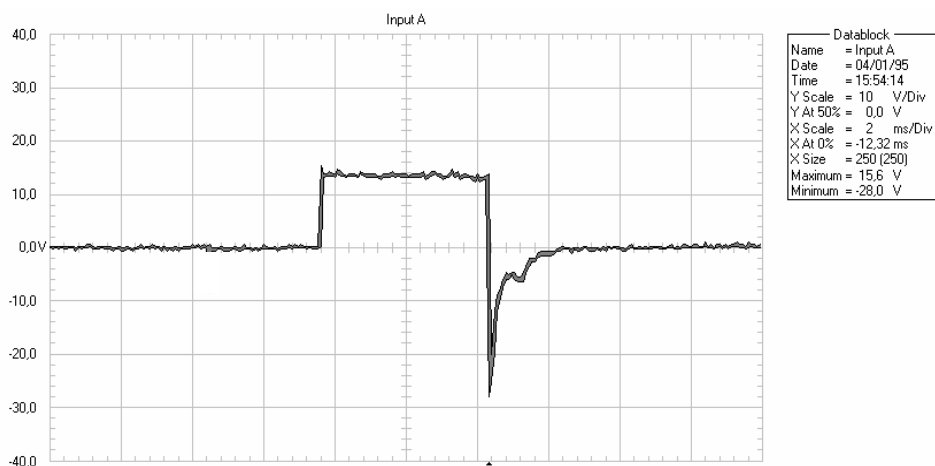


Figura 3.10 – Tensão de acionamento (5,0 ms) aplicada ao eletroinjetor (Mendes *et al*, 2004).

O tempo de injeção (*injection pulse width*) é o termo que define a largura do pulso, normalmente em milissegundos (ms), durante o qual o eletroinjeter permanece ligado e fornecendo combustível ao motor. Devido às dimensões reduzidas desses componentes e às inércias associadas, o controle da quantidade de combustível associado ao tempo de injeção pode ser realizado na ordem de 10^{-6} segundos (ou seja, μs) em sistemas de controle atuais. Dessa forma é possível controlar eletronicamente a quantidade de combustível introduzida no motor, sendo o tempo de injeção pré-estabelecido em mapas base e corrigido em função da massa de ar admitida pelo motor, da resposta dinâmica do eletroinjeter e de mapas de correção para condições como, por exemplo, de partida a frio e plena carga (Bauer, 1999; MoTeC, 2004).

Os principais fatores que limitam a definição do tempo máximo de injeção (*IJPU*) são a vazão máxima de combustível por milissegundo de acionamento e a rotação máxima de operação do motor. Deve-se observar que, à medida que a rotação do motor aumenta, o tempo total do ciclo do motor reduz de maneira proporcional. Supondo um motor convencional operando a 6000 RPM (100 Hz), o tempo necessário para realização de um ciclo completo de quatro tempos é da ordem de 20 ms, o que limita a utilização de eletroinjeteres com tempos de injeção nessa ordem. Caso a introdução da quantidade de combustível requerida pelo motor seja garantida em tempos de injeção próximos aos citados, o controle de formação da mistura ar/combustível deixa de ser representativo visto que, nessas condições, o eletroinjeter permanece aberto constantemente (MoTeC, 2004; Mendes *et al*, 2004).

Esse fenômeno ocorre em elevadas rotações e, principalmente em sistemas que operam segundo estratégias de injeção seqüencial e sincronizada, visto que a massa total de combustível utilizada em cada ciclo deve ser introduzida em um único instante de injeção. Esse fato requer, na maioria das vezes, a utilização de eletroinjeteres com maior vazão de combustível por milissegundo (ms) de tensão de abertura ou a adoção de maiores valores de pressão na linha principal de combustível (Mendes *et al*, 2004).

Os sistemas de injeção eletrônica de combustível podem ser classificados em função do número de eletroinjeteres aplicados ao motor, sua posição no sistema de admissão de ar e sua estratégia de funcionamento, sendo dividido nos grupos apresentados a seguir.

3.4.1 Sistema de Injeção Indireta Monoponto

Os sistemas classificados como Monoponto apresentam, independentemente do número de cilindros do motor, um único eletroinjetor posicionado na região anterior à válvula borboleta, sendo responsável pelo fornecimento de todo o combustível consumido pelo motor. Devido a sua posição, esse sistema é classificado de injeção indireta. Os sistemas de injeção direta de combustível não serão abordados neste trabalho por não fazerem parte do objetivo, apesar do sistema proposto possibilitar a sua utilização.

A cada ciclo de admissão realizado pelos cilindros do motor, esse componente realiza a injeção da quantidade de combustível necessária para a condição instantânea de operação do motor. Considerando um motor convencional de quatro tempos e de quatro cilindros, o sistema monoponto realiza duas injeções de combustível por volta completa do eixo de manivelas. Por essa razão, o eletroinjetor aplicado a esse sistema apresenta uma maior vazão de combustível por unidade de tempo de comando (tempo de injeção) e trabalha sempre no dobro da frequência do motor (rotação) (Adler, 1993).

A Figura 3.11-a apresenta a unidade de injeção de combustível do sistema de injeção monoponto *Mono-jetronic* (Robert Bosch GmbH) onde o combustível, pressurizado pela bomba elétrica, entra na parte superior do corpo de borboleta (4) através do orifício (5), sendo a pressão controlada por um regulador de pressão (1). Através das galerias de passagem, o combustível alimenta o eletroinjetor (3) que introduz o combustível na parte superior da válvula borboleta (8) e aspirado juntamente com o ar para o interior dos cilindros. Já a Figura 3.11-b apresenta um diagrama da posição do eletroinjetor para um MCI de 04 cilindros (Adler, 1993).

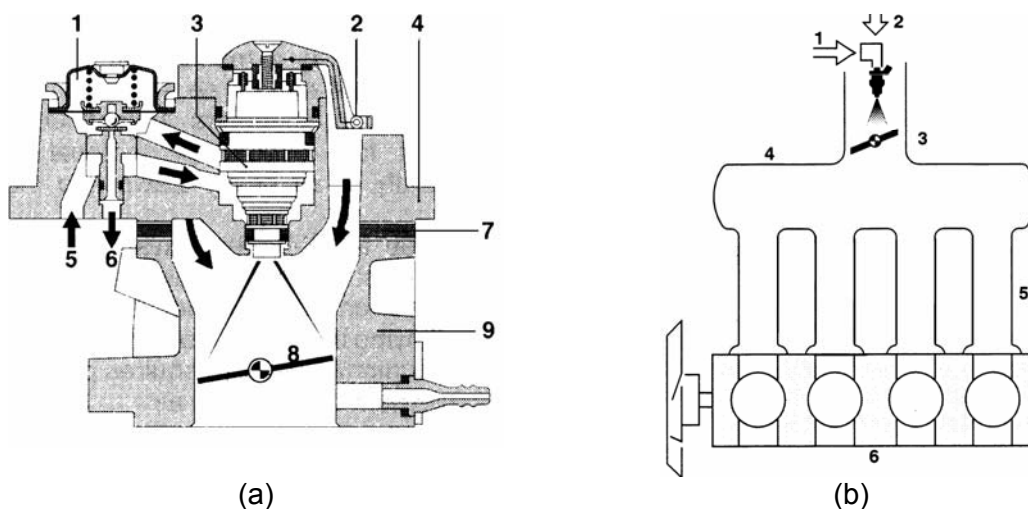


Figura 3.11 – Unidade *Mono-jetronic* (a) e posição do eletroinjetor (b) (Adler, 1993).

3.4.2 Sistema de Injeção Indireta Multiponto

Os sistemas de injeção indireta de combustível Multiponto apresentam um eletroinjetor posicionado no conduto de ar, na região anterior à válvula de admissão, em cada cilindro do motor. Nesses sistemas, o fornecimento de combustível é realizado de forma individual para cada cilindro com o objetivo de melhorar a atomização da mistura e reduzir o acúmulo de combustível nas paredes do coletor de admissão (Adler, 1988). A Figura 3.12 apresenta um diagrama da posição dos eletroinjetores em um sistema multiponto para motores de 04 cilindros (Bauer, 1999).

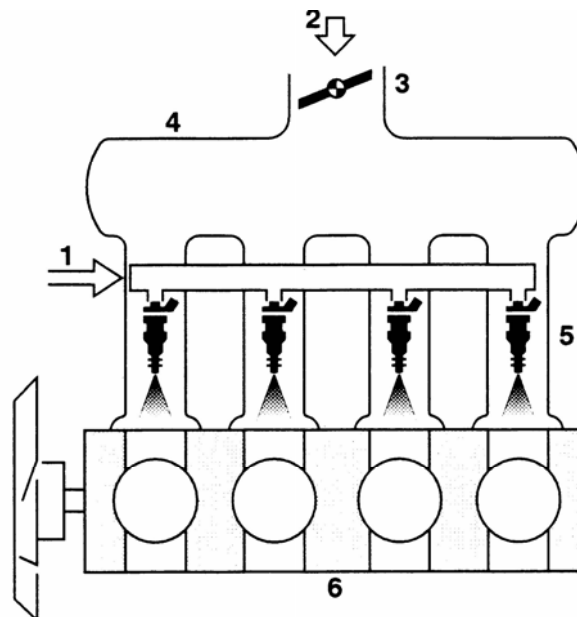


Figura 3.12 – Posição dos eletroinjetores em um motor de quatro cilindros (Bauer, 1999).

Diferentemente do Monoponto, o sistema Multiponto possibilita a introdução do combustível em diferentes condições de operação. Bauer (1999) classifica esses sistemas de acordo com a frequência de trabalho dos eletroinjetores em relação a rotação do motor, sendo:

- Sistema de injeção simultânea de combustível (*full group*);
- Sistema de injeção semi-sequencial (banco a banco);
- Sistema de injeção sequencial, sincronizada via sensor de fase;
- Sistema de injeção sequencial, sincronizada via software;

O sistema de injeção simultânea de combustível (*full group*) possui a mesma característica do sistema monoponto onde, a cada ciclo de admissão realizado pelos cilindros do motor, o sistema realiza a injeção da quantidade de combustível necessária para a condição instantânea de operação do motor. A diferença entre esses sistemas está no número de eletroinjetores e na atomização da mistura ar/combustível.

A principal desvantagem do sistema *full group* é a injeção de combustível na entrada dos cilindros independente do tempo em que eles se encontram. Isto significa que a quantidade de combustível introduzida por cilindro a cada ciclo de admissão é dividida em 4 partes, sendo apenas uma delas introduzida no tempo de admissão.

Por outro lado, o sistema de injeção semi-seqüencial (banco a banco) parte do princípio de que em motores com número par de cilindros (≥ 04 cilindros) apresentam pares de cilindros na mesma posição durante os ciclos, porém em tempos diferentes. Essa característica permite que esse sistema divida a quantidade de combustível introduzida no cilindro em 2 partes, sendo uma delas introduzida no tempo de admissão. A vantagem em relação ao sistema *full group* é a redução pela metade na frequência de atuação dos eletroinjetores e conseqüentemente em suas características construtivas.

Já o sistema de Injeção seqüencial sincronizada permite o reconhecimento do tempo de operação do motor, realizando a introdução do combustível em uma única injeção durante a admissão. Essa característica permite melhorar a atomização da mistura ar/combustível, reduzindo o consumo de combustível e as emissões de poluentes, além de minimizar a frequência de atuação dos eletroinjetores. Nesses sistemas, o tempo de cada cilindro é reconhecido de duas maneiras. A primeira delas utiliza um sensor indutivo, denominado sensor de fase ou de sincronismo, que informa ao sistema de injeção a posição do eixo de comando de válvulas em relação ao eixo de manivelas. O cruzamento dessas informações possibilita a determinação do tempo do 1º cilindro e conseqüentemente dos demais cilindros através da seqüência de ignição.

A outra possibilidade é a realização do sincronismo do motor via *software*. Esse sistema de injeção seqüencial sincronizada realiza a identificação do tempo de cada cilindro do motor, após a sua partida utilizando uma estratégia semi-seqüencial ou *full group*. Com o motor em funcionamento, esse sistema inibe a injeção de combustível em instantes específicos e, em função da queda de rotação causada, identifica o tempo de cada cilindro. Apesar de reduzir o custo total do sistema de injeção de combustível, identificação do sincronismo via *software* apresenta níveis de emissão de poluentes maiores que os sistemas com sensor de fase, principalmente durante a partida a frio dos motores (Ives, 1997).

3.5 Ignição da mistura ar/combustível

Como abordado anteriormente, o processo de admissão nos motores de combustão interna de ignição por centelha é caracterizado pela quantidade de mistura ar/combustível, denominada de fluido de trabalho, inserida ou bombeada para o interior dos seus cilindros. Finalizado o processo de admissão com o movimento descendente do pistão, o sistema biela-manivela inicia a compressão do fluido de trabalho admitido até o instante da introdução da centelha elétrica (energia de ativação) que promove o início da combustão dessa mistura. Essa energia de ativação varia de 0,2 miliJoules (mJ) para iniciar a combustão de uma mistura ar/combustível estequiométrica ($\lambda = 1,00$) até 3,0 mJ para misturas ricas ou pobres (Carvalho, 2005; Bauer, 1999; Adler, 1988).

O sistema de ignição é responsável pelo fornecimento dessa energia desde a sua geração até o controle do instante de sua introdução no cilindro através da vela de ignição. É baseado no princípio de elevação da tensão fornecida pela bateria (12,0 a 14,0 volts) utilizando um transformador elevador de tensão que, na indústria automotiva, é denominada bobina de ignição (*ignition coil*). A Figura 3.13 apresenta em corte uma bobina de ignição convencional.

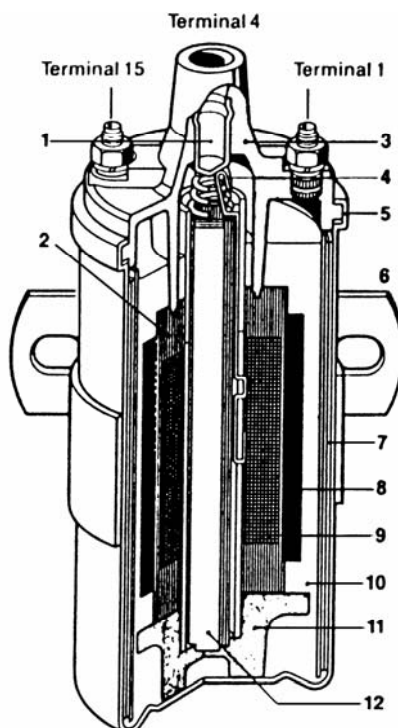


Figura 3.13 – Bobina de ignição convencional em corte (Adler, 1988).

A bobina de ignição, como mostra a Figura 3.13, é formada por dois conjuntos de espiras concêntricas, definidas como enrolamento primário (8) e enrolamento

secundário (9) com um núcleo central de aço (12), revestidas por um material isolante (11) e encapsuladas em uma carcaça metálica (6).

O enrolamento primário é permanentemente alimentado no terminal +15 pelo pólo positivo da bateria, no instante da energização do sistema (*key on* - comutador de ignição). Por meio de diferentes dispositivos, promove-se a circulação de corrente nesse enrolamento através da conexão do terminal -1 ao pólo negativo da bateria (massa). A energia fornecida pela bobina de ignição (W_{Sp}), através do terminal 4, é diretamente proporcional à Indutância do enrolamento primário (L_1) e à intensidade da corrente (i_1) que circula nesse enrolamento no instante em que o terminal -1 da bobina é desconectado do pólo negativo da bateria, de acordo com a equação (Adler, 1988):

$$W_{Sp} = \frac{L_1 \cdot (i_1)^2}{2} \quad (3.16)$$

A energia é transferida do terminal 4 da bobina até a vela de ignição através de cabos capazes de isolar tensões da ordem de 40 kV (Denton, 2000). Como o corpo do eletrodo central da vela de ignição é revestido por material cerâmico isolante, a tensão induzida no secundário é introduzida no cilindro sob a forma de uma centelha de ignição (*spark ignition*). Essa centelha é formada pelo arco elétrico estabelecido entre a extremidade exposta do eletrodo e a carcaça da vela. A distância entre a extremidade do eletrodo e a carcaça da vela (*gap*) influencia diretamente na tensão induzida no secundário, uma vez que altera a resistência dielétrica do interior da câmara de combustão. Baeta *et al* (2005) mostra que não só a relação ar/combustível real (A/F_r) como o tipo de combustível utilizado e a relação volumétrica de compressão (r_c) alteram essa característica.

Pelo fato da intensidade da corrente (i_1) interferir diretamente na energia fornecida pela bobina de ignição, o tempo que o enrolamento primário permanece energizado é de grande importância para o sistema de ignição, sendo definido como tempo de permanência (*Dwell time* - D_t). O tempo de permanência ideal (D_{ti}) deve ser alcançado de forma a maximizar a corrente i_1 sem que ocorra a saturação da mesma, evitando assim o aquecimento excessivo do enrolamento primário e a redução na vida útil da bobina de ignição (Denton, 2000).

A Figura 3.14 apresenta diferentes condições de operação de uma bobina de ignição. Na Figura 3.14-a, o tempo de permanência é suficiente para maximizar a

corrente i_1 ($D_t = D_{ti}$). Já na Figura 3.14-b a condição ideal não é atingida ($D_t < D_{ti}$) e na Figura 3.14-c, D_t ultrapassa o valor ideal ($D_t > D_{ti}$) ocorrendo a saturação da bobina.

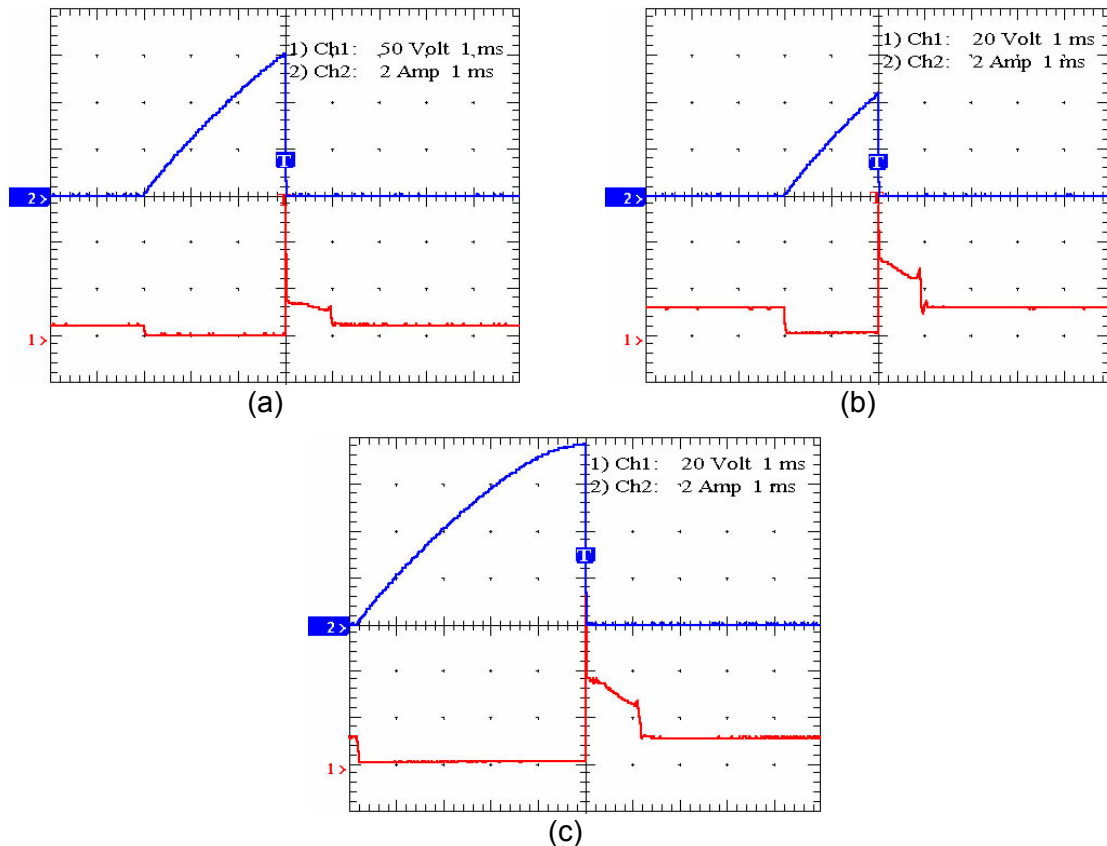


Figura 3.14 – Diferentes condições de saturação no primário da bobina.

Os diferentes dispositivos que promovem a circulação da corrente i_1 no primário da bobina, através da conexão do terminal -1 ao negativo da bateria, evoluíram dos sistemas mecânicos, como exemplo o platinado e o distribuidor, para sistemas de alto desempenho que utilizam bobinas individuais para cada cilindro, controladas eletronicamente. Recomenda-se, aos interessados, uma consulta às referências apresentadas por Adler (1988), Ribbens (1998) e Denton (2000) para o bom entendimento dessa evolução que, de forma similar aos sistemas de controle da mistura ar/combustível, foi viabilizada pela aplicação de sistemas eletrônicos embarcados. A busca constante pelo aumento da confiabilidade do sistema de ignição tornou a utilização de contatos mecânicos (platinado) inviável devido à sua alta susceptibilidade ao ciclo de trabalho, a regulagens externas e à vida útil reduzida quando comparada ao veículo.

Ives (1997) cita ainda que essa evolução, associada ao crescimento das indústrias de componentes eletrônicos aumentou a confiabilidade desses sistemas, promoveu uma redução significativa dos custos de produção e possibilitou o aumento de eficiência no controle de emissões de poluentes e do rendimento dos MCI's.

Outro parâmetro controlado pelos sistemas de ignição é o instante de introdução da centelha de ignição na câmara de combustão. Conhecido como ângulo de ignição (*ignition time* - α_z), esse parâmetro é medido em graus do eixo de manivelas em relação ao ponto morto superior (PMS), durante o tempo de compressão. Esse controle visa garantir que o ponto de maior pressão no interior da câmara de combustão ocorra instantes após o pistão atingir o PMS, de modo que a maior parte da pressão gerada pela combustão seja convertida em trabalho útil (Braga, 2004).

Para isso é necessário que a centelha seja introduzida antes do PMS, compensando principalmente o tempo gasto para a combustão da mistura ar/combustível e sua velocidade de propagação no interior da câmara. Como a centelha é introduzida antes do PMS (APMS), caracteriza-se o ângulo de ignição como avanço de ignição. Na maioria dos MCI's, o aumento do avanço de ignição está diretamente ligado ao aumento da rotação e redução da carga, sendo o conjunto desses valores definido como mapa de avanço de ignição.

A Figura 3.15 apresenta a influência de diferentes ângulos de avanço de ignição na pressão interna do cilindro (Bauer, 1999). Mostra ainda que o aumento do avanço de ignição, representado pelos símbolos Z_x , promove uma variação crescente na pressão e, conseqüentemente, na pressão no final da compressão, aumentando a potência útil desenvolvida pelos MCI's. O aumento da potência através da otimização do ângulo de avanço de ignição, para uma dada relação ar/combustível, é limitado pelo efeito da pré-ignição da mistura ar/combustível nos cilindros do motor, indicada pela Curva 2 da Figura 3.15, sendo esse fenômeno associado ao aumento do ângulo de avanço de ignição (Z_b), para um determinado combustível.

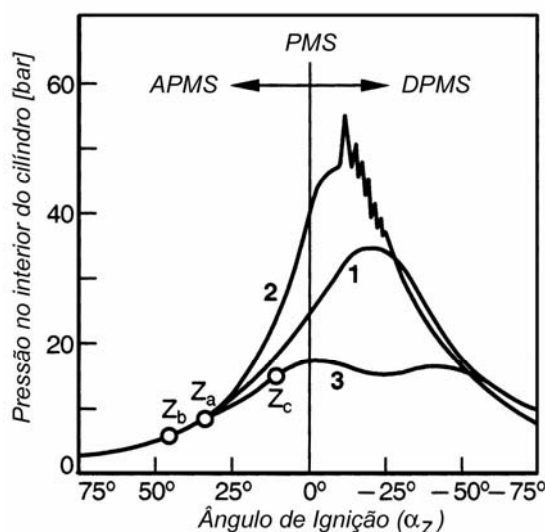


Figura 3.15 – Influência do avanço de ignição na pressão do cilindro (Bauer, 1999).

A combustão controlada ocorre quando a queima da mistura ar/combustível é iniciada pela centelha, e se propaga do ponto de ignição até as paredes do cilindro (curva 1 da Figura 3.15). A pré-ignição ocorre quando a temperatura e/ou a pressão na mistura não-queimada excede um valor crítico, causando sua auto-ignição em pontos diferentes do inicial. Isto produz ondas de choque que se propagam em velocidades superiores à velocidade sônica do meio, e na direção contrária à propagação normal, gerando picos de pressão no cilindro, como mostra a curva 2 da Figura 3.15 (Braga, 2004; Baeta, 2006).

Essa colisão gera um ruído característico em frequências que dependem do diâmetro do cilindro, da geometria da câmara e de sua temperatura. Como ocorre em frequências características e, devido ao isolamento acústico do vão-motor, esse fenômeno nem sempre é percebido pelo condutor e promove danos progressivos e irreversíveis aos componentes dos MCI's.

Uma das formas de detecção desse fenômeno é a medição direta da pressão no cilindro durante o ciclo (Figura 3.15). Normalmente, é caracterizado pelas oscilações de pressão causadas pelo choque de diferentes frentes de propagação de chama. Porém, a medição direta exige a utilização de equipamentos específicos, devido à sua natureza intrusiva no cilindro, sendo essa a principal desvantagem (Baeta, 2006).

Outro método, classificado como indireto, utiliza um acelerômetro fixado à estrutura do motor para monitorar a ocorrência do fenômeno de detonação. Esse método não necessita de um acesso ao cilindro para a realização da medição. Podem ser utilizados um ou vários acelerômetros, dependendo da estratégia de detecção. Além disso, os sensores possuem um custo mais reduzido, já que trabalham em ambiente com condições menos rigorosas que o interior da câmara de combustão (Pujatti *et al*, 2004).

Sua principal desvantagem é a baixa relação sinal ruído do sinal fornecido pelo sensor, devido à contaminação por várias fontes de vibração, como, por exemplo, válvulas e eixos. Esse efeito é evidenciado com o aumento da rotação e das vibrações mecânicas, exigindo um tratamento mais rigoroso do sinal medido. Braga (2004) apresenta os dois tipos de sensores mais utilizados por esse método, classificando-os como ressonantes e de banda larga. Os ressonantes são sensores capazes de amplificar, mecanicamente ou eletronicamente, vibrações em uma determinada faixa de frequências, correspondente à faixa excitada pela detonação. Este método é limitado já que cada tipo de motor exige um sensor diferente, devido a variações nas frequências características.

Segundo Braga (2004), os sensores de banda larga não possuem picos de ressonância na faixa de operação do sistema de identificação. Deste modo um sensor trabalha com a mesma eficiência para qualquer configuração de motor, aumentando a flexibilidade do sistema com um mínimo impacto em seu custo. Porém um processamento posterior é necessário para que a frequência fundamental seja identificada no sinal. Apresenta ainda uma metodologia de identificação desse fenômeno em motores de combustão interna de ignição por centelha utilizando um método de detecção de detonação alternativo aos filtros passa faixa analógicos ou digitais, ou técnicas de FFT (*Fast Fourier Transform*), sendo baseado no condicionamento do sinal de vibração captados na estrutura do motor através da *Discrete Fourier Transform* (DFT) em determinados pontos do espectro de frequências.

Os diferentes sistemas de ignição da mistura ar/combustível podem ser classificados de acordo com a Tabela III.3, que apresenta de forma sucinta uma evolução dos diferentes sistemas existentes no mercado automotivo e o princípio de funcionamento de cada uma de suas funções básicas. Observa-se uma substituição gradativa dos componentes mecânicos por eletrônicos nas principais funções desses sistemas.

Tabela III.3 – Sistemas de ignição existentes no mercado.

Função:	Sistemas de Ignição:			
	Bobina + Platinado + Distribuidor	Ignição transistorizada + Distribuidor	Ignição Mapeada + Distribuidor	Ignição Mapeada + Bobinas estáticas (<i>Distribuidor-less</i>)
Geração do tempo de permanência	Mecânico	Eletrônico	Eletrônico	Eletrônico
Varição do avanço de ignição	Mecânico	Mecânico	Eletrônico	Eletrônico
Princípio de geração da Alta Tensão (kV)	Indutivo	Indutivo	Indutivo	Indutivo
Distribuição da centelha entre os cilindros	Mecânico	Mecânico	Mecânico	Eletrônico
Sistema de chaveamento de Alta Tensão (kV)	Mecânico	Eletrônico	Eletrônico	Eletrônico

3.5.1 Sistemas mecânicos de ignição

Os sistemas de ignição mecânicos são considerados como os primeiros sistemas aplicados a motores de quatro tempos capazes de controlar o avanço de ignição em função da carga (pressão do coletor de admissão) e de sua rotação. Como mostrado na Tabela III.3, estes sistemas apresentam as funções básicas executadas através de componentes mecânicos, mostrados na Figura 3.16.

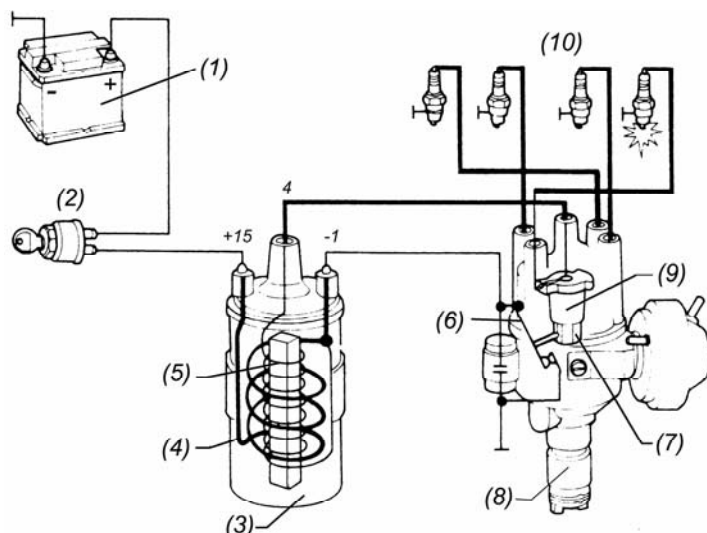


Figura 3.16 – Componentes do sistema de ignição mecânica (Denton, 2000).

Nos sistemas mecânicos, a bobina de ignição (3) recebe tensão no terminal +15, proveniente do pólo positivo da bateria (1) após o fechamento da chave de ignição (2). A corrente i_1 circula no enrolamento primário da bobina (4) no instante em que o platinado (6) conecta o terminal -1 da bobina ao pólo negativo da bateria (massa). O acionamento do platinado (6) é realizado por um came (7) instalado no eixo principal do distribuidor (8). A cada acionamento do came (7), o platinado (6) liga o primário da bobina durante um intervalo de tempo (*Dwell time*) e, no instante que é desconectado, promove uma variação da tensão no primário que induz uma tensão no enrolamento secundário (5) proporcional à relação de espiras entre secundário e primário. Esse pico de tensão é transmitido desde a bobina (3) até o distribuidor (8) que, em função da posição do rotor (9) é conduzido à vela de ignição (10) do cilindro que termina o tempo de compressão.

Os sistemas de ignição mecânicos foram amplamente aplicados na indústria automotiva brasileira até meados da década de 80. A simplicidade construtiva e o número reduzido de componentes são suas principais vantagens. Por outro lado, sendo o platinado um contato mecânico, possui vida útil reduzida e alta susceptibilidade a diferentes métodos de regulagem. Outra desvantagem é o fato do tempo de permanência ser gerado por meio de sistema mecânico tipo came-seguidor sincronizado com o eixo de manivelas. À medida que a velocidade do motor aumenta, esse tempo tende a se contrair influenciando diretamente na energia W_{Sp} (Equação 3.16) induzida no secundário da bobina, sendo esse fator inerente a sua forma construtiva.

O controle do avanço de ignição é realizado por meio de vácuo e de um mecanismo centrífugo. O sistema a vácuo é composto por duas câmaras seladas e

divididas por um diafragma e um êmbolo, sendo uma delas conectada ao coletor de admissão do motor e a outra aberta para a atmosfera. Durante o funcionamento normal do motor em regime de marcha lenta, a depressão no coletor causada pelo fechamento da válvula borboleta desloca o êmbolo e altera a posição da mesa de fixação do platinado, diminuindo o avanço de ignição. A variação da condição de funcionamento do motor através da válvula borboleta promove uma alteração na pressão do coletor e, conseqüentemente, no avanço de ignição.

Já o sistema centrífugo utiliza a rotação como parâmetro de referência para a variação do ângulo de avanço de ignição. À medida que o motor aumenta sua rotação, dois braços oscilantes montados na parte interna do distribuidor variam suas posições no sentido de movimentar a mesa de fixação do platinado aumentando o avanço de ignição. A Tabela III.4 apresenta, a título de exemplo, a curva de avanço de referência para ajuste dos parâmetros de avanço a vácuo e centrífugo de um distribuidor convencional.

Tabela III.4 – Curva de avanço de um distribuidor convencional (VW, 1996).

Sistemas de Ignição Bosch 9.230.087.089			
Avanço a vácuo		Avanço centrífugo	
<i>Pressão [mmHg]</i>	<i>Ângulo de avanço (APMS)</i>	<i>Rotação [RPM]</i>	<i>Ângulo de avanço (APMS)</i>
0 a 80	0	1300	0 a 4
100	0 a 3	2500	9 a 13
190	6 a 10	4000	16 a 20
Acima de 270	11 a 15	-	-

Pode-se observar a partir da Tabela III.4 que a forma de atuação desses sistemas não possui a característica pontual de calibração para cada condição de operação do MCI. Pelo fato da otimização do ângulo de avanço ser realizada através de extrapolação linear de alguns pontos obtidos durante a calibração, este não é capaz de maximizar o rendimento do MCI em todas as condições de funcionamento. Na tentativa de melhorar o desempenho e em função do advento da indústria eletrônica, evoluiu-se para os sistemas de ignição transistorizada que possuem características de distribuição da centelha e de controle do avanço de ignição similares aos apresentados. A principal diferença está no controle do chaveamento do primário da bobina que utiliza um transistor de potência em substituição ao platinado. Essa substituição visa principalmente o aumento da vida útil, a redução da susceptibilidade a regulagens externas e a manutenção do tempo de permanência (*Dwell time*) dentro do previsto para correto funcionamento da bobina de ignição. Comercialmente são denominados de sistemas de ignição eletrônica.

3.5.2 Sistema de ignição eletrônica mapeada

A primeira evolução dos sistemas de ignição foi a substituição do platinado por um *driver* transistorizado, porém, esses sistemas não eram capazes de maximizar o rendimento do MCI em todas as condições de funcionamento. Visando a substituição dos sistemas de controle de avanço mecânicos (a vácuo e centrífugo) foram desenvolvidos os sistemas de ignição eletrônica mapeada. Denton (2000) mostra que os primeiros sistemas apresentavam uma incerteza no controle do avanço de até $\pm 1,8^\circ$, enquanto os sistemas compostos por distribuidores mecânicos apresentavam até $\pm 8,0^\circ$ de incerteza.

Nesses sistemas, a curva de avanço de ignição dos distribuidores convencionais foi substituída por um sistema de controle eletrônico capaz de reconhecer a condição instantânea de funcionamento do MCI e, em função de dados obtidos durante a calibração do motor em bancada, impostar o melhor ângulo de avanço de ignição para essa condição. A Figura 3.17 apresenta as curvas de avanço de ignição obtido à plena carga utilizando um sistema convencional (a) e um sistema de ignição mapeada (b).

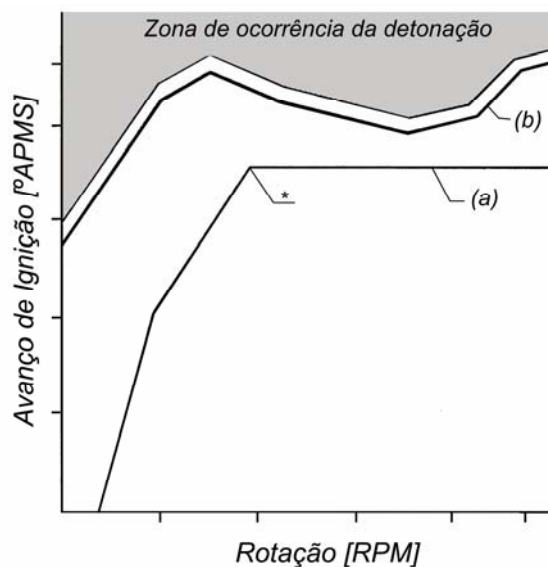


Figura 3.17 – Avanço de ignição obtido por sistemas distintos (Denton, 2000).

A Figura 3.17 mostra que o sistema de ignição mapeada (b) permite a imposição de diferentes valores de avanço de ignição em toda a faixa de rotação. Isso significa uma otimização do ângulo de avanço sendo o parâmetro limitante a ocorrência do fenômeno de detonação (faixa escura do gráfico) ou o alcance do maior torque observado durante o ensaio dinamométrico (*Maximum Brake Torque – MBT*). Também possibilita a visualização da variação linear do ângulo de avanço em faixas de rotação distintas até o ponto onde o valor de avanço permanece fixo (*), independente do aumento da rotação.

Aqui se introduz o conceito de mapa de avanço de ignição otimizado em substituição à curva de avanço de um distribuidor convencional (Tabela III.4). Esse mapa possui forma tridimensional (3D), composto por diferentes curvas de avanço de ignição em função da rotação do motor, sendo cada uma das curvas obtidas em uma condição de carga fixa. O conceito de mapa de avanço de ignição, bem como a forma de interpolação dos pontos, serão abordados de forma mais aprofundada pelo Item 3.9 deste capítulo. A Figura 3.18 apresenta mapas de avanço de ignição sendo (a) o mapa de avanço de um sistema mecânico convencional e (b) pelo sistema de ignição mapeada.

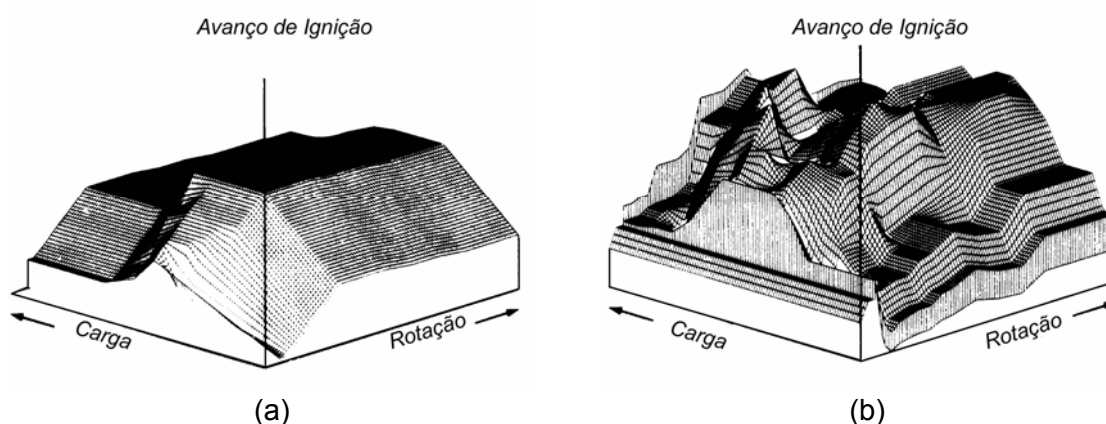


Figura 3.18 – Mapas de avanço de ignição (Denton, 2000).

A condição de funcionamento do motor é determinada por meio de sensores específicos, onde em sua maioria são utilizados sensores indutivos para a determinação da rotação/posição do eixo virabrequim e transdutores compostos por extensômetros aplicados sobre um diafragma de silício (*strain gauge MAP sensor*) capazes de medir a pressão absoluta no coletor de admissão (Ribbens, 1998). Através da aquisição dos sinais de rotação e carga do motor, a central eletrônica de controle determina, em função do mapa de avanço alocado em uma memória interna, o ângulo ideal de avanço de ignição para a condição lida e realiza o chaveamento da bobina em função desse parâmetro.

No intuito de otimizar o funcionamento desses sistemas, existem ainda mapas complementares de correção do avanço em função da temperatura do motor e do ar admitido. Pode-se ainda realizar o controle do avanço em malha fechada através da detecção do fenômeno da detonação. Através de um acelerômetro instalado no bloco do motor, o sistema é capaz de detectar as frequências características da detonação que se propagam no bloco do motor, realimentando o sistema de controle. Quando esse fenômeno é detectado, a central eletrônica adota estratégias de redução do avanço no intuito de extingui-lo e de aumentar a vida útil do conjunto.

3.5.3 Sistemas de Ignição sem distribuidor (*Distributorless*)

A evolução dos sistemas de ignição mapeada possibilitou a substituição de componentes mecânicos de chaveamento da bobina e de controle do avanço de ignição por sistemas eletrônicos. A remoção do distribuidor, cuja principal função é de direcionar a centelha proveniente da bobina para o cilindro em fase final de compressão, foi possível através da introdução do conceito de bobinas estáticas, conhecido como sistema de ignição banco a banco, ou da utilização de uma bobina exclusiva para cada cilindro do motor definido como sistema de ignição sincronizado.

3.5.3.1 Sistema banco a banco

A bobina estática é uma variação da bobina de ignição convencional (Fig. 3.13), onde a principal diferença está na conexão dos enrolamentos primário e secundário. Nas bobinas convencionais, o primário e o secundário são conectados ao terminal -1 , sendo esse ponto a referência tanto da tensão do primário quanto do secundário, como mostra a Figura 3.19-a. Nas bobinas estáticas (Figura 3.19-b), o enrolamento primário é independente do secundário, sendo as extremidades do secundário conectadas respectivamente às velas de ignição dos cilindros (4a e 4b) que se encontram sincronizados (posição e sentido de deslocamento) pelo virabrequim (cilindros gêmeos).

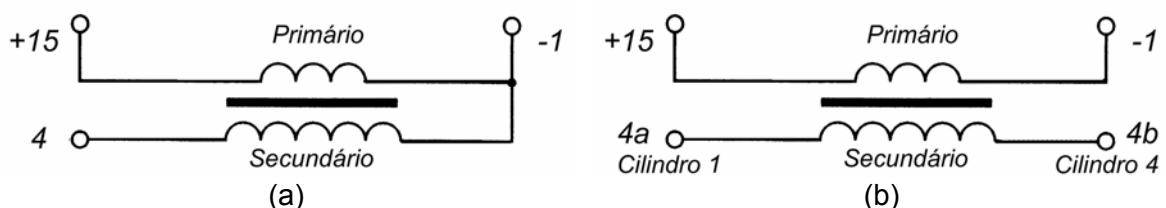


Figura 3.19 – Bobina de ignição convencional (a), Bobina estática (b) (Bauer, 1999).

O princípio de funcionamento das bobinas estáticas é baseado no conceito de centelha perdida. Como o secundário dessas bobinas não é fisicamente conectado ao terminal -1 do primário, a tensão induzida pode estabelecer um arco elétrico nas velas de ignição de ambos os cilindros gêmeos.

Denton (2000) afirma que, pelo fato da rigidez dielétrica do interior do cilindro em compressão ser menor que a do cilindro em exaustão, o arco elétrico será estabelecido preferencialmente na câmara de combustão que estiver preenchida pela mistura ar/combustível em compressão, iniciando sua combustão. Em relação ao cilindro

em compressão, a rigidez dielétrica do cilindro em descarga é maior, favorecendo o processo de ignição no cilindro desejado. A grande vantagem de se aplicar bobinas estáticas na formação da centelha de ignição é a remoção completa do distribuidor, tornando o sistema mais robusto e menos susceptível a fugas de centelha. Isso pode ocorrer no distribuidor devido à presença do rotor que, devido à necessidade de rotação, não pode estar fisicamente ligado ao cabo de vela como ocorre nos sistemas “*Distribuidorless*”, onde os terminais de alta tensão das bobinas são permanentemente conectados às velas de ignição.

Por outro lado, existem desvantagens nessa aplicação. A primeira delas é a necessidade de instalação de uma bobina estática para cada par de cilindros do motor, o que pode elevar o custo desses sistemas. Existe também uma restrição à aplicação desse sistema a motores que possuem, no mínimo, um ou mais pares de cilindros. Outra desvantagem que limita a sua utilização é o fato de que, devido ao princípio de funcionamento em centelha perdida, uma parte da energia contida na centelha pode ser dissipada no cilindro em exaustão. Dependendo ainda do ângulo de cruzamento de válvulas, do avanço de ignição e da relação ar/combustível, a centelha perdida pode ignitar a mistura no início do tempo de admissão, causando danos ao sistema de aspiração devido à combustão no coletor.

3.5.3.2 Sistema de ignição sincronizado

Os sistemas de ignição sincronizados são caracterizados pela utilização de uma bobina exclusiva para cada cilindro do motor. A característica de sincronismo deve-se ao fato do sistema de controle de ignição induzir a centelha apenas na bobina do cilindro no final do tempo de compressão. De um modo geral, são associados aos sistemas de formação da mistura ar/combustível seqüenciais sincronizados e utilizam as mesmas estratégias para identificação do tempo de cada cilindro (*software/hardware*). As bobinas individuais utilizadas são unidades compactas, normalmente instaladas na parte superior das velas de ignição, que minimizam os efeitos causados por fugas de centelha nos cabos de vela e também problemas de conexão elétrica.

A Figura 3.20-a apresenta uma bobina individual, aplicada à família de motores do veículo Marea fabricado pela FIAT Automóveis S.A. Já a Figura 3.20-b, apresenta um diagrama esquemático da disposição dos componentes internos desse sistema.

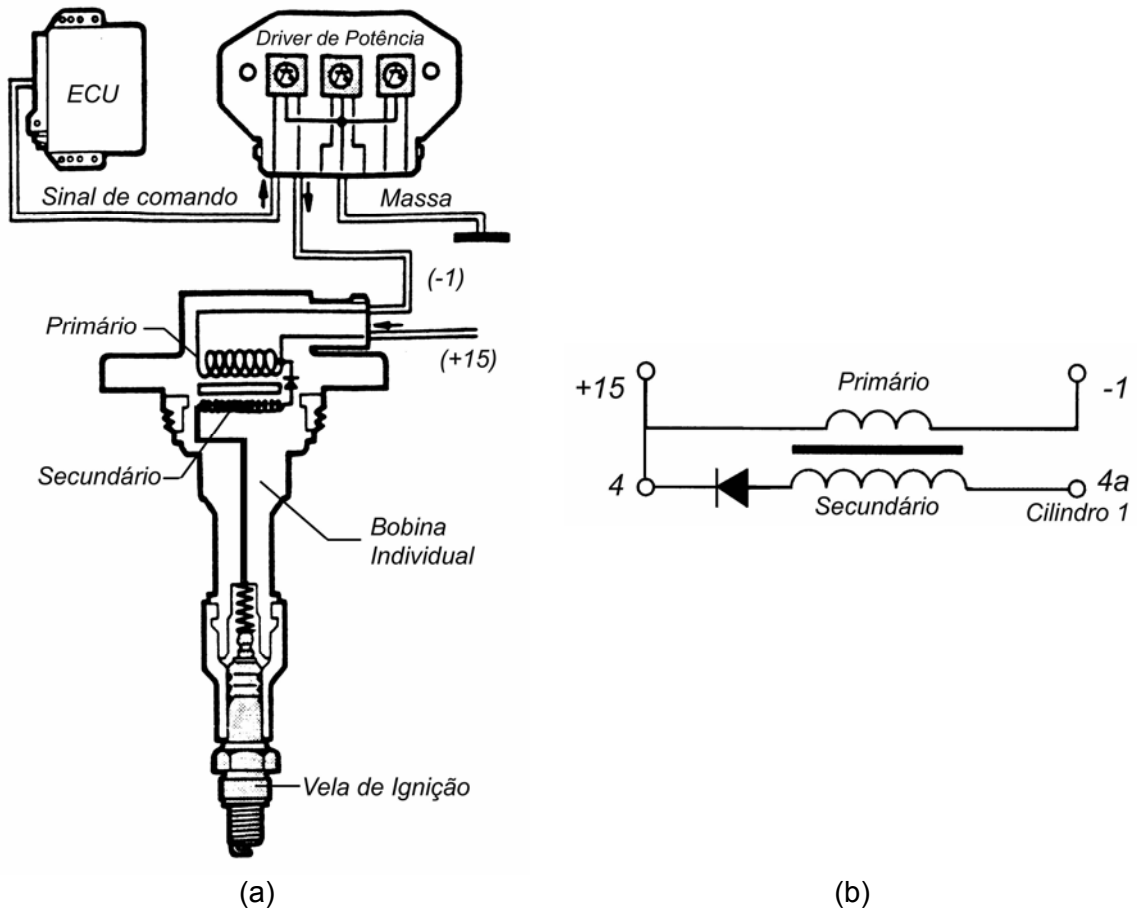


Figura 3.20 – Bobina de ignição individual (Denton, 2000).

Uma das vantagens da “individualização” da distribuição da centelha é a possibilidade de controlar a detonação somente no cilindro que o apresentar esse fenômeno, minimizando a influência da redução do avanço de ignição no desempenho do motor. Outra vantagem é a possibilidade de controle da ignição dos MCI’s independente do número e da disposição dos seus cilindros, principalmente para números ímpares.

A principal desvantagem é o custo da aplicação desse sistema e o desenvolvimento do *software* do controle, o que restringe a sua aplicação em escala aos veículos de luxo e/ou de alto desempenho (Denton, 2000).

3.6 Controle da mistura ar/combustível

Os sistemas eletrônicos de controle representam um papel vital no avanço da engenharia e da ciência. Além dos avanços no controle de veículos espaciais, pilotagem de aviões e robótica, os sistemas de controle representam uma parte de grande importância nos modernos processos industriais e de fabricação (Ogata, 1993). De forma similar, a utilização desses sistemas nos motores de combustão interna é crescente, visando principalmente o aumento do seu rendimento e o controle das emissões de poluentes. Isso significa realizar o controle da mistura ar/combustível por meio de sistemas eletrônicos dedicados para tal função. Bauer (1998) cita que os primeiros sistemas de controle eletrônicos da mistura ar/combustível eram de natureza analógica.

Segundo Åström e Hägglund (1995), os controladores analógicos são implementados através de comparadores de sinais elétricos como tensão, corrente, pulsos, sendo os circuitos de controle formados por amplificadores operacionais. De acordo com cada necessidade, diferentes configurações de amplificadores operacionais formam o tipo de controle desejado, desde controladores liga-desliga até controladores mais versáteis. Ozkul (1996) mostra que esse tipo de controle ainda é utilizado em grande escala na indústria devido a sua elevada confiabilidade e robustez. Um dos inconvenientes desse tipo de controlador é a sua concepção através de componentes eletrônicos discretos, o que normalmente é limitada em função da gama de valores dos componentes oferecidos pelo mercado, sendo esse um fator limitante para a projetista durante o desenvolvimento (Åström e Hägglund, 1996).

Atualmente, a utilização de microprocessadores no desenvolvimento de sistemas de controle digitais facilitou a sua implementação, porém os procedimentos utilizados para essa função não são amplamente relatados na literatura. Ribbens (1998) apresenta algumas funções de transferência utilizadas na implementação de sistemas digitais de controle da mistura ar/combustível. Vários tópicos devem ser considerados com relação a implementações de sistemas de controle digitais. Os mais importantes são a amostragem, a discretização e a quantificação dos parâmetros no tempo (Auslander *et al*, 1995). As ações de controle desenvolvidas por controladores digitais são baseadas nos valores do processo produzidos em tempos discretos, denominado período de amostragem. Em um sistema de aquisição de dados é desejável que o período de amostragem h não sofra variações durante a operação do controlador. A variação do período de amostragem introduz alguns fenômenos inesperados que devem ser levados em conta na implementação de um controlador digital.

Nos motores de combustão interna em especial, essa variação está associada principalmente à dinâmica que envolve o seu funcionamento. A grande faixa de rotação que um MCI abrange gera alguns inconvenientes ao sistema de controle, principalmente pela variação na velocidade do motor, na qualidade da combustão a cada ciclo e nos sistemas que operam em malha fechada (*closed-loop control*), ao atraso de tempo entre a ocorrência do fenômeno (combustão) e a detecção do sensor de realimentação (sensor de O_2). O sistema de controle deve ser implementado de forma a manter a relação ar/combustível em torno da condição estequiométrica ($\lambda = 1,00$) em todos os pontos onde não existe a necessidade de enriquecimento, como apresentado no Item 3.3. Devido a grande variação da rotação do motor (de 10 a 110 Hz para motores comerciais), a resposta dinâmica dos controladores de mistura deve ser avaliada em função dos ciclos do motor (Jennische, 2003; Chang *et al*, 1995).

Os diferentes tipos de sistemas existentes podem ser divididos em duas grandes classes: os sistemas que realizam o controle da mistura ar/combustível em malha aberta e os que operam em malha fechada. Cada um desses sistemas possui diferentes vantagens e desvantagens que serão discutidas após suas definições. Outra característica sobre os sistemas de controle está na implementação direta e indireta. Para a obtenção de melhores ações de controle é desejável que a medição e o controle atue diretamente nas variáveis que indicam o estado do sistema (Dorf e Bishop, 1998). No caso de sistemas de controle da mistura, a relação ar/combustível real é alterada em função da quantidade de combustível introduzida pelo eletroinjetor através do tempo de injeção, sendo devido a essa característica classificado como indireto.

3.6.1 Controle em malha aberta

Segundo Ogata (1993), a definição de controle em malha aberta abrange os sistemas que não mantêm uma relação direta entre o sinal desejado (*set point*) e o sinal de saída, não sendo o sinal de saída sequer medido e informado ao controlador. A Figura 3.21 apresenta um diagrama esquemático de um sistema em malha aberta.



Figura 3.21 – Sistema de controle em malha aberta (Ogata, 1993).

Em um sistema em malha aberta, cada entrada corresponde a uma mesma condição de operação do controlador que depende do ajuste, da calibração e da robustez do sistema na presença de distúrbios. Essa condição depende do tipo de sistema de controle ou, no caso dos motores de combustão interna, da condição de operação.

É conhecido e apresentado por diferentes autores que, durante condições de partida a frio e de aquecimento do motor, o sistema de controle da mistura opera em malha aberta devido ao tempo de aquecimento para início de operação do sensor de Oxigênio que o realimenta, que normalmente varia de 350 a 450 °C (Visser *et al*, 2001). Sob a ótica de controle de emissões de poluentes, esta é a pior situação de um MCI devido à condição de operação do controlador de mistura (malha aberta) e ao desempenho reduzido apresentado pelo catalisador nessa condição, devido a sua baixa temperatura durante a conversão catalítica (*light off*) (Lenz e Schroeder, 1997). Na condição de malha aberta, o controlador de mistura calcula o tempo de injeção em função de um modelo do sistema que depende da vazão mássica de ar (MAF), da rotação do motor em segundos (r) e da relação ar/combustível desejada ($A/F_{(d)}$). Ribbens (1998) define como tempo-base de injeção (T_{OL}) o período de acionamento do eletroinjeter, cuja unidade é definida em tempo de acionamento por rotação (*duty cycle in ms/rev*) sendo determinado segundo a equação:

$$T_{OL} = \frac{MAF}{r \cdot (A/F_{(d)}) \cdot R_F} \quad (3.17)$$

A constante R_F representa a característica de vazão de combustível do eletroinjeter em função da largura do pulso aplicado para realizar sua abertura. Normalmente é determinada através da vazão mássica de combustível por milissegundo de pulso aplicado. Durante essa determinação, variações da tensão de acionamento (bateria) devem ser consideradas e corrigidas pelo sistema através de tabelas (*lookup tables*) memorizadas no controlador. Como $A/F_{(s)}$ varia em função do combustível utilizado, define-se então o conceito de relação ar/combustível desejada ($A/F_{(d)}$) como a condição imposta ao sistema de controle para o cálculo de T_{OL} . O valor de $A/F_{(d)}$ pode variar dependendo da condição instantânea de operação do motor, como o enriquecimento em função da temperatura do motor (partida a frio) ou em condições de plena carga. A Figura 3.22 apresenta, a título de exemplo, um diagrama esquemático da correção de $A/F_{(d)}$ em função da temperatura do líquido de arrefecimento do motor (CT) através da utilização das tabelas de referência.

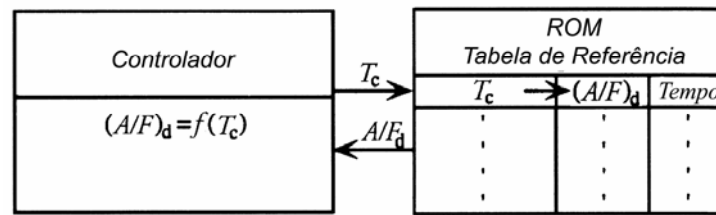


Figura 3.22 – Correção de $A/F_{(r)}$ em função da temperatura do motor (Ribbens, 1998).

Devido à necessidade de determinar a vazão mássica de ar admitido, esse controle apresenta grande susceptibilidade aos fenômenos de pulsação no coletor e, principalmente, ao método de medição empregado. Além da correção associada às variações da tensão de bateria, esse controle necessita corrigir o tempo-base de injeção (T_{OL}) em função da diferença de pressão entre a entrada do eletroinjeter e sua saída, causada pela queda de pressão no coletor de admissão e pelo efeito venturi promovido pela saída do combustível. Contudo, as correções executadas pelo sistema em função da condição de operação do motor não representam, no controle em malha aberta, a possibilidade de realizar a manutenção da condição estequiométrica durante toda a vida útil do motor. A maioria desses sistemas conta com ajustes mecânicos/eletrônicos para compensação do efeito de envelhecimento dos componentes.

3.6.2 Controle em malha fechada

Os sistemas de controle em malha fechada são caracterizados por apresentarem efeito direto da saída sobre a ação de controle, sendo essa característica definida também como realimentação (*feedback*). O controlador recebe em sua entrada a diferença entre o sinal desejado (*set point*) e o sinal de saída. Essa diferença é definida como a função erro $e(t)$ do sistema (Åström e Hägglund, 1996). O sinal $e(t)$ é introduzido no controlador de modo a minimizar a diferença entre o *set point* e o sinal real. A Figura 3.23 representa um sistema de controle em malha fechada (Ogata, 1993).

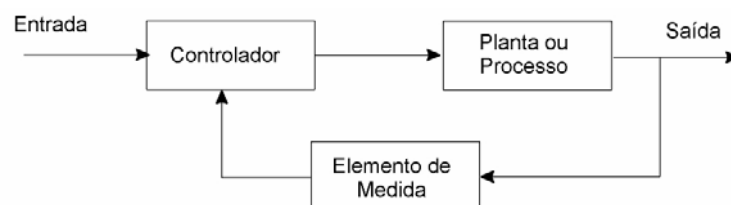


Figura 3.23 – Sistema de controle em malha fechada (Ogata, 1993).

A aplicação de sistemas que operam em malha fechada no controle da mistura ar/combustível permite alcançar a condição de operação ideal para cada regime do motor. Desta condição, dependem diretamente os valores da potência indicada (P_{ind}), do consumo específico de combustível (SFC) e da composição dos gases de descarga.

Como mostrado na Figura 3.23, um sistema de controle em malha fechada necessita de um sinal de re-alimentação (Elemento de medida) para determinação da função $e(t)$. Nos MCI's, esse sinal deve representar a concentração dos principais gases emitidos pelo motor durante seu funcionamento (O_2 , CO_2 , CO , UHC e NO_x). Porém, segundo Ribbens (1998), a re-alimentação em função da concentração de cada um dos gases citados não é aplicável aos atuais sistemas de controle, devido à complexidade de se introduzir sensores específicos para cada um deles. De acordo com a Figura 3.7 (Item 3.3), a variação do fator λ representa uma influência direta na potência, no consumo específico de combustível e na concentração relativa dos gases poluentes emitidos pelo motor.

A análise da Figura 3.7 permite observar que as emissões dos hidrocarbonetos não-queimados (UHC) e de Monóxido de carbono (CO) são minimizadas em condições de mistura estequiométrica tendendo a pobre (valores de λ entre 1,00 e 1,10), devido a quantidade suficiente de O_2 durante a combustão sem prejudicar sua temperatura. Observa-se ainda que na condição citada ($1,00 \leq \lambda \leq 1,10$) ocorrem os maiores níveis de emissão de NO_x , associado principalmente a dissociação do Nitrogênio (N_2), causada pela alta temperatura da câmara de combustão e ao excesso de O_2 nessa condição. A redução dos níveis de NO_x é favorecida em regiões de mistura rica ($\lambda < 0,90$) ou de mistura pobre ($\lambda > 1,10$), onde a temperatura de combustão é menor.

Apesar da condição estequiométrica ($\lambda = 1,00$) representar as maiores concentrações relativas de NO_x emitidas pelo motor, Leone *et al* (1997) apresentam como um dos pontos importantes para obtenção de veículos com valores reduzidos de emissões (*ULEV*) o controle da mistura ar/combustível em torno dessa condição. Lenz e Schroeder (1997) afirmam ainda que a eficiência dos catalisadores de três vias (*three way catalyst - TWC*) está diretamente ligada à manutenção da mistura próxima ao valor estequiométrico. Dessa forma, é possível prever o comportamento da concentração relativa dos gases emitidos pelo motor a partir do fator λ , por quantificar a quantidade percentual de O_2 em relação a condição estequiométrica.

Nos sistemas de controle da mistura, a relação ar/combustível real é alterada em função da quantidade de combustível introduzida pelo eletroinjeter. Isso significa que o controlador atua sobre o processo indiretamente, através de uma variável secundária que, neste caso, é o tempo de injeção. A re-alimentação do controlador é realizada atualmente através da medição da concentração de O_2 no coletor de descarga do motor. A Figura 3.24 apresenta um diagrama de blocos de um sistema de controle em malha fechada.

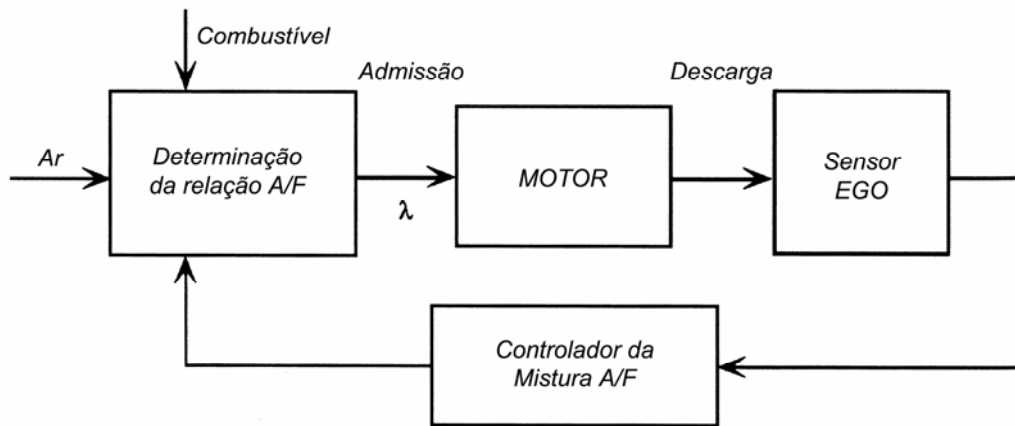


Figura 3.24 – Controle da mistura ar/combustível em malha fechada (Ribbens, 1998).

Definido como sensor de concentração de O_2 no coletor de escapamento (*Exhaust Gas Oxygen Sensor - EGO*) ou como Sonda Lambda, este sensor fornece um sinal de tensão para re-alimentação do controlador da mistura. Basicamente, é composto por dois eletrodos de platina fisicamente separados por meio de camadas de óxidos de Zircônia (ZrO_2) ou de Titânio (TiO_2), sendo um dos eletrodos exposto aos gases de escapamento e o outro ao ar ambiente. Os elétrons livres presentes nos íons do Oxigênio tornam o eletrodo exposto ao ar ambiente mais negativo que o exposto aos gases de escapamento produzindo, dessa forma, um movimento de elétrons através dos óxidos, produzindo valor de tensão que depende da diferença de concentração de O_2 entre os eletrodos. A variação da tensão em função da concentração de Oxigênio (Lambda) é apresentada graficamente na Figura 3.25 (Ribbens, 1998).

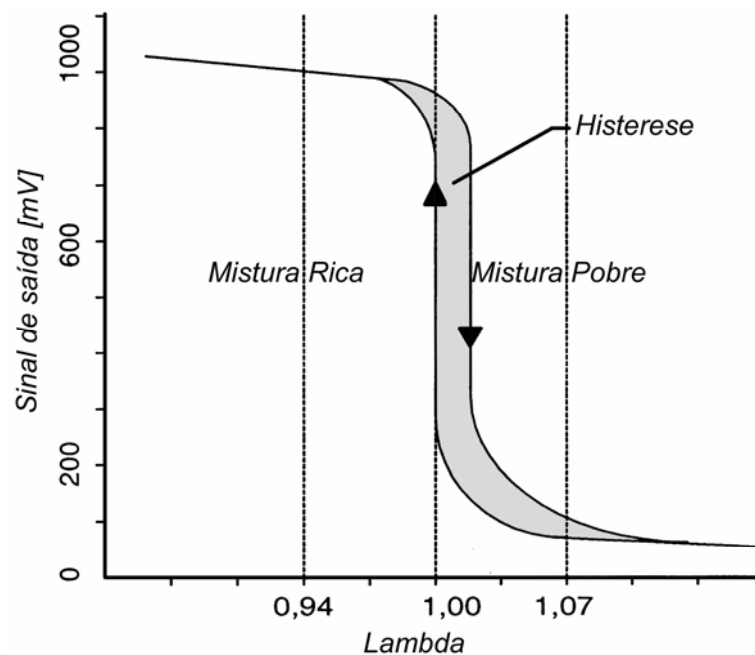


Figura 3.25 – Sinal de saída do EGO em função de lambda (Pinto, 2001).

A Figura 3.25 mostra, em função do fator λ , um comportamento não-linear na resposta em tensão do sensor EGO. A tensão nominal de saída desse sensor é, geralmente, de 100 a 900 mV. Esse valor de tensão representa, respectivamente, condições de mistura pobre ($100\text{mV} \rightarrow \lambda > 1,05$) e de mistura rica ($900\text{mV} \rightarrow \lambda < 0,95$), sendo essas as condições de saturação do sensor nas extremidades de sua curva de calibração. Na região delimitada pelos valores citados ($0,95 \leq \lambda \leq 1,05$), o sensor EGO apresenta uma mudança brusca nos níveis de sinal, principalmente em torno da condição estequiométrica de mistura ($\lambda=1,00$), além da histerese entre a transição de mistura rica para pobre e vice-versa. Adler (1988), Ribbens (1998) e Bauer (1999) mostram que outra característica apresentada pelo sensor EGO é a variação da curva de calibração em função da temperatura do elemento sensor. Essa variação ocorre principalmente em temperatura inferiores a 300 °C, a partir das quais os óxidos aplicados ao sensor conduzem os elétrons livres presentes no O_2 (Adler, 1998).

Na maioria dos sistemas em malha fechada, o sinal do sensor EGO é desconsiderado pelo controlador, retornado à condição de operação em malha aberta até que o sensor ultrapasse essa condição de temperatura, representada através de modelos matemáticos. O comportamento apresentado pela curva de calibração do sensor EGO faz com que o sistema de controle trabalhe de forma a corrigir continuamente a mistura ar/combustível em torno do valor estequiométrico. A Figura 3.26 apresenta a resposta dinâmica do controlador de mistura mediante a aplicação de várias entradas tipo “degrau” na válvula borboleta, durante o aquecimento do motor (Leone *et al*, 1997).

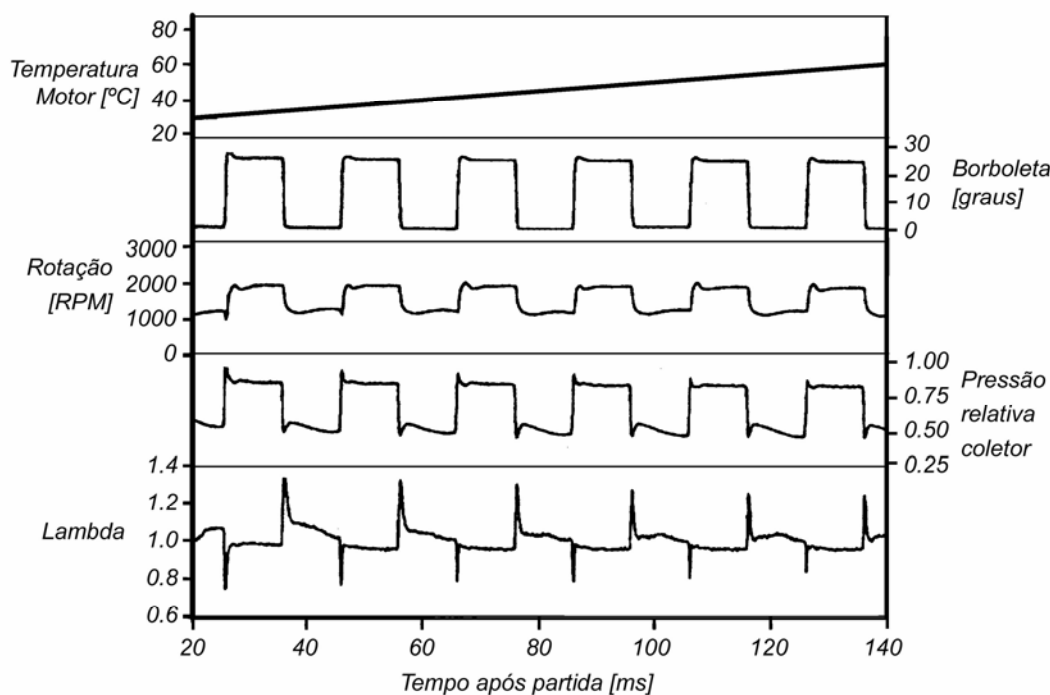


Figura 3.26 – Resposta do controlador de mistura à entrada degrau (Leone *et al*, 1997).

As entradas em degrau foram aplicadas ao sistema para mostrar a condição de oscilação promovida intencionalmente pelo controlador, no intuito de aumentar a eficiência do conversor catalítico de 3 vias (*TWC*) devido ao seu princípio de operação. Para que as reações de oxidação ocorram no *TWC* existe a necessidade de O_2 em quantidade suficiente e de calor. Devido a sua elevada área superficial e ao material cerâmico no qual é construído, o *TWC* absorve o Oxigênio proveniente da condição de mistura pobre e realiza, na presença de metais catalisadores e do calor absorvido, as reações de oxidação do CO e do UHC , formando CO_2 e H_2O (Bauer, 1999).

Em condições de mistura pobre, a temperatura da câmara de combustão tende a se elevar, favorecendo a dissociação do N_2 e, conseqüentemente, a formação de NO_x . As reações de redução de NO_x no *TWC* em N_2 , CO_2 e H_2O dependem da presença de CO e UHC (Anexo B). Essa condição ocorre somente em condições de mistura rica, onde as reações de oxidação deixam de ocorrer pela redução da quantidade de O_2 absorvido pelo *TWC*. Por essas razões, o sistema realiza o controle da mistura ar/combustível em torno da condição estequiométrica, oscilando entre condições de mistura ricas e pobres alternadamente como mostra a Figura 3.27 (Bauer, 1999).

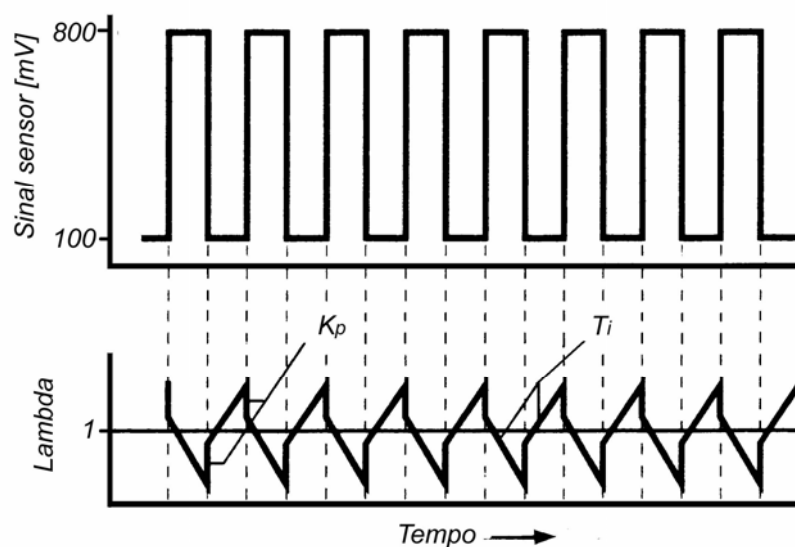


Figura 3.27 – Variação de Lambda para aumento da eficiência catalítica (Bauer, 1999).

Essas oscilações são controladas de forma a manter a mistura em uma faixa pré-estabelecida onde se obtém a maior eficiência de conversão catalítica no *TWC*, como apresentado pela área hachurada da Figura 3.28.

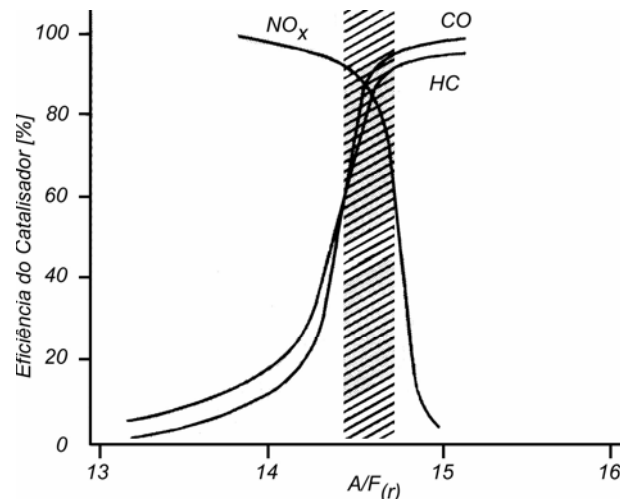


Figura 3.28 – Eficiência do catalisador em função de Lambda (Ribbens, 1998).

Existem algumas variações construtivas dos sensores de O_2 visando principalmente a redução do tempo de operação e malha aberta (aquecimento do sensor) e a histerese associada ao seu funcionamento. Uma dessas variações ocorre com a introdução de resistências de aquecimento no elemento cerâmico para que a condição ideal de operação seja atingida em um curto intervalo de tempo. Denominado de sensor de concentração de O_2 aquecido (*Heated Exhaust Gas Oxygen Sensor - HEGO*) ou Sonda Lambda de 04 vias, esse tipo de sensor reduz significativamente o tempo de início de operação do sistema em malha fechada. A Figura 3.29 apresenta a curva de calibração do sensor HEGO em função de Lambda, obtida a 600 °C de temperatura (Bauer, 1999).

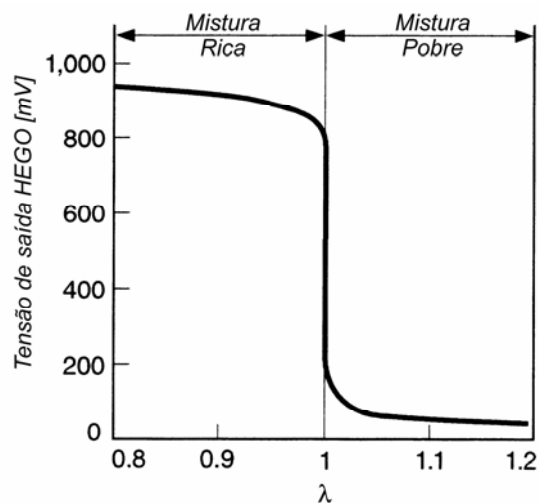


Figura 3.29 - Curva de calibração sensor HEGO em função de λ (Bauer, 1999).

Bauer (1999) apresenta ainda o conceito de sensor de O_2 em banda larga (*Wide-band Oxygen Sensor*) ou Sondas Lineares (*Universal Exhaust Gas Oxygen Sensor – UEGO*). Diferente das sondas convencionais (*dual-threshold*), as sondas lineares apresentam uma expansão do conceito aplicado às convencionais explicado anteriormente (*Nernst cell*) com a aplicação de uma segunda célula eletroquímica de

referência (*pump cell*). A associação dos sinais de ambas às células possibilita determinar a condição atual da mistura (rica, estequiométrica ou pobre) em função da intensidade da corrente gerada na célula de referência (i_p), além de quantificar a mistura rica ou pobre. A Figura 3.30 apresenta a curva de calibração de sonda de O_2 em banda larga, em função de Lambda.

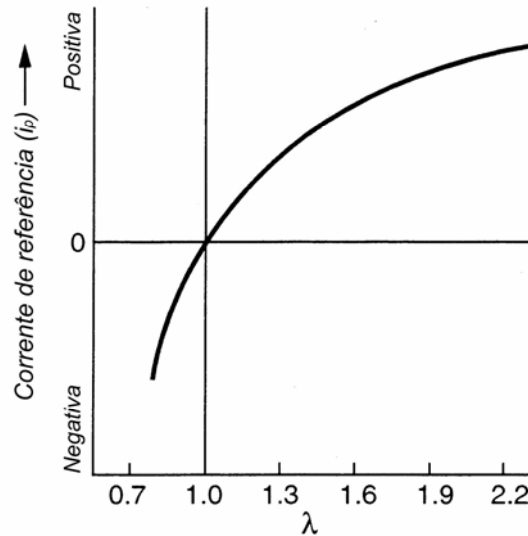


Figura 3.30 – Curva de calibração de uma sonda linear em função de λ (Bauer, 1999).

Na condição de malha fechada, o controlador de mistura calcula o tempo-base de injeção (T_{CL}) em função do mesmo modelo do sistema apresentado pela Equação 3.17, porém, aplica-se um fator de correção de Lambda (C_L) que depende do sinal de re-alimentação proveniente do sensor HEGO obtendo-se, dessa forma, o tempo de acionamento por rotação (ms/rev), segundo a equação:

$$T_{CL}(n) = T_{OL}(n) \cdot [1 + C_L(n)] \quad (3.18)$$

No sistema de controle convencional em malha fechada, utiliza-se um controlador do tipo PI para realizar a correção de T_{CL} , cuja ação é definida pela equação 3.19:

$$C_L(t) = K_p \cdot \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt \right] \quad (3.19)$$

onde:

$e(t)$ = função erro em no instante t ;

K_p = ganho proporcional;

T_i = Tempo Integral.

Åström e Hägglund (1996) mostram que o tempo integral (T_i) ajusta a ação de controle integral enquanto uma mudança no valor de K_p afeta a parte proporcional e a parte integral da ação de controle. Observa-se que, igualando-se o fator de correção (C_L) a zero, a Equação 3.18 retorna a condição de malha aberta. Isso ocorre no controle em malha fechada durante a fase de aquecimento do sensor EGO ou em condições de plena carga que podem ser mapeadas em tabelas de referência (Auslander *et al*, 1995).

A Figura 3.31-a apresenta o sinal proveniente do sensor de O_2 e a variação do fator de correção C_L correspondente à condição de mistura apresentada pelo sensor (3.29-b). A discretização apresentada nas Figuras 3.31 (a) e (b) é função do número de ciclos computacionais realizados pelo controlador (n_c).

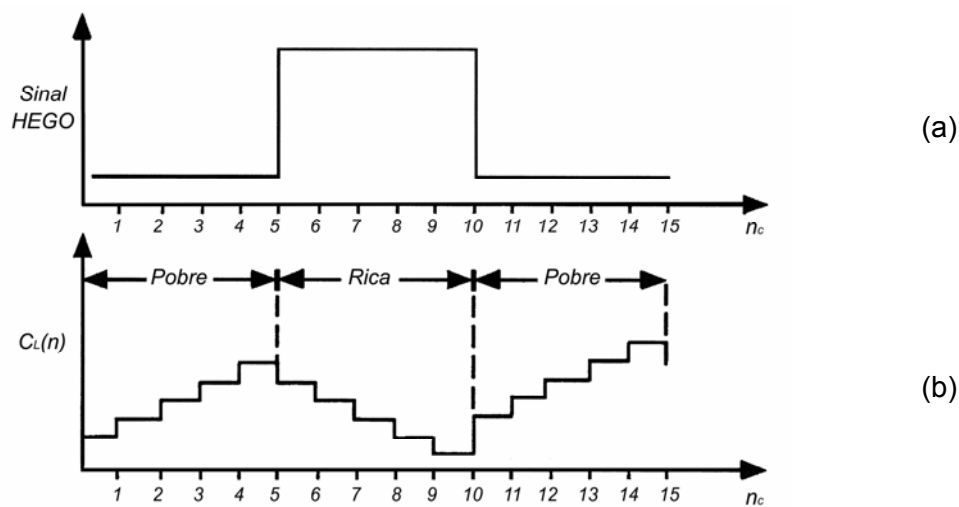


Figura 3.31 – Fator de correção C_L em função do sinal de O_2 (Ribbens, 1998).

Dorf e Bishop (1998) mostra que o projeto e a implementação de um sistema em malha aberta são mais simples do que em malha fechada, justificando a sua utilização em processos que não apresentam distúrbios durante a operação e onde a instabilidade não seja um problema significativo. Por outro lado, o uso da realimentação em sistemas de controle (malha fechada) torna a sua resposta menos susceptível a distúrbios externos e a variações do processo, ambos encontrados em MCI's. Neste caso, essas características devem ser ressaltadas devido às variações da rotação (10 a 110 Hz), da qualidade da combustão e do atraso de tempo entre o fenômeno e a realimentação.

A utilização de sistemas em malha aberta é aconselhável apenas em processos cujas entradas são conhecidas antecipadamente no tempo e nos quais não são evidenciadas ocorrências de distúrbios. Sistemas de controle de malha fechada possuem vantagens apenas quando esses distúrbios ou variações são imprevisíveis em

componentes do sistema (Ogata, 1993). Outra desvantagem apresentada pelos sistemas em malha aberta é a necessidade de ajustes mecânicos/eletrônicos para corrigir a influência dos efeitos do envelhecimento natural dos principais componentes do sistema. Esses ajustes devem ser realizados seguindo procedimentos estabelecidos pelos fabricantes, o que nem sempre é de conhecimento da indústria de reparação em geral. Alguns deles necessitam de equipamentos específicos como rastreadores eletrônicos e analisadores dos gases de descarga, inacessíveis a grande parte dos profissionais deste segmento devido ao elevado custo de aquisição (Pereira, 2001).

Alguns autores apresentam estudos comparativos sobre novas estratégias de controle da mistura ar/combustível em substituição aos controladores PI convencionais, visando reduzir os tempos de atuação do sistema e, conseqüentemente, os níveis de emissões dos MCI's. Leone *et al* (1997) apresentam um estudo sobre os pontos-chave a serem abordados para redução dos níveis de emissões dos veículos (*ULEV*), onde mostram, através de modelos matemáticos, a influência do ajuste dos controladores nos índices de emissões. Citam a importância da redução no tempo de operação em malha aberta, durante o qual, cerca de 93% da quantidade total de hidrocarbonetos não-metanos são emitidos (~140 segundos após a partida – Ciclo FTP75).

Braga (2007) mostra que as características não-lineares do sistema e dos sensores, aliadas ao tempo morto, fazem com que a malha de controle de lambda com PI clássico tenda a instabilidade. Para manter o sistema estável é necessário limitar os ganhos do controlador, o que reduz a banda passante e prejudica a rejeição às perturbações. Neste contexto, a ação *feedforward* de cálculo do tempo base de injeção assume grande importância, pois rejeita as perturbações constantes de carga e rotação. Conclui que a malha de realimentação de lambda tem como função corrigir os erros estacionários, enquanto a ação *feedforward* proporciona um bom desempenho dinâmico.

Cita também que nos sistemas baseados em realimentação via sensor *UEGO* é possível realizar o controle em malha fechada fora da região estequiométrica, determinando-se o grau de enriquecimento ou empobrecimento desejado. Pode-se adotar qualquer valor de mistura, de acordo com as condições do motor, alterando a referência do controlador PI. A característica aproximadamente linear do sensor *UEGO* permite a utilização de ganhos mais elevados, melhorando a resposta dinâmica em relação ao sensor *EGO*. Porém, o tempo morto elevado limita a banda passante e não permite respostas satisfatórias durante variações rápidas da condição de operação do motor. Deste modo o desempenho dinâmico também é garantido pela ação *feedforward*.

3.7 Mapas de Calibração

O controle dos parâmetros de funcionamento de um motor de combustão interna, que utiliza sistemas de gerenciamento eletrônicos, é realizado através dos mapas de calibração. Esses mapas são compostos por matrizes de dimensão $M \times N$ que fornecem valores pré-estabelecidos para o controle de uma variável, visando otimizar seu funcionamento em função das diferentes condições de operação do motor. Podem ser formados por um conjunto de pontos em função de uma variável, definidos como Tabela de Calibração ou por até duas variáveis independentes, definidos como Mapa de Calibração. A Tabela III.5 apresenta, a título de exemplo, uma matriz de correção do tempo base de injeção em função da temperatura do líquido de arrefecimento do motor, utilizada para otimizar as condições de partida a frio (MoTeC, 2004).

Tabela III.5 - Exemplo de correção do tempo de injeção em função da temperatura.

Temperatura do líquido de arrefecimento [°C]	-20	-10	0	10	20
Aumento no Tempo base [ms]	1,75	1,50	0,85	0,60	0,35

De forma similar à tabela apresentada, podem ser implementadas correções do tempo base de injeção em função da temperatura do ar admitido, da pressão no coletor e da pressão atmosférica. A Figura 3.32 apresenta, também a título de exemplo, um Mapa de Calibração do tempo de injeção em função da rotação do motor e da carga imposta através da posição da válvula borboleta.

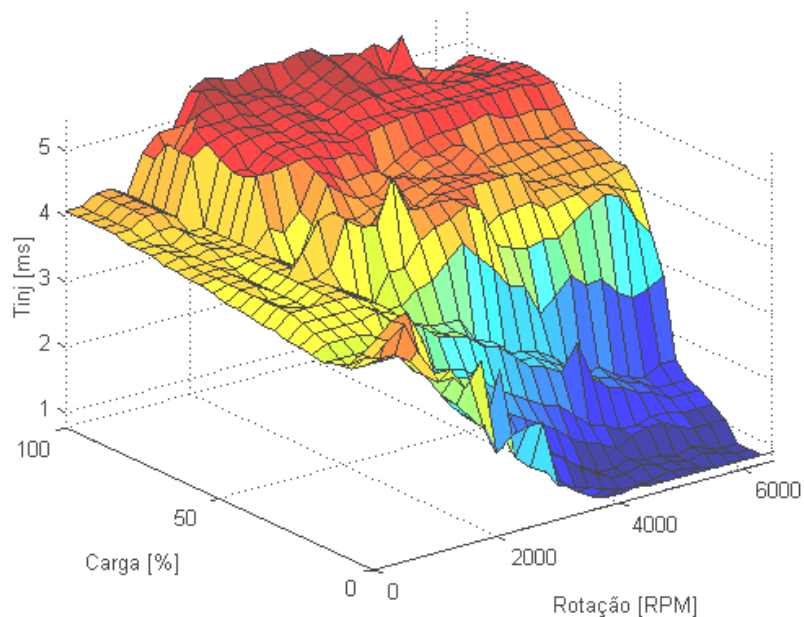


Figura 3.32 – Mapa de tempo de injeção (t_{inj}) de um motor de combustão interna.

Os mapas são gerados de forma a correlacionar uma ou mais condições de funcionamento do motor com o parâmetro a ser controlado. Os mapas de ângulo de avanço de ignição e do tempo de injeção, por exemplo, são geralmente determinados em função da rotação do motor e de uma segunda variável, diretamente ligada ao tipo de controle e da estratégia que se utiliza durante a calibração do motor. A principal vantagem desse tipo de calibração é a possibilidade de se otimizar os parâmetros de controle do motor em pontos específicos de seu funcionamento.

Essas matrizes são armazenadas em endereços de memória do sistema de gerenciamento eletrônico, com a possibilidade de realizar alterações pontuais ou em regiões específicas, mesmo com o motor em funcionamento. A realização dessas alterações, em diferentes condições de operação do motor, é definida como ajuste e segue diferentes critérios em função da condição instantânea, sendo normalmente realizada com o motor instalado em bancada dinamométrica.

O número de linhas (M) e de colunas (N) da matriz de ordem $M \times N$, que fornece os valores de referência para o controle, está diretamente ligado ao tipo de sistema controlado, à resposta do motor no qual o controle foi implementado e, principalmente, ao custo associado à obtenção dessa matriz. A definição da ordem das matrizes utilizadas no controle do MCI ocorre no início da calibração, devido ao tempo total disponível para sua execução. Outra característica importante, que ocorre também nessa fase, é a definição do passo da matriz, diferença entre dois pontos consecutivos de calibração.

O tempo, assim como o custo associado à calibração de um MCI estão diretamente ligados a essas definições, devido à necessidade de manter o motor estabilizado em cada um dos $M \times N$ pontos de calibração que compõe a matriz, sendo essa a principal desvantagem de um elevado número de pontos. Em alguns casos, existe ainda a necessidade de condicionamento do motor, como nas partidas a frio, sendo somente realizadas em salas de ensaios dinamométricos climatizadas o que, na maioria das vezes, dificulta a calibração em temperaturas inferiores a 20 °C.

Podem ainda ser citadas as condições de calibração de regimes transientes de aceleração, trocas de marcha e de desacelerações que envolvem as condições de dirigibilidade dos veículos equipados com esses sistemas. Em todas essas, existe a necessidade de realização de calibração sendo, as associadas ao motor instalado no veículo, realizadas no intuito de otimizar sua dirigibilidade.

3.8 Sistemas de Gerenciamento Eletrônico

A evolução dos sistemas de gerenciamento eletrônico do motor promoveu a redução do número de componentes mecânicos em ambos os sistemas, através da inserção de módulos eletrônicos de processamento de sinais. Esses módulos foram desenvolvidos de maneira segmentada, como apresentado pelos itens 3.3 e 3.5 desse capítulo. Bauer (1999) apresenta alguns sistemas, como o “*Bosch LE-Jetronic+EZK*”, capazes de realizar o controle eletrônico de um MCI utilizando módulos analógicos distintos, dedicados ao controle da formação da mistura ar/combustível (*módulo LE-Jetronic*) e para controle em malha fechada das estratégias de ignição, desde a formação da centelha até sua inserção na câmara de combustão (*módulo EZK*).

Os avançados sistemas existentes no mercado, aplicados aos motores de combustão interna, são capazes de controlar os parâmetros de funcionamento do motor otimizando seu rendimento. Isto significa aproveitar uma maior parcela da energia contida no combustível, transformando-a em trabalho útil. A associação do aumento de rendimento promovido pelos sistemas de gerenciamento eletrônico a novas tecnologias mecânicas, como variadores de fase, sobre-alimentadores e novos materiais empregados possibilitam a concepção de motores de baixa cilindrada, leves e capazes de gerar valores de potência e torque superiores quando comparados aos seus antecessores.

Com a introdução do controle digital, através da discretização de sinais e monitoramento das condições de operação dos MCI's, foram desenvolvidos sistemas de controle integrados de formação e de ignição da mistura ar/combustível. Esse tipo de sistema de gerenciamento eletrônico é o principal responsável pela redução do impacto ambiental causado pelos automóveis atuais.

Sua principal tarefa é fornecer o torque demandado pelo condutor enquanto assegura economia de combustível, maximiza a vida útil do motor e reduz a emissão de poluentes (Ribbens, 1998; Bauer, 1999). A Figura 3.33 apresenta um diagrama de blocos de um sistema de gerenciamento eletrônico digital.

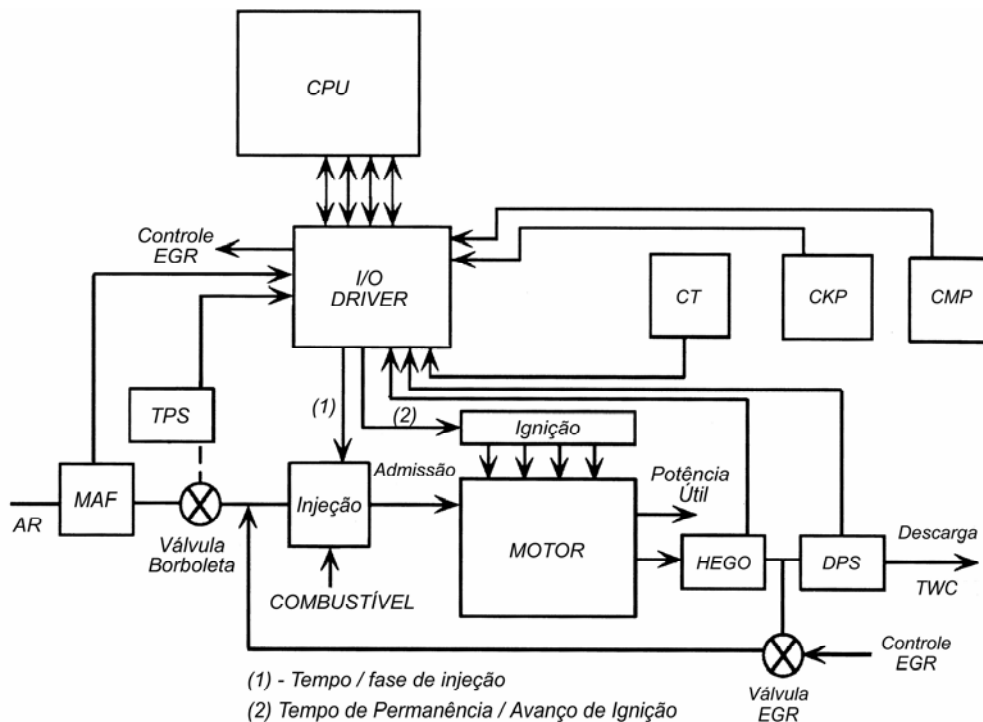


Figura 3.33 – Sistema de gerenciamento eletrônico digital (Ribbens, 1998).

O diagrama de blocos apresentado pela Figura 3.32 mostra, de maneira geral, os sub-sistemas associados ao gerenciamento eletrônico digital de um MCI, onde as entradas recebidas pelo sistema fornecem a condição instantânea de funcionamento do motor. Tipicamente, o sistema recebe os sinais referentes às seguintes grandezas físicas:

- Vazão mássica de ar (*Massic Air Flow - MAF*);
- Posição instantânea da válvula borboleta (*Throttle Position Sensor - TPS*);
- Temperatura do fluido de arrefecimento (*Coolant temperature - CT*);
- Velocidade e posição angular do eixo virabrequim (*Crankshaft position - CKP*);
- Tempo de cada cilindro (*Cameshaft Position - CMP*);
- Concentração de O_2 no escapamento (*Heated Exhaust Gas Oxygen Sensor - HEGO*);
- Sensor de pressão diferencial (*Differential Sensor Pressure – DPS*).

Esse conjunto de informações é transmitido ao módulo de condicionamento de sinais de entrada e saída (*I/O driver*) no intuito de converter (discretizar) as informações de entrada para processamento do micro-processador dedicado (*controller*), sendo esse o sub-sistema responsável pela determinação da condição instantânea de operação do motor. Identificada essa condição, o micro-processador realiza o controle do motor, através das saídas do módulo *I/O*, com base nas informações obtidas e nas estratégias descritas no *software* de gerenciamento eletrônico (Ribbens, 1998).

Segundo Ribbens (1998), o micro-processador possui partições de memórias dedicadas à gravação do *software* principal, formado por um código-fonte que pode conter centenas de linhas. Normalmente esse código é gravado em memórias tipo *ROM* (*Read On Memory*) ou tipo Flash *EPROM*. Existe ainda a necessidade de utilização de uma memória volátil tipo *RAM* para auxiliar na execução do *software*. As principais saídas do módulo I/O são responsáveis pelo controle em modulação da largura de pulso (*Pulse Width Module – PWM*) dos tempos de injeção (*Injection Pulse Width*) da unidade de controle de combustível e do tempo de permanência (*Dwell Time*) das unidades de geração da centelha de ignição (bobinas de ignição). Podem ser citadas ainda como funções controladas pelo módulo I/O, o controle de acionamento de sistemas periféricos como, por exemplo, a bomba de combustível, o sistema de recirculação dos gases de descarga (*EGR*), a lâmpada de anomalias e eletroválvula de purga do canister.

A divisão de tarefas executadas por sistemas físicos (*hardware - HW*) ou por sistemas digitais (*software - SW*) é realizada de forma a maximizar o rendimento do sistema, visando sempre o custo e o tempo associado a essa implantação. Na maioria dos casos, os sinais de comando dos sistemas periféricos são provenientes do micro-processador e seguem uma lógica de acionamento que depende das condições de operação do motor. Em particular, a contribuição de um sistema de gerenciamento eletrônico digital está diretamente ligada ao controle e manutenção da mistura ar-combustível dentro de limites definidos e às estratégias de controle do avanço de ignição em toda a faixa de operação de um MCI, que se traduzem em um maior desempenho do motor nas regiões de economia de combustível, conforto e dirigibilidade (Bauer, 1999).

Para a determinação desses limites, as montadoras e os fabricantes de motores independentes realizam ensaios em bancos dinamométricos passivos e ativos, onde são simuladas diferentes condições de operação do motor, variando desde os regimes de marcha lenta, incluindo cargas parciais, acelerações rápidas e desacelerações até condições extremas de operação. Além disso, as resoluções impostas pelo Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA, através do Programa Nacional de Controle de Emissões Veiculares – PROCONVE, restringem os parâmetros de funcionamento dos motores, principalmente em condições de partida a frio e durante a faixa de aquecimento do motor, onde o catalisador apresenta um desempenho reduzido na conversão catalítica (*light off*) (CETESB, 2006).

Os limites estabelecidos pelas diferentes fases de implantação do PROCONVE exigem uma evolução contínua dos sistemas de gerenciamento eletrônico dos motores de combustão interna, como o diagrama da Figura 3.34.

Ano	CO (g/km)	HC (g/km)	NOx (g/km)	RCHO ² (g/km)	MP ³ (g/km)	EVAP. ⁴ (g/teste)	CÁRTER	CO-ML (% vol)
89 - 91	24	2,10	2,0	-	-	6	nula	3
92 - 96 ⁵	24	2,10	2,0	0,15	-	6	nula	3
92 - 93	12	1,20	1,4	0,15	-	6	nula	2,5
mar/94	12	1,20	1,4	0,15	0,05	6	nula	2,5
jan/97	2	0,30	0,6	0,03	0,05	6	nula	0,5
mai/03	2	0,30	0,6	0,03	0,05	2	nula	0,5
jan/05(40%)	2	0,16 ⁵	0,25 ⁷	0,03	0,05	2	nula	0,5 ⁷
jan/06(70%)	2	ou	ou	0,03	0,05	2	nula	0,5 ⁷
jan/07(100%)	2	0,30 ⁶	0,60 ³	0,03	0,05	2	nula	0,5 ⁷
jan/09	2	0,05 ⁵ ou	0,12 ⁷ ou	0,02	0,05	2	nula	0,5 ⁷
jan/09	2	0,30 ⁶	0,25 ³	0,02	0,05	2	nula	0,5 ⁷

Figura 3.34 – Fases de implantação do PROCONVE (CETESB, 2006).

A necessidade em se obter calibrações individuais para cada veículo faz com que os fabricantes dos sistemas digitais de gerenciamento eletrônico disponibilizem às montadoras, equipamentos dedicados ao desenvolvimento do controle motor denominados “centrais eletrônicas de desenvolvimento” ou “centrais abertas”. Essas centrais são sistemas de controle integrados parametrizáveis, capazes de atuar sobre todos os parâmetros de funcionamento de um MCI através de elaboração de mapas e/ou tabelas que traduzem os valores ideais para cada regime de operação.

Trabalhos desenvolvidos por Baeta *et al* (2005), são dedicados ao desenvolvimento de metodologias específicas que envolvem calibração de motores em bancada dinamométrica utilizando centrais eletrônicas de desenvolvimento.

Concluídas as etapas de calibração ao banco de prova, dirigibilidade, confiabilidade e de emissões, os dados são gravados e transferidos para as unidades responsáveis pelo gerenciamento eletrônico do motor, denominadas “centrais dedicadas”, que equipam os veículos normais de produção comercializados no país.

3.9 Sistemas de gerenciamento eletrônico programáveis

Os sistemas de gerenciamento eletrônico programáveis existem no mercado desde a sua concepção e implantação na área automotiva, devido a necessidade de se obter calibrações individuais para cada veículo. Esses equipamentos são dedicados ao desenvolvimento do controle motor em todas as suas fases, de aplicações comerciais até as esportivas de alto desempenho. As centrais eletrônicas de desenvolvimento, ou centrais abertas, são sistemas de controle integrados capazes de atuar sobre os parâmetros de funcionamento de um MCI através de elaboração de mapas e/ou tabelas, que traduzem os valores ideais para cada regime de operação (Denton, 2000).

Existem no mercado diferentes fabricantes que, em sua maioria, são dedicados especificamente ao atendimento da demanda das montadoras. O objetivo principal desse capítulo é apresentar alguns dos mais conceituados fabricantes que, diferentemente daqueles dedicados às montadoras, disponibilizam esses sistemas para comercialização em número reduzido. As características aqui mencionadas são uma síntese das fichas técnicas, manuais de operação e da observação do comportamento dos programas de configuração desses sistemas, disponibilizados pelos fabricantes.

Uma característica importante, comum aos sistemas citados, é o fato de permitirem uma parametrização de todos os regimes de funcionamento do motor. Porém, quando o termo “central aberta” ou “central programável” é mencionado, oculta-se o fato de que as estratégias de controle utilizadas por esses sistemas não são acessíveis nem modificáveis. O nível de acesso encontrado em todas as centrais eletrônicas aqui descritas é restrito à parametrização e não à programação. Os códigos utilizados pelos sistemas disponíveis no mercado ainda continuam sendo, para os usuários desses sistemas, um bloco de entradas e saídas parametrizáveis (caixa preta), que não permitem o acesso ao software de controle.

Outra característica importante é o fato de que nem todos são dedicados ao gerenciamento de ignição e injeção de combustível de um motor de combustão interna. Essa diferenciação será abordada em cada tópico em específico, tratando das vantagens e desvantagens apresentadas por cada um deles. Vale aqui ressaltar a importância do projeto de um sistema de gerenciamento eletrônico de ignição e injeção de combustível para desenvolvimento de motores de ignição por centelha. O acesso à programação da central (*software* de controle) permite que novas estratégias de controle possam ser propostas e testadas de forma a validar novas tecnologias aplicadas aos MCI's.

3.9.1 Sistema MoTeC

Fundada em 1987, a MoTeC é uma empresa australiana especializada no desenvolvimento de sistemas de gerenciamento de motores e aquisição de dados. Atua com foco principal sobre veículos de competição onde, através de calibrações específicas, busca a maximização de torque e potência útil do motor. Os produtos principais desta empresa são as centrais eletrônicas parametrizáveis (*ECU*), que disponibilizam várias opções de funcionalidades e custos. Possui ainda, como produtos secundários, acessórios que complementam as ECU's como os kits de sensores e chicotes para conexões elétricas, módulos de aquisição e visualização dos dados, sistemas de ignição por descarga capacitiva, medidores de lambda, entre outros.

3.9.1.1 Modelos de centrais eletrônicas parametrizáveis MoTeC

A MoTeC oferece duas famílias de centrais eletrônicas parametrizáveis, sendo a mais antiga composta pelos modelos M4, M48 e M8, e a mais recente pelos modelos M400, M600, M800 e M880. Ambas as famílias apresentam a mesma estrutura básica, porém existem algumas diferenças no que diz respeito aos níveis de funcionalidade.

Os modelos M4, M48 e M8 fazem parte da geração mais antiga de centrais MoTeC que possuem a mesma arquitetura básica, diferindo apenas no número de entradas e saídas disponíveis. A M4, por exemplo, apresenta 4 saídas de injeção e até 4 de ignição. Já a M48 tem 8 saídas para injeção e apenas 2 para ignição, enquanto a M8 tem 8 de injeção e 4 de ignição, além de entradas e saídas adicionais. Com esta configuração a M4 pode comandar, no máximo, um motor de 4 cilindros no modo seqüencial sincronizado. Motores acima de 4 cilindros podem ser controlados pela M4 desde que se utilize um controle semi-seqüencial. Já a M48 e a M8 podem comandar de forma seqüencial motores de até 8 cilindros, com capacidade de acionamento de 8 saídas de ignição através de módulos de expansão.

Essas centrais possuem funções que podem ser configuradas de acordo com o sistema desejado. Cada função habilitada possui parâmetros que devem ser ajustados para seu correto funcionamento. As estratégias de controle adotadas serão abordadas mais adiante no trabalho. Algumas das funções disponíveis são:

- Controle de marcha lenta (PID, *PWM* ou motor de passo);
- Controle de corte de combustível em desacelerações (*fuel cutoff*);

- Controle da mistura ar/combustível (*Wide / Narrow band*);
- Controle da pressão de sobre-alimentação (*overboost pressure*);
- Filtros de avanço para trocas de marcha;
- Ajuste de ignição e injeção para cada cilindro;
- Compensação de pressão, temperatura do ar, e temperatura do motor;
- Determinação de limites para rotação e velocidade do veículo;
- Calibração dos sensores utilizados.

Estes modelos permitem a aquisição dos parâmetros de funcionamento do motor em até 20Hz, utilizando os 512 kbytes de sua memória interna, com possibilidade de pós-tratamento e análise por meio de um software específico. Possibilitam ainda a implementação de controle da mistura ar/combustível realimentado com sinal proveniente de sensores de O₂ de banda larga (*Wide Band Sensor*) para captura dos dados ou controle em malha fechada sendo possível, com esse tipo de sensor, realizar medições da mistura ar/combustível em uma ampla faixa ($0,75 \leq \lambda \leq 1,20$). O modelo M8 possui ainda 2 entradas para sensor lambda que permitem, por exemplo, monitorar as condições de operação e eficiência do catalisador (*On Board Diagnostics – OBD*).

Uma característica predominante nas centrais eletrônicas parametrizáveis é o uso de tabelas e mapas. Os parâmetros de funcionamento do motor (sensores) são entradas para as tabelas e mapas que determinam os comandos a serem aplicados (atuadores). Esta é a forma mais simples de mapear as não-linearidades presentes em um MCI, possibilitando a obtenção de técnicas de controle simples e eficientes.

A grande variedade de motores no mercado requer das centrais eletrônicas parametrizáveis uma grande flexibilidade. As ECU's da MoTeC atendem a este requisito através de inúmeros parâmetros de ajuste que possibilitam sua adequação a praticamente qualquer tipo de motor, principalmente em relação aos diferentes tipos de sensores e atuadores utilizados. Entre os parâmetros disponíveis, podem ser citados:

- Modulação da largura do pulso de injeção (tempo de injeção);
- Limitação da corrente máxima nos *drivers* de injeção;
- Compensação do pulso de injeção devido à queda de tensão na bateria;
- Determinação da carga solicitada (Posição borboleta ou pressão no coletor);
- Número de cilindros;
- Tipo dos sensores de referência e de sincronismo;
- Tipo do sistema de ignição e número de bobinas presentes;
- Tempo de permanência (*Ignition Dwell Time*).

Estes parâmetros permitem, por exemplo, configurar a ECU para atuar com injetores de baixa ou alta impedância, sistemas de ignição capacitivos ou indutivos, sensores de rotação ópticos, magnéticos ou de efeito hall com diferentes tipos de sincronismo. Além destes parâmetros de configuração do motor, possuem também parâmetros das estratégias de controle, como partida a frio, enriquecimento de partida, ganho de aceleração rápida e limitação de rotação e pressão no coletor.

As ECU's da MoTeC disponibilizam também saídas auxiliares utilizadas para diferentes funções que, além de auxiliar as estratégias básicas de controle de um motor, permitem ao usuário atribuir funções as entradas e saídas e estabelecer regras de controle entre elas. Cada função habilitada tem seus próprios parâmetros que devem ser ajustados, sendo algumas destas funções:

- Controle da pressão de sobre-alimentação de turbo-compressores (*waste gate*);
- Controle de dispositivo genérico (PID, *PWM* ou chaveado);
- Geração de pulsos para tacômetro e comando da bomba de combustível;
- Controle do eletro-ventilador do sistema de arrefecimento (*On/off* ou *PWM*);
- Controle do ar condicionado (eletroventilador e embreagem eletromagnética);
- Comando para dispositivo On/Off genérico em função da carga e da rotação;
- Luz de troca de mudança de marcha (*shift light*) e de anomalia do sistema.

A MoTeC disponibiliza um software composto por funções de calibração, configuração, diagnóstico, análise de dados e atualização das ECU's. Estes programas rodam em ambiente DOS e se comunicam com a ECU através de interface serial (RS-232). O principal programa é o *Engine Management Program - EMP*, usado para calibração, configuração e diagnóstico, cujas principais funcionalidades são:

- Armazenamento de dados de calibração no disco rígido;
- Transferência de arquivo com dados de calibração do PC para a ECU;
- Visualização gráfica tri-dimensional (3D) dos mapas de calibração;
- Leitura on-line dos valores dos sensores e outros parâmetros;
- Teste dos módulos de injeção, ignição e saída auxiliar (motor parado);
- Tópicos de ajuda.

Os programas *MoTeC INTERPRET* e *GETLOG* são usados para buscar e analisar dados armazenados na ECU. Já o *MoTeC UPDATE* é utilizado para realizar atualizações no *firmware* da ECU, possibilitando a adição de novas funções ao sistema, através de uma chave de hardware conectada entre a ECU e o cabo de interface com o PC.

Uma evolução dos modelos citados anteriormente é apresentada na série M400, M600, M800 e M880, uma geração mais recente de ECU's MoTeC. Sua arquitetura se baseia na família anterior, porém com novas funções, além de um número maior de canais de entrada e saída, e maior disponibilidade de memória. As principais características de cada modelo são:

- *M400*: 4 saídas de injeção, 4 de ignição, 512 Kb de memória;
- *M600*: 6 saídas de injeção, 6 de ignição e 512 Kb de memória;
- *M800*: 8 saídas de injeção, 6 de ignição e 1 Mb de memória (extensível para 12 saídas de injeção se utilizadas 4 saídas de ignição);
- *M880*: similar à M800, porém com 4 Mb de memória.

Essa nova geração de ECU's possui, além das funções citadas, a possibilidade de:

- Controle eletrônico da borboleta (*Drive-by-wire*);
- Controle do aquecimento do sensor lambda (*HEGO*);
- Controle da fase de sistemas com comando de válvulas variável;
- Controle de dois níveis de injeção (*dual injection*);
- Controle da pressão de combustível;
- Controle de servo-motor ou de motor de passo (somente M800 e M880);
- Controle do alternador (Solicitação de potência do motor X Carga da bateria);
- Controle de sobre-alimentação.

Os novos modelos proporcionam ainda tabelas e mapas de compensação adicionais, maior suporte a sensores, mais parâmetros de calibração e outras novas características que tornam o sistema ainda mais flexível. Possuem módulo CAN de alta velocidade que permite a comunicação entre dispositivos e entre a ECU e o PC com maiores taxas de troca de dados, via conversores CAN/USB. Possuem ainda módulo de comunicação RS-232 utilizado em comunicação com rádio para realização de telemetria.

Nessa nova geração, a interface homem-máquina em ambiente DOS foi substituído pela interface tipo Windows, que permite melhor visualização gráfica e recursos adicionais. O programa principal (*ECU MANAGER*) é utilizado para calibração, configuração, diagnósticos, teste das saídas, atualizações e habilitação de opções. Já o programa *INTERPRETER* é utilizado para analisar dados salvos, enquanto o *TELEMETRY MONITOR* apresenta os dados de telemetria. A opção "*Pro Analysis*" oferece ainda funções avançadas de análise de dados, como gráficos multicamadas, XY, funções matemáticas, e análise em função da posição na pista.

3.9.1.2 Estratégias de controle MoTeC

As estratégias adotadas pela MoTeC se baseiam em mapas e tabelas para relacionar as variáveis de entrada com as de saída. Esta estratégia é simples e permite mapear as não linearidades do motor, porém requer uma calibração detalhada, que está diretamente ligada ao tempo e ao recurso disponível para a calibração.

São utilizados também alguns controladores PID, sintonizados pelo usuário em função da aplicação. Estes controladores apresentam parâmetros adicionais para a adequação aos diferentes pontos de operação do motor, o que é necessário devido às suas não-linearidades. Outros controladores são baseados apenas em parâmetros de ganho, saturação e decremento e dependem diretamente da aplicação.

De forma geral as estratégias de controle são simples, mas exigem um longo processo de calibração por parte do usuário devido à necessidade de calibração em pontos específicos. A seguir são apresentadas as principais relações de controle usadas pelas ECU's da MoTeC.

3.9.1.3 Controle de Injeção

O controle da injeção atua na massa de combustível injetada e na fase de injeção. O ajuste do ângulo de injeção somente oferece ganhos significativos em motores com comando seqüencial sincronizado, onde é possível diminuir a condensação do combustível nas paredes do coletor, sendo realizado em função da rotação, através de uma tabela.

O ajuste da massa de combustível injetada é iniciado com a determinação da relação entre o tempo de duração do pulso de comando dos injetores e a massa efetivamente injetada (função de transferência do eletroinjeter). Essa relação deve compensar as variações de pressão da linha combustível em relação ao coletor, temperatura do combustível e tensão na bateria. As correções são feitas através de tabelas que geram um ganho percentual a ser aplicado no tempo de injeção.

O controle da mistura ar/combustível parte de um tempo base de injeção, determinado pelo usuário, sobre o qual se aplicam as correções obtidas através das tabelas e mapas, sendo eles:

- *Injeção x Condição de Operação*: Considerado o principal mapa de controle, relaciona o tempo de injeção com a condição de carga (posição da válvula borboleta ou pressão absoluta no coletor de admissão) e rotação do motor, sendo configurado por meio de ganhos percentuais associados ao tempo base de injeção (%IJP).
- *Injeção x Temperatura do Ar*: Mapa que realiza a correção do tempo base de injeção em função da variação da temperatura do ar no coletor. Como o aumento da temperatura reduz sua massa específica, esse mapa promove uma correção do tempo de injeção em função dessa variação.
- *Injeção x Temperatura do Motor*: Mapa que realiza a correção percentual do tempo base em função da temperatura do motor, visto que a atomização e a tendência à condensação do combustível são diretamente influenciadas pela temperatura do motor.
- *Injeção x Pressão no Coletor*: Assim como na variação da temperatura do ar no coletor, a variação da pressão absoluta altera sua massa específica que deve ser compensada. Essa compensação é feita através de um mapa, que retorna a correção percentual do tempo base em função da pressão no coletor. Nos casos onde o mapa principal é descrito em função da rotação e da pressão no coletor, essa correção é intrínseca.
- *Injeção x Aceleração rápida*: Mapa que relaciona variações bruscas na posição da borboleta (condição de aceleração rápida) com um aumento percentual do tempo base de injeção, no intuito de evitar que a mistura fique pobre nessa condição. Os principais parâmetros utilizados neste caso são a sensibilidade, que determina o ganho a ser dado na injeção, e a taxa de descaimento, que determina a curva decrescente deste ganho até se anular. Estes parâmetros podem ser fixos para todas as condições ou podem variar com a rotação, sendo obtidos através de uma tabela. Geralmente, quanto menor a rotação, maior deve ser o ganho aplicado na injeção. As ECU's proporcionam também a estratégia de empobrecimento da mistura durante desaceleração rápida, análoga à estratégia de aceleração.
- *Injeção x Partida a Frio*: Estratégia que realiza o enriquecimento da mistura na fase inicial de partida, durante um período de tempo após o motor entrar em funcionamento, um ganho adicional na aceleração rápida e enquanto a temperatura do sistema de arrefecimento for menor que 60°.

3.9.1.4 Controle de Ignição

O controle da ignição atua diretamente no tempo de permanência da bobina (*Dwell time* - D_t) e no ângulo de avanço da ignição. A necessidade de fornecer à bobina de ignição a mesma energia em todas os pontos de operação do motor exige a aplicação de correções no D_t . Esse controle é realizado em função da tensão da bateria e da necessidade de variação em função da rotação, gerando-se um mapa de tempo de permanência (*Dwell time*) em função da rotação e da tensão na bateria. O avanço da ignição é determinado inicialmente pelo mapa principal que gera o ângulo base de avanço em função das condições de carga e rotação do motor. Assim como no mapa principal de injeção é possível representar a solicitação de carga pela pressão no coletor de admissão ou pela posição da borboleta. Pode-se ainda aplicar um ganho sobre todo o mapa, individual ou para todos os cilindros, sendo esses disponibilizados em mapas individuais por cilindro, que permitem aplicar um ganho percentual ou em graus sobre o mapa principal. Podem ser ainda realizadas correções através de outras tabelas como, por exemplo, em função da temperatura do ar, temperatura do motor e pressão no coletor. O usuário pode escolher entre correções percentuais ou em graus adicionados ou subtraídos do avanço base.

3.9.1.5 Controle de marcha lenta

O controle da marcha lenta é feito por um controlador Proporcional Integral Derivativo (PID), onde o usuário ajusta os ganhos e a referência de rotação (*set point*). O sistema permite ainda um aumento do valor de referência durante o aquecimento do motor (*warm-up*). O módulo de controle de marcha lenta oferece também um parâmetro que substitui o ganho proporcional do controlador quando a rotação está muito abaixo da referência, com o objetivo de evitar o desligamento do motor. Determina ainda a abertura a ser dada no atuador de marcha lenta no momento do acionamento do ar-condicionado ou quando a direção hidráulica atinge seu fim de curso. Pode-se determinar também um limite para o integrador do PID, além de outros parâmetros específicos para o tipo de atuador de marcha lenta utilizado, que pode ser um servo motor com controle por PWM, ou um motor de passo.

3.9.1.6 Controle de Lambda

O controle de lambda depende do tipo de sensor de O_2 utilizado. No caso do sensor de banda larga (*Wide band*) é possível medir o valor de lambda, possibilitando ao

controlador calcular diretamente o ganho adotado para que o lambda medido seja igual a referência. Como o tempo gasto pelo transporte dos gases da câmara de combustão até o sensor e a constante de tempo do sensor são significativos, devem ser considerados na malha de controle para evitar uma correção da mistura antes da realimentação do sistema, o que promoveria sua instabilidade.

Deste modo, o módulo de controle de lambda utiliza um período de atualização da mistura, que depende do tempo de injeção de combustível (T_{inj}), sendo esta relação ajustada pelo usuário. Esta dependência com T_{inj} é importante para compensar a variação do tempo morto em função da rotação e da massa de combustível injetada. O usuário pode escolher o valor desejado para o lambda em todas as condições de operação do motor, através de um mapa, permitindo que o controlador opere em malha fechada para todas as condições de funcionamento do motor.

Já no caso de um sensor de O_2 convencional (*Narrow band*), somente é possível saber a condição da mistura ar/combustível, o que impossibilita o cálculo da correção aplicada, obtendo-se apenas a informação da necessidade de enriquecimento ou de empobrecimento da mistura. Deste modo, o controlador aumenta ou diminui o tempo de injeção de acordo com o estado do sensor, permitindo controlar o valor médio do lambda. O valor do ajuste percentual aplicado é proporcional ao tempo de injeção de combustível, sendo o fator de relação determinado pelo usuário que define também os pontos de operação nos quais o controlador deve ser desabilitado. Em condições de carga e rotação elevadas, que exigem um enriquecimento da mistura ar/combustível, deve-se desabilitar esse controlador para promover o enriquecimento da mistura. Com a utilização deste tipo de sensor, o módulo disponibiliza um parâmetro correspondente a um ganho a ser aplicado no tempo de injeção quando o sensor muda de estado, promovendo uma redução significativa na frequência de oscilação de lambda.

O sistema permite ainda que seja imposta uma diferença percentual entre o ajuste de enriquecimento e o ajuste de empobrecimento, permitindo um deslocamento no lambda médio, ou para compensar tempos de resposta diferentes do sistema. Em ambos os casos o usuário pode determinar limites para o ganho aplicado sobre o tempo de injeção base. Pode também aplicar um filtro sobre os valores medidos pelo sensor lambda, determinar a temperatura do motor para habilitação do controlador, além de definir um tempo de espera pós-partida do motor para considerar as leituras do sensor lambda como válidas.

3.9.1.7 Controle de Sobre-alimentação

A pressão de sobre-alimentação proveniente do compressor é controlada através de uma válvula de alívio da turbina (*waste gate*) que pode ser acionada pela pressão de saída do compressor. A introdução de uma válvula direcional permite ao usuário atuar diretamente no *duty cycle* da válvula de controle, através de um controlador PD, selecionando a pressão de referência nos pontos de operação do motor através de um mapa e ajustando os ganhos do controlador. A outra opção é atuar em malha aberta, através de um mapa onde o usuário seleciona o ciclo de trabalho (*duty cycle*) a ser aplicado na válvula de controle em todos os pontos de operação, sendo este o mais utilizado devido à facilidade de ajuste.

3.9.1.8 Controle de tração

O módulo de controle de tração permite realizar o controle do deslizamento das rodas e a limitação da rotação durante a arrancada do veículo. No controle de deslizamento, a ECU mede a diferença de velocidade entre as rodas acopladas ao eixo de tração e as rodas independentes. Realiza a limitação da quantidade de combustível ou da ignição caso o deslizamento superar uma referência pré-determinada que pode variar com a posição da borboleta, por exemplo. Para limitar a rotação durante a arrancada, pode-se limitar a rotação do motor em função da velocidade do veículo.

3.9.1.9 Outros Controladores

O controle eletrônico da borboleta (*Drive-by-Wire*) é realizado por um PID, que realiza o posicionamento da mesma através de um motor de corrente contínua. Portanto, a válvula borboleta não é comandada diretamente pelo usuário, mas pela própria ECU, que recebe o comando de aceleração como uma referência para o controlador. A marcha lenta é controlada pela própria borboleta eletrônica que, neste caso, gera a referência da posição da borboleta através do controlador PID de rotação do motor, quando o comando de aceleração está em zero. A grande vantagem desse controle é a eliminação da válvula de *by-pass* para controle de marcha lenta. O controle de sistemas com comando de válvula continuamente variável (*CVVT*) é feito através de um atuador que gira o eixo de comando de válvulas em relação à sua polia de acionamento. Um PID controla a posição do eixo de acordo com a referência do mapa, cujas entradas podem ser a rotação, posição da borboleta, pressão no coletor, velocidade do veículo, temperatura do motor ou dos gases de exaustão.

3.9.2 Sistema Haltech

A Haltech, assim como a MoTeC, é uma empresa australiana, criada em 1986, que desenvolve sistemas de gerenciamento eletrônico. Seus produtos são usados em diversas áreas, como na conversão de motores carburados para injetados, controle de injeção e ignição em motores modificados, aplicações em *rally*, corrida e centros de pesquisa, além de serem muito usados em motos, barcos, *jet skis*, *karts* e aviões. Seus principais produtos são as ECU's cuja característica é a flexibilidade de gerenciar vários tipos de motores. A Haltech fornece também acessórios como *kits* para controle de lambda linear, sensores, bobinas e módulos de ignição, solenóides de controle de sobre-alimentação (*over boost*), válvula de controle de marcha lenta e chicotes, entre outros.

A Haltech fornece basicamente quatro modelos de ECU's, sendo o F10X que realiza apenas controle de injeção, e os gerenciadores de ignição e injeção E6K, E8 e E11v2. Estes modelos diferem quanto ao número de entradas e saídas, memória, e nível de funcionalidades disponíveis. A análise realizada sobre estes sistemas está focada especificamente nas estratégias de controle adotadas.

As ECU's da Haltech suportam motores de até 8 cilindros com injeção seqüencial sincronizada, semi-sequencial ou *full group*, e ignição direta com até 6 bobinas ou com distribuidor, sendo que estas funcionalidades dependem de cada modelo. Os *drivers* de injeção podem comandar injetores de baixa ou alta impedância. As saídas de ignição são utilizadas para acionar os módulos de ignição, sendo que o controle do *dwell* realizado pela ECU ou pelo próprio módulo, depende do modelo. Uma desvantagem das ECU's da Haltech é o fato das saídas de ignição não suportarem o comando direto do primário das bobinas, necessitando de um *driver* para realizar essa função. As principais funcionalidades disponíveis são:

- Controle de marcha lenta;
- Controle de lambda;
- Controle de sobre-alimentação;
- Corte de combustível na desaceleração;
- Comando para sistema de válvulas variável (VTEC não variável continuamente);
- Limitação da rotação;
- Calibração dos sensores;
- Turbo timer;
- Sensor de pressão barométrica na placa.

Assim como na MoTeC, as centrais da Haltech buscam flexibilidade, e por isso aceitam diversos tipos de sensores, bastando para isso configurar os parâmetros adequadamente, com atenção especial aos sensores de sincronismo do motor, base de todo o sincronismo do sistema. Parâmetros permitem selecionar os tipos de sensores, calibrações, características do motor e estratégias usadas. Os exemplos mais importantes estão listados abaixo, sendo eles:

- Número de cilindros;
- Solicitação de carga do motor (pressão no coletor ou posição da borboleta);
- Tipo de sensor de sincronismo: efeito Hall, óptico e de relutância magnética;
- Sensor de fase para injeção seqüencial;
- Tipo de ignição (distribuidor ou direta);
- Tempo de carga das bobinas (*dwell time*);
- Rotação limite e tipo de limitação da rotação;
- Rotação de partida, acima do qual considera-se o funcionamento do motor;
- Temperatura de operação do motor;
- Unidades usadas para apresentar os dados;
- Faixa de rotação até 10500 RPM ou até 16000 RPM (Resolução dos mapas);
- Modo de injeção: seqüencial sincronizada, semi-seqüencial ou *full group*;

Com estes e vários outros parâmetros é possível adequar as ECU's a praticamente qualquer motor do mercado. Dentro desta filosofia de flexibilidade, os *drivers* de acionamento são genéricos, o que possibilita utilizar as saídas disponíveis em outras funções. Do mesmo modo são disponibilizadas entradas digitais e analógicas de propósito geral, que podem assumir funções diferentes de acordo com a configuração do usuário. Cada função atribuída às entradas e saídas requerem a configuração de parâmetros específicos, sendo algumas apresentadas e seguir.

- Comando do eletro-ventilador do sistema de arrefecimento;
- Aplicação de fatores de correção na injeção, ignição e sobre-alimentação;
- Sinais de comando para mudança de mapa;
- Luzes de troca de marcha (*shift light*);
- Comando para injeção de água no coletor de admissão (detonação);
- *Stall Saver* (válvula *by-pass* de ar, acionada na partida do motor);
- Habilitação da injeção de Óxido Nitroso (maior concentração de O₂ na admissão);
- Bomba de combustível auxiliar;
- Comando do ar condicionado (A/C);
- Comando de injetores extras;

- Comando do eletro-ventilador principal ou do *Intercooler*;
- Geração de pulsos para tacômetro;
- Comando para válvula de admissão secundária;
- Velocidade do veículo.

A Haltech disponibiliza um software de interface que permite ao usuário visualizar e alterar todos os parâmetros e variáveis do sistema. O programa utiliza sistema operacional Windows o que permite uma melhor visualização gráfica dos dados. A conexão com a central se realiza através de comunicação serial via interface RS-232. O sistema permite ao usuário armazenar dados de calibração no *PC* e depois enviá-los para a ECU, possibilitando ainda a alteração on-line dos valores dos parâmetros, tabelas e mapas, aquisição dos dados medidos e visualização de dados armazenados.

3.9.2.1 Estratégias

As estratégias utilizadas pelas ECU's da Haltech são muito semelhantes às da MoTeC, descritas anteriormente. Muitos mapas são idênticos e, deste modo, apresenta-se em detalhe apenas as características que diferem os sistemas.

3.9.2.2 Controle de Injeção

Para o controle da injeção tem-se um mapa base que relaciona o tempo de injeção com as condições de carga e rotação do motor. A condição da carga pode ser obtida tanto a partir da pressão no coletor quanto da posição da borboleta. Sobre este tempo base obtido aplicam-se os seguintes mapas de correção:

- Correção percentual em função da temperatura do motor;
- Correção percentual em função da temperatura e da pressão do ar;
- Correção percentual em função da tensão da bateria;
- Correção percentual em função da pressão barométrica;
- *Priming Map*: tempo de injeção a ser aplicado no primeiro ciclo do motor, de acordo com a sua temperatura (Partida a frio);
- *Enriquecimento pós-partida*: ganho percentual da mistura em função do tempo pós-partida do motor.
- *Mapa do ângulo de injeção*: Ângulo de injeção em função da rotação, sendo definido em relação ao início ou ao fim do pulso. Geralmente, adota-se o fim do pulso, de forma a sincronizar a injeção com a abertura da válvula de admissão.

- *Mapa do tempo de injeção em função da rotação na condição de borboleta fechada:* como os baixos valores de pressão no coletor são imprecisos e oscilatórios, instabilizando a malha de controle de marcha lenta. Neste caso, quando a posição da borboleta está abaixo de um valor pré-definido, desconsidera-se o mapa principal, e o tempo base de injeção passa a ser determinado por este mapa auxiliar.
- *Mapa do tempo de injeção em função da rotação em condições de plena carga:* Em motores aspirados a pressão no coletor pode atingir a pressão atmosférica antes que a condição de plena carga seja atingida, o que dificulta o ajuste do mapa nessa condição. Neste caso, quando a posição da borboleta está acima de um certo valor pré-definido, desconsidera-se o mapa principal, e o tempo base de injeção passa a ser determinado por este mapa auxiliar.

As ECU's da Haltech permitem ajustes de até $\pm 12.5\%$ em cada cilindro separadamente. Os circuitos de potência dos eletroinjetores são capazes de compensar a queda na tensão da bateria em uma determinada faixa de variação da tensão. Utiliza-se para tal uma tabela de compensação em função da tensão da bateria, para que seja feito um ajuste fino desta compensação. Observa-se que não é realizada a correção em função da pressão de combustível. Possibilita também a injeção por estágios, onde um segundo conjunto de injetores passa a ser acionado em uma determinada condição. Este tipo de injeção é usado quando os bicos não são capazes de fornecer a vazão necessária em todos os pontos de operação.

Uma estratégia de aceleração rápida também é disponibilizada, sendo fornecidos dois parâmetros de ajuste, o primeiro seleciona o incremento percentual a ser aplicado e o segundo determina a taxa percentual de descaimento do ajuste após cada ciclo, determinados por tabelas em função da rotação.

Além disso, o enriquecimento da mistura durante a aceleração rápida deve ser aumentado se a temperatura do motor estiver baixa, já que este fator também atrapalha a atomização do combustível. Assim é fornecida também uma tabela que gera um fator de correção percentual em função da temperatura do motor. O sistema oferece também a estratégia de corte do combustível durante a desaceleração (*fuel cutoff*), realizado quando a borboleta está completamente fechada e a rotação acima de um valor definido pelo usuário. Para que a transição seja suave, o ângulo de ignição é retardado suavemente antes que o combustível seja cortado. A variação deste ângulo segue uma rampa até que um valor definido seja atingido.

3.9.2.3 Controle de Ignição

Para o controle da ignição tem-se um mapa base que relaciona o avanço de ignição com a rotação do motor e a solicitação de carga (pressão no coletor ou posição da borboleta). A partir do ângulo de avanço base são aplicados os seguintes mapas de correção:

- *Temperatura do ar*: correção do ângulo de avanço de ignição em função da temperatura do ar, amplamente utilizado em motores sobre-alimentados para evitar a ocorrência da detonação;
- *Temperatura do motor*: correção do avanço em função da temperatura do motor visando principalmente melhorar as condições de partida a frio e de aquecimento do motor (*warm up*).

A compensação em função da variação da tensão da bateria não é necessária pelo fato da ECU não comandar diretamente a bobina de ignição. Como esse acionamento é realizado por um módulo de ignição, o ajuste pode ser feito individualmente para cada cilindro, com a disponibilidade do “*crank map*”, que gera o ângulo de avanço em função da temperatura do motor. O avanço de ignição é obtido a partir deste mapa quando o motor está em uma rotação abaixo do valor de referência de funcionamento do motor.

3.9.2.4 Controle de Marcha Lenta

O controle de marcha lenta é baseado em um controlador PID com diversos parâmetros auxiliares. O sistema pode atuar através de um motor de passo ou através de uma válvula acionada por *PWM*. As características desse sistema são:

- Número máximo de passos realizados pelo atuador;
- Rotação de referência em diferentes situações de temperatura do motor;
- Posição do atuador nas desacelerações (*Dash-Pot*) em função da temperatura;
- Posição alvo do atuador durante a partida (mantida até 3,0 s pós-partida);
- Posição mínima até a qual o motor de passo pode fechar em cada situação;
- Número de passos e rotação de referência na inserção de carga externa (A/C_{on}).

O sistema permite colocar o PID em malha aberta e habilitar o controle manual da posição do motor de passo. No caso atuadores de marcha lenta tipo “by-pass” (*By-pass Air Control Valve - BAC*) os parâmetros são análogos, porém baseados no ciclo de trabalho (*duty cycle*) aplicado pelo PWM de controle.

3.9.2.5 Controle de Lambda

As ECU's da Haltech realizam o controle de lambda independente do sensor de O₂ utilizado (*Wide/Narrow band*), desperdiçando as vantagens da utilização de sensores de banda larga, amplamente exploradas pela MoTeC. Sua estratégia de controle consiste em aplicar um ganho percentual, positivo ou negativo, no tempo de injeção de acordo com o estado do sensor de O₂, promovendo uma oscilação de lambda em torno do valor estequiométrico. Os parâmetros que controlam esta oscilação são o ganho percentual e o número de ciclos entre os cálculos do controlador, sendo a referência determinada pela tensão ou pela razão ar/combustível pré-definida. Os ganhos percentuais são limitados tanto no enriquecimento quanto no empobrecimento, visto que essa estratégia possibilita a correção de pequenas oscilações de mistura.

As condições de operação em malha fechada do controlador são definidas por três parâmetros: rotação mínima, rotação máxima e posição da borboleta máxima. No caso da MoTeC esta definição é muito mais ampla, devido à possibilidade de realização sobre todos os pontos de operação do motor. O controle em malha fechada é sempre desabilitado durante as acelerações rápidas e nas desacelerações (*fuel cutoff*). Existe a possibilidade de ajustar um tempo morto para o controlador em função do tempo de aquecimento do sensor pós-partida, mantendo-o em malha aberta.

3.9.2.6 Controle de Sobre-alimentação

O controle de pressão de sobre-alimentação é realizado através do controle da válvula de alívio do turbo-compressor (*waste gate*), definido por um controlador PID ou pela atuação direta no *duty cycle* da válvula. No primeiro caso, define-se a pressão de referência em função da rotação através de uma tabela. Já no segundo caso, atua-se em malha aberta através de um mapa que define o *duty cycle* aplicado na *waste gate* em todos os pontos de operação, controlando-se indiretamente a pressão no coletor.

3.9.2.7 Controle do diagrama de válvulas

O controle do comando de válvulas variável, fornecido pelas ECU's da Haltech, consiste apenas em atuar sobre uma eletroválvula de forma a controlar em dois estados (*On/Off*), não sendo o sistema capaz de fazer o comando continuamente variável, apresentado pela MoTeC. O usuário define condições de rotação e carga nas quais o comando de válvulas muda sua fase em relação ao enquadramento original.

3.10 Trabalhos desenvolvidos por outros Autores

Dentre os trabalhos consultados e citados ao longo do texto, destacam-se aqueles desenvolvidos com o objetivo comum de transpor a limitação imposta pelos SGEM comerciais e suas estratégias de controle. Todos eles forneceram informações de grande relevância para o desenvolvimento deste trabalho, fazendo parte dos passos dados até aqui nessa direção.

Kampelmühler *et al* (1993) e Schmitz *et al* (1994) apresentam métodos alternativos para automação do desenvolvimento de calibração de um sistema de gerenciamento eletrônico como propostas de substituição da metodologia convencional. Através da comunicação entre a ECU e a bancada dinamométrica são obtidos pontos ótimos de avanço de ignição em função do consumo específico de combustível e dos valores de NO_x emitidos. Apresentam como resultados, os tempos de desenvolvimento de uma calibração, comparando a capacidade do sistema em realizar essa tarefa com o tempo gasto por um aplicador utilizando o método convencional.

Pinto (2001) apresenta a implementação de um equipamento para testes de estratégias de injeção de combustível em motores de combustão interna com ignição por centelha, composto por um microcomputador (PC-AT Pentium), interfaces dedicadas à aquisição de dados, *drivers* de potência para acionamento dos eletroinjetores e filtros. Possui um controlador de marcha lenta PI, com ajuste da referência em função da temperatura do motor. Realizou testes em um motor comercial de baixa cilindrada (1000 cm³) controlado por sistema de injeção monoponto em malha aberta, em função da pressão absoluta do coletor. Inclui correções em função da temperatura do motor, da posição da borboleta e enriquecimento na partida. Apresenta testes de resposta ao degrau para obtenção de um modelo de 1ª ordem da rotação em função da posição do atuador de marcha lenta na condição de aceleração (abertura do atuador) em condição de mistura rica. Utiliza como perturbação a abertura e fechamento da borboleta, sem aplicação de carga no eixo, nem em condições de desaceleração. Como resultado, cita que o sistema apresentou desempenho satisfatório, com tempo de cálculo da ordem de 300us e possibilidade de implementação de estratégias de injeção para sistemas monoponto e multiponto com limitações (*hardware*), apesar de falhas durante as acelerações rápidas e desligamento espontâneo do motor em condições de desaceleração (fechamento da borboleta). Associa o elevado consumo de combustível à condição de mistura rica necessária à realização dos testes.

Baeta *et al* (2004) apresentam uma metodologia de calibração de um motor em bancada dinamométrica utilizando sistemas de gerenciamento eletrônico parametrizáveis. Mostram todas as etapas de otimização da calibração além dos parâmetros de relevância associados.

Braga (2004) realizou o desenvolvimento e implementação de um sistema de identificação de detonação em motores de combustão interna de ignição por centelha. O objetivo desse trabalho é possibilitar o monitoramento do fenômeno de detonação durante a realização de ensaios dinamométricos e que possibilitasse uma realimentação desse sinal no caso de um funcionamento autônomo do SGEM. Mostra ainda que a identificação da detonação é possível a partir da análise do sinal de vibração estrutural medido por um sensor piezelétrico fixado ao bloco do motor, realizada por meio de um algoritmo de DFT em tempo real que calcula a potência espectral das frequências características da detonação, determinando assim a ocorrência desse fenômeno.

Vossounghi *et al* (2004) apresentam o desenvolvimento de um modelo computacional, desenvolvido em MatLab, com o objetivo de eliminar o trabalho extenso e complexo de calibração de um sistema de gerenciamento eletrônico em dinamômetro de rolos. O modelo desenvolvido é baseado na metodologia de modelagem em caixa preta (*black-box model*) sendo o mesmo integrado ao modelo de um veículo, utilizado no processo de otimização. O processo de modelagem aplica técnicas de obtenção de um modelo de múltiplas entradas e múltiplas saídas (MIMO). As entradas utilizadas no modelo do motor são a rotação, a carga, o fator Lambda e avanço de ignição. Já as saídas do modelo são o Torque desenvolvido pelo motor, o consumo específico de combustível e os valores de emissões obtidos em medição segundo um ciclo específico (NEDC). O modelo do veículo é definido por uma equação matemática que define a força total ao deslocamento em função da velocidade do veículo, peso, coeficiente de resistência aerodinâmica e resistência de rolamento dos pneus. São aplicadas diferentes técnicas de otimização.

São mostrados como resultados, diferentes possibilidades de minimização do consumo específico de combustível mostrando grandes vantagens na redução do tempo de calibração de um sistema de gerenciamento eletrônico. Os autores apresentam otimizações do sistema não só para o ciclo apresentado (NEDC) como para diferentes ciclos propostos.

Carvalho (2005) já apresenta definições da arquitetura de uma central eletrônica para controle da ignição e da injeção de combustível em motores de combustão interna, onde define toda a arquitetura física da ECU, com o projeto dos circuitos de medição e acionamento dos atuadores, circuitos digitais de processamento dos dados e interface de comunicação (IHM). São apresentados procedimentos de calibração dos sensores e testes de validação dos circuitos de comando dos atuadores. Cita que foram desenvolvidos os módulos básicos de software para medição das variáveis e geração dos comandos dos atuadores, seguida da implementação de uma estratégia simples de controle para validar todo o sistema.

Baeta (2006) apresenta a metodologia de calibração de um motor multicomcombustível turboalimentado, como objetivo de otimizar o seu desempenho. Mostra ainda que a medição e análise da pressão no cilindro descrevem importantes parâmetros da combustão como turbulência, velocidade de propagação de chama. Apresenta ainda a análise da combustão de um motor de ignição por centelha, detalhando as velocidades de propagação de chama nas versões aspiradas e turboalimentada do mesmo motor.

Braga (2007) apresenta o desenvolvimento de estratégia de controle de injeção, ignição e rotação de um MCI na condição de marcha lenta. Cita que apesar da dinâmica complexa e não-linear do motor, a condição de marcha lenta possibilita a adoção de técnicas clássicas de controle, baseadas em controladores PI em paralelo com estratégias de ação direta (*feedforward*) para rejeição às perturbações e desacoplamento de malhas.

Mostra ainda, através da realização de testes com motor em bancada, que as estratégias desenvolvidas são capazes de manter o funcionamento correto do motor, com baixo nível de emissões e consumo, mesmo com a aplicação de perturbações externas, inerentes ao funcionamento dos motores de combustão interna.

3.11 Considerações Finais

A principal função de um sistema de gerenciamento eletrônico de motores (SGEM) é fornecer o torque requerido pelo condutor enquanto assegura economia de combustível, maximiza a vida útil e reduz a emissão de poluentes. Os avançados sistemas existentes no mercado são capazes de controlar todos os parâmetros de funcionamento do motor, assegurando a obtenção dos objetivos citados, que traduzem em um maior desempenho do motor nas regiões de economia de combustível, conforto e dirigibilidade.

A necessidade em se obter calibrações para cada veículo implica na disponibilidade de equipamentos para o desenvolvimento dos MCI's, cujo principal objetivo é o levantamento das calibrações aplicadas aos veículos em produção. Apesar do elevado número de fabricantes desses sistemas, seja para o desenvolvimento de veículos de série ou de protótipos em número reduzido, estes não estão disponíveis às instituições de ensino superior ou de pesquisa a um custo acessível, o que limita muitas vezes o desenvolvimento de pesquisas independentes em Engenharia Automotiva.

Além do custo de aquisição, outro fator de grande relevância dos SGEM existentes é a limitação das estratégias de controle que, por serem implementadas pelos seus fabricantes visam, em sua maioria, uma aplicação genérica para diferentes motores. A grande flexibilidade dos sistemas apresentados anteriormente não tem o objetivo de possibilitar o desenvolvimento de novas estratégias de controle, sendo limitada à parametrização de tabelas e mapas. Isso restringe a aplicação desses sistemas, permitindo somente ao fabricante a implementação e validação de novas estratégias de controle, mesmo que o problema associado ao custo seja superado.

Quando o termo “central aberta” ou “central programável” é mencionado, oculta-se o fato de que as estratégias de controle utilizadas não são acessíveis ou modificáveis nos sistemas comerciais. O nível de acesso encontrado em todas as centrais eletrônicas aqui descritas é restrito à parametrização e não à programação. Os códigos utilizados pelos sistemas comerciais existentes continuam sendo, para os usuários final, um bloco de entradas e saídas parametrizáveis (caixa preta), que não permitem o acesso ao *software* de controle.

A importância do projeto de um sistema de gerenciamento eletrônico programável de ignição e injeção de combustível, como apresentado no presente trabalho, é o domínio da tecnologia e o acesso à programação do software de controle, permitindo que novas estratégias possam ser propostas e testadas de forma a validar novas tecnologias aplicadas aos MCI's. A arquitetura desse sistema deve ser capaz de realizar alterações na calibração original e nas estratégias de controle associadas ao gerenciamento eletrônico de um MCI.

Por essas razões, e principalmente pela motivação de superar desafios, desenvolver e dominar tecnologias puramente nacionais, pesquisadores e alunos de Engenharia da UFMG, em parceria com o CETEC, buscam soluções científicas e tecnológicas para a realização de estudos sobre novos conceitos aplicados a motores de combustão interna, bem como alternativas de combustíveis potenciais para essa aplicação. A importância desse desenvolvimento se apóia principalmente na busca pelo domínio científico e pela integração das Engenharias Mecânica, Elétrica, Eletrônica e de Controle e Automação em torno da Engenharia Automotiva, sustentada sobre esses segmentos.

Por se tratar de uma tarefa multidisciplinar, existe um esforço de um grupo de pessoas com diferentes opiniões e formações acadêmicas, impulsionando cada vez mais o crescimento do conhecimento e o seu aprofundamento, tanto no contexto mecânico, quanto no que diz respeito ao desenvolvimento eletrônico de novas tecnologias embarcadas.

Os estudos já realizados pelo Laboratório de Motores do Departamento de Engenharia Mecânica (DEMEC) da UFMG em parceria com o Laboratório de Ensaio de Motores (LEM) da Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais (CETEC) apresentaram resultados satisfatórios dentro do proposto pelo trabalho. Em todos os casos, a utilização de um sistema de gerenciamento eletrônico programável possibilitaria uma análise mais aprofundada dos parâmetros de desempenho de um motor de combustão interna e, dessa forma, a obtenção de resultados ainda mais conclusivos sobre esses experimentos.

Dentro dessa possibilidade e devido à "limitação" imposta pela implantação em massa dos sistemas de gerenciamento eletrônico nos veículos em produção, pesquisadores e alunos envolvidos nesse desenvolvimento se dedicam a projetar, construir e testar sistemas de gerenciamento programáveis.

CAPÍTULO 4

METODOLOGIA

O desenvolvimento do projeto proposto foi iniciado com uma revisão bibliográfica e a definição de diretrizes. A primeira delas é a especificação e posterior seleção dos componentes aplicados ao sistema de gerenciamento eletrônico embarcado. Considerou-se que a fonte de alimentação primária de todos os circuitos é proveniente da bateria, capaz de fornecer valores de tensão contínua em relação à carroceria do veículo (Massa) que variam de 12,0 a 14,0 volts em condições normais de operação (veículos de passeio e/ou comerciais leves). Os componentes que necessitam de alimentação de tensão simétrica, como os amplificadores operacionais dessa natureza, não são comumente aplicados a esses sistemas.

Outro fator de grande relevância na especificação e seleção dos componentes é a inevitável exposição a vibrações, variações de temperatura, ruídos internos e externos e interferências eletromagnéticas. Por essas razões, optou-se pela aplicação de componentes comerciais, aptos a suportar as condições impostas. O principal objetivo dessa especificação é o aumento da robustez e da confiabilidade dos sistemas de controle implementados. Uma atenção especial foi dada na fase de projeto, priorizando a implementação de circuitos de proteção interna contra curtos, picos de tensão, correntes e tensões induzidas.

A escolha dos componentes do sistema de controle, assim como a interface homem-máquina (IHM) e os softwares de controle desenvolvidos, partiram do conceito de possibilitar a utilização do sistema de gerenciamento eletrônico implementado em motores com diferentes sensores e atuadores, desde que as suas funções de transferência fossem conhecidas e validadas, tornando-o intercambiável. Para tal, optou-se pelo aproveitamento de sensores e atuadores presentes nos sistemas de gerenciamento eletrônico convencionais, o que requer do sistema implementado a capacidade de conter a configuração de diferentes tipos de sensores e atuadores, dispensando o projeto, construção e/ou adaptação desses componentes. Uma das características do sistema desenvolvido é a possibilidade de adequação dos sinais de

entrada (Tabela IV.1) e de comando (Tabela IV.2), de forma que as modificações sejam realizadas por meio de tabelas e curvas de calibração descritas em arquivos próprios para tal finalidade. Vale aqui ressaltar que todas as configurações desse sistema intercambiável requerem que as tabelas e curvas de calibração possuam uma incerteza condizente com o sensor e seu respectivo mensurando.

Devido à disponibilidade de sistemas de gerenciamento eletrônico do tipo semi-seqüencial, de sensores e atuadores compatíveis e de motores em condição de operação, optou-se pelo desenvolvimento de um sistema de injeção capaz de operar segundo as mesmas estratégias descritas nos Itens 3.4 e 3.5, visando facilitar a intercambialidade durante a execução de testes comparativos. A Metodologia proposta, com base nas características e estratégias citadas, é composta pelas etapas a seguir.

4.1 Definição do Micro-processador

A definição do micro-processador (*Control Processor Unit - CPU*) a ser utilizado foi a primeira etapa realizada, onde se considerou a disponibilidade desse componente no mercado nacional, suas características técnicas, linguagem de programação, domínio de suas funções e custo de aquisição, além das características apresentadas anteriormente. No intuito de parametrizar o sistema em projeto, realizou-se um levantamento de todos os sensores presentes em um sistema de gerenciamento eletrônico convencional, classificando-os pela natureza do sinal de resposta, como apresentado na Tabela IV.1.

Tabela IV.1 – Descrição dos sensores e natureza dos sinais medidos.

Item:	Descrição:	Sinal:	Natureza:	Tipo de sensor:
01	Temperatura do ar no coletor de admissão	Tensão contínua	Analógico	Termo-resistência (NTC)
02	Pressão do ar no coletor de admissão	Tensão contínua	Analógico	Sensor de pressão diferencial
03	Temperatura do líquido de arrefecimento	Tensão contínua	Analógico	Termo-resistência (NTC)
04	Posição da válvula borboleta	Tensão contínua	Analógico	Potenciômetro linear
05	Concentração de Oxigênio no coletor de escapamento	Tensão contínua	Analógico	Eletrodos de platina separados por óxidos ativos de TiO ₂ ou ZrO ₂
06	Velocidade angular e posição do eixo de manivelas	Tensão alternada	Pulsos (frequência)	Sensor indutivo
07	Sensor de Fluxo de Ar	Tensão contínua	Analógico	Potenciômetro linear

De forma similar, a Tabela IV.2 apresenta os atuadores de um sistema de gerenciamento eletrônico convencional, juntamente com o tipo de controle a ser implementado para operação.

Tabela IV.2 – Descrição dos atuadores e dos sinais de comando.

Item:	Descrição:	Sinal de comando:
01	Eletroinjeter de combustível (cilindros 1-4)	Modulação em Largura de Pulso (<i>PWM</i>)
02	Eletroinjeter de combustível (cilindros 2-3)	Modulação em Largura de Pulso (<i>PWM</i>)
03	Bobina de Ignição (cilindros 1-4)	Modulação em Largura de Pulso (<i>PWM</i>)
04	Bobina de Ignição (cilindros 2-3)	Modulação em Largura de Pulso (<i>PWM</i>)
05	Bomba de combustível	Nível Lógico (<i>I/O</i>)
06	Eletroválvula de purga do sistema evaporativo (canister)	Nível Lógico (<i>I/O</i>)
07	Lâmpada de anomalia	Nível Lógico (<i>I/O</i>)

O início do desenvolvimento de um sistema de controle micro-processado é realizado com a utilização de placas de desenvolvimento (*development kits*), onde diferentes tipos de micro-controladores são montados em placas específicas que disponibilizam suas funções de maneira simples e de fácil conexão. Suas características técnicas devem ser compatíveis com as apresentadas nas Tabelas IV.1 e IV.2, em relação ao número de entradas analógicas, de frequência (pulsos) e ao número de comandos de saída em modulação de largura de pulsos (*PWM*) e de Níveis Lógicos (*I/O*).

Em função dessas características, o micro-controlador escolhido para a realização dos trabalhos é fabricado pela *Texas Instruments*, Modelo TMS320F2407A. Os micro-controladores dessa família oferecem às placas de desenvolvimento modelo TMS320DSP, alto desempenho a um custo e um consumo de energia reduzido. Todos os sistemas periféricos presentes são otimizados para aplicações de controle digital, de modo a promover um único componente integrado com as funções descritas. Oferecem ainda algumas opções de memória e diferentes sistemas periféricos confeccionados para atingir a melhor condição custo/benefício para diferentes aplicações.

As memórias do tipo *Flash*, onde as rotinas implementadas são armazenadas, possuem até 32 *keyword*. Possuem 16 canais de entradas analógicas com conversor analógico-digital de 10 bits (*A/D*) e tempo de conversão de 375 *ns* por canal. Sua capacidade de realizar as conversões utilizando uma estratégia de auto-sequência, permite que os 16 canais de entrada sejam convertidos em uma única sessão sem prejudicar o desempenho da *CPU*. Uma interface de comunicação serial foi integrada nas placas para disponibilizar um protocolo de comunicação entre dispositivos do sistema.

Para o desenvolvimento do presente trabalho em especial, foram estabelecidos alguns objetivos no que diz respeito aos sinais, sensores e atuadores a serem utilizados, de forma a possibilitar a intercambialidade com o sistema de gerenciamento eletrônico original utilizado pelo motor em teste. Dessa forma, durante os testes de validação do sistema de gerenciamento programável desenvolvido, foram realizados ensaios comparativos utilizando o mesmo motor com todos os sensores e atuadores originais, modificando apenas o sistema de controle, como objeto de estudo.

4.2 Definição dos Sensores e Sinais correspondentes

4.2.1. Velocidade angular e posição do eixo de manivelas

Pode-se definir a posição do pistão em relação ao Ponto Morto Superior (PMS) do cilindro em função da posição angular instantânea do eixo de manivelas, conhecidos o número de cilindros e a sua disposição em relação ao bloco do motor. Para motores monocilíndricos, por exemplo, o pistão atinge o PMS uma vez a cada volta completa desse eixo (360°). Supondo um motor de 04 cilindros dispostos em linha ou contra-postos, o PMS será atingido a cada meia volta do eixo de manivelas (180°), alternando entre os pares de cilindros 1–4 e 2–3, respectivamente. À medida que o número de cilindros aumenta aos pares, a posição angular do eixo de manivelas passa a ser menor.

Para motores quatro cilindros de quatro tempos o movimento alternativo ocorre de maneira sincronizada, sendo que pistões 1 e 4 se encontram na mesma posição durante os ciclos, em tempos diferentes (pistões gêmeos). Apesar de apresentar o mesmo comportamento, os pistões 2 e 3 estão defasados de 180° em relação aos pistões 1 e 4.

Dessa forma, foram definidas as estratégias de medição da rotação do motor e da posição dos pistões em relação ao Ponto Morto Superior (PMS) do pistão do 1º cilindro (quatro cilindros). Devido à posição dos outros pistões ser acoplada fisicamente a esse pistão, a estratégia de identificação dessa posição foi elaborada considerando sempre que os pistões 2 e 3 são defasados de 180° em relação aos pistões 1 e 4.

Diferentes são as formas apresentadas pelos fabricantes para realizar essa identificação. Dentre elas, optou-se pelo sistema indutivo, onde a medição da rotação instantânea do motor é realizada através de um sensor indutivo composto por um ímã permanente e um indutor (bobina) incorporados em um único cartucho hermético (1). Esse sensor fornece, em função do deslocamento relativo de uma polia dentada (2) solidária ao eixo de manivelas, uma tensão alternada com frequência e amplitude proporcionais à rotação desenvolvida (3), como mostra a Figura 4.1.

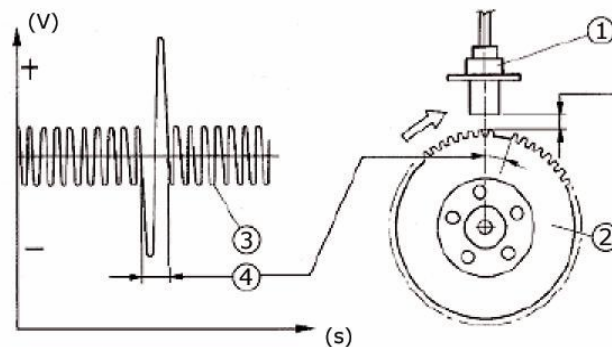


Figura 4.1 – Medição da posição e rotação do eixo de manivelas (Adler, 1993).

Através desse sinal é possível sincronizar os pulsos de ignição e injeção com o movimento alternativo dos pistões do motor devido à presença de uma falha equivalente a 2 dentes na roda dentada (4). Na maioria dos sistemas, essa falha está alinhada com o sensor no 20º dente antes dos pistões dos cilindros 1 e 4 atingirem o PMS. Esse sinal (a) é introduzido ao circuito condicionador (Figura 4.2) para transformar a onda senoidal em uma onda quadrada com amplitude máxima de 3,3 V (b), como mostrado na Figura 4.3.

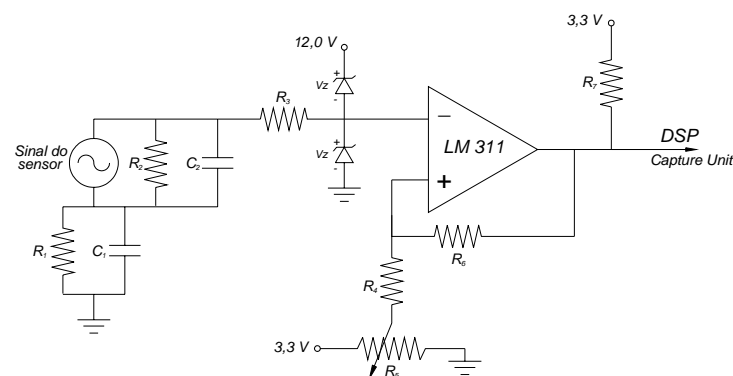


Figura 4.2 – Circuito condicionador do sinal de rotação.

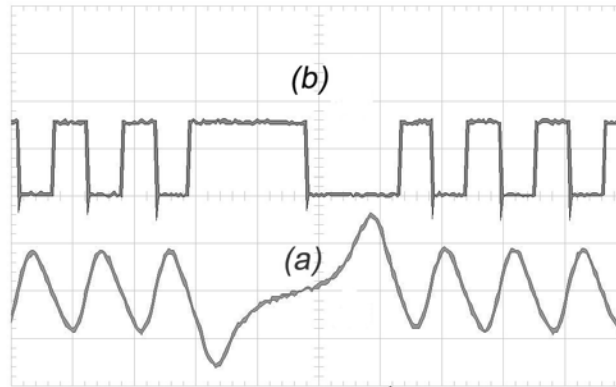


Figura 4.3 – Sinal de entrada (a) e de saída (b) do circuito condicionador.

4.2.2. Temperatura do ar no coletor de admissão

A temperatura do ar no coletor de admissão é medida através de um termistor, associando diferentes valores de tensão à variação de temperatura no elemento. O termistor utilizado possui um coeficiente negativo de temperatura (NTC) que apresenta uma variação de resistência inversamente proporcional à temperatura. Assim como no sinal de rotação, o sinal de temperatura proveniente do sensor é condicionado (amplificado e filtrado) em um circuito elaborado especificamente para esta função.

A escolha dos componentes presentes no circuito condicionador do sinal de temperatura, em especial do amplificador operacional (OPA 2350), foi realizada de forma a respeitar as condições impostas em 4.1. A Figura 4.4 apresenta um diagrama esquemático desse circuito. Vale aqui ressaltar que a tensão máxima admissível na entrada do canal analógico do *DSP* é de 3,3V, sendo esse o limite de tensão de alimentação de todos os sensores.

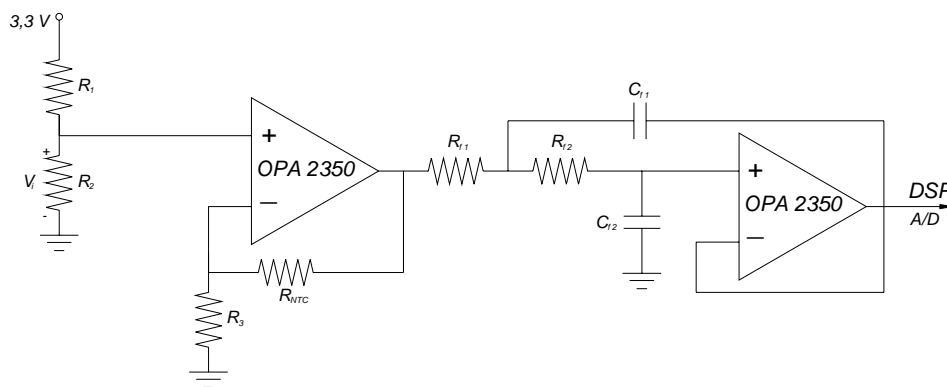


Figura 4.4 – Circuito condicionador do sinal de temperatura do ar na admissão.

A tensão de saída do divisor de tensão (V_i), formado pelas resistências R_1 e R_2 , é introduzida na entrada não-inversora do amplificador operacional, sendo seu valor nominal calculado por meio da seguinte equação (Carvalho, 2005):

$$V_i = 3,3V \cdot \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} \right) \quad (4.1)$$

A corrente (I_i) imposta pela tensão V_i sobre a resistência do sensor de temperatura (R_{NTC}) pode ser então calculada pela seguinte equação (Carvalho, 2005):

$$I_i = \frac{V_i}{R_3} \quad (4.2)$$

Dessa forma, a variação na resistência do sensor (R_{NTC}), promovida pela mudança na temperatura, representa uma variação da tensão na saída do amplificador operacional, descrita pela equação (Carvalho, 2005):

$$V_o = \left[1 + \frac{R_{NTC}}{R_3} \right] \cdot V_i \quad (4.3)$$

O circuito condicionador (Figura 4.4) possui ainda um filtro ativo tipo Butterworth, com frequência de corte de 100 Hz (passa baixa), visando eliminar os ruídos provenientes no sinal de tensão amplificado (V_o).

A curva de calibração do sensor utilizado foi determinada de forma a correlacionar o valor da tensão de saída em função da temperatura do elemento resistivo, sendo o sistema de medição calibrado a partir de um padrão estabilizado (banho de álcool e de silicone) nas mesmas condições de alimentação e de conexão de operação sistema, visando minimizar as incertezas.

A Tabela IV.3 apresenta os pontos obtidos durante a calibração do sensor realizada no Laboratório de Termometria (Labkelvin) do CETEC e as incertezas de medição associadas aos padrões utilizados.

Tabela IV.3 – Dados de calibração do sensor de temperatura do ar de admissão.

<i>Leitura:</i>	<i>Temperatura estabilizada [°C]:</i>	<i>Medida padrão [°C]:</i>	<i>Incerteza do padrão [%]:</i>	<i>Banho:</i>	<i>Tensão medida DSP [V]:</i>
01	0,0	0,09	0,05%	Álcool	3,28
02	10,0	10,25			2,08
03	20,0	20,14			1,39
04	30,0	30,10			0,98
05	40,0	40,23			0,72
06	50,0	50,10			0,55
07	60,0	60,21	0,46%	Silicone	0,45
08	70,0	70,06			0,38
09	80,0	80,02			0,33
10	90,0	90,09			0,30
11	100,0	100,08			0,27

A Tabela IV.3 mostra que foram utilizados, durante a calibração, dois padrões de temperatura com incertezas diferentes. Isso se deve ao fato de que a faixa de calibração requerida pelo sistema de medição necessitava de condições estabilizadas de 0,0 a 100,0 °C, somente possíveis de serem realizadas em banhos de calibração diferentes. A Figura 4.5 apresenta a curva de tensão em função da temperatura do sensor, obtida durante os ensaios de calibração.

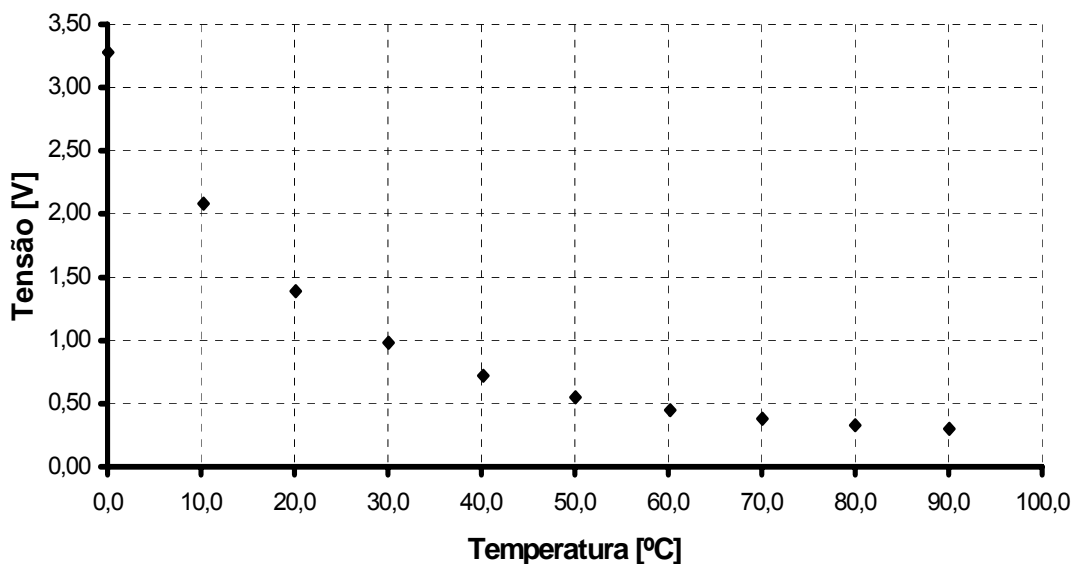


Figura 4.5 – Pontos de calibração do sensor de temperatura.

Os pontos intermediários aos mostrados na curva de calibração são obtidos por meio de interpolação linear, segundo o seu princípio geral, onde as coordenadas de um ponto intermediário são obtidas a partir da equação da reta descrita entre os pontos

circunvizinhos. Essa característica é aplicada em todos os sensores não-lineares de natureza analógica apresentados na Tabela IV.1. Na Figura 4.6 é apresentado um exemplo do tipo de interpolação utilizado para encontrar as coordenadas do ponto (T_n, V_n) a partir dos pontos (T_0, V_0) e (T_1, V_1) da calibração do sensor em questão.

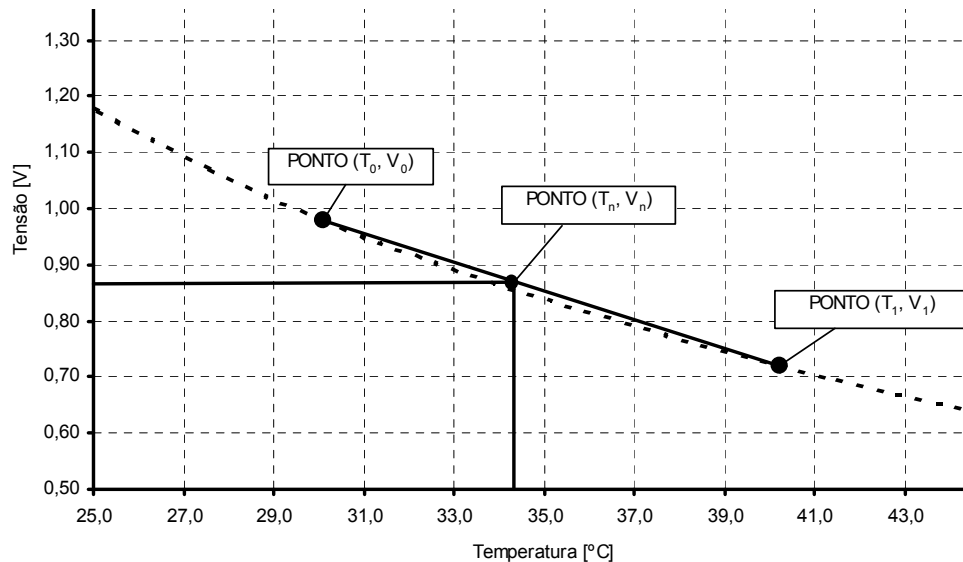


Figura 4.6 – Interpolação dos pontos da curva de calibração dos sensores.

A Equação utilizada na interpolação linear é do tipo $y = ax+b$ sendo o valor de tensão medida pelo sistema de aquisição e o valor da temperatura obtido segundo a equação (Carvalho, 2005):

$$T_n = T_0 + \frac{(V_0 - V_1)}{(T_0 - T_1)} \cdot (V_n - X_0) \quad (4.4)$$

4.2.3. Temperatura do líquido de arrefecimento

De forma similar ao sensor de temperatura do ar de admissão, a temperatura do líquido de arrefecimento é medida através de um termistor com coeficiente negativo de temperatura (*NTC*). O sinal de temperatura do líquido de arrefecimento proveniente do sensor também é condicionado (amplificado e filtrado) em um circuito elaborado especificamente para esta função. Por se tratarem de sensores similares, utilizou-se o mesmo circuito apresentado na Figura 4.4.

Essa variável tem por objetivo informar ao sistema de gerenciamento eletrônico do motor sua condição de temperatura. É utilizada como parâmetro de ajuste do SGEM do motor como, por exemplo, na correção dos mapas de tempo-base de injeção em condições de partida a frio em sistemas convencionais ou multi-combustíveis (Sistema *Flex*), nas estratégias de correção de avanço, de controle de detonação e até mesmo no controle de velocidade do eletroventilador do sistema de arrefecimento (relés ou *PWM*).

A curva de calibração do sensor utilizado foi determinada a partir de um padrão estabilizado (banho de álcool e de silicone) nas mesmas condições de alimentação e de conexão de operação sistema. A Tabela IV.4 apresenta os pontos obtidos durante a calibração do sensor realizada no Laboratório de Termometria (Labkelvin) do CETEC e as incertezas de medição associadas aos padrões utilizados.

Tabela IV.4 – Dados de calibração do sensor de temperatura do ar de admissão.

Leitura:	Temperatura estabilizada [°C]:	Medida padrão [°C]:	Incerteza do padrão [%]	Banho:	Tensão medida DSP [V]:
01	0,0	0,09	0,05%	Álcool	3,28
02	10,0	10,25			2,08
03	20,0	20,14			1,39
04	30,0	30,10			0,98
05	40,0	40,23			0,72
06	50,0	50,10			0,55
07	60,0	60,21	0,46%	Silicone	0,45
08	70,0	70,06			0,38
09	80,0	80,02			0,33
10	90,0	90,09			0,30
11	100,0	100,08			0,27
12	110,0	110,12			0,23
13	120,0	120,03			0,19

A Tabela IV.4 mostra dois padrões de temperatura utilizados na calibração. Isso se deve à diferença na faixa de calibração requerida pelo sistema de medição em condições estabilizadas de 0,0 a 120,0 °C, sendo somente possíveis de serem realizadas em banhos de calibração diferentes. Já a Figura 4.7 apresenta a curva de tensão em função da temperatura do sensor, obtida durante os ensaios de calibração.

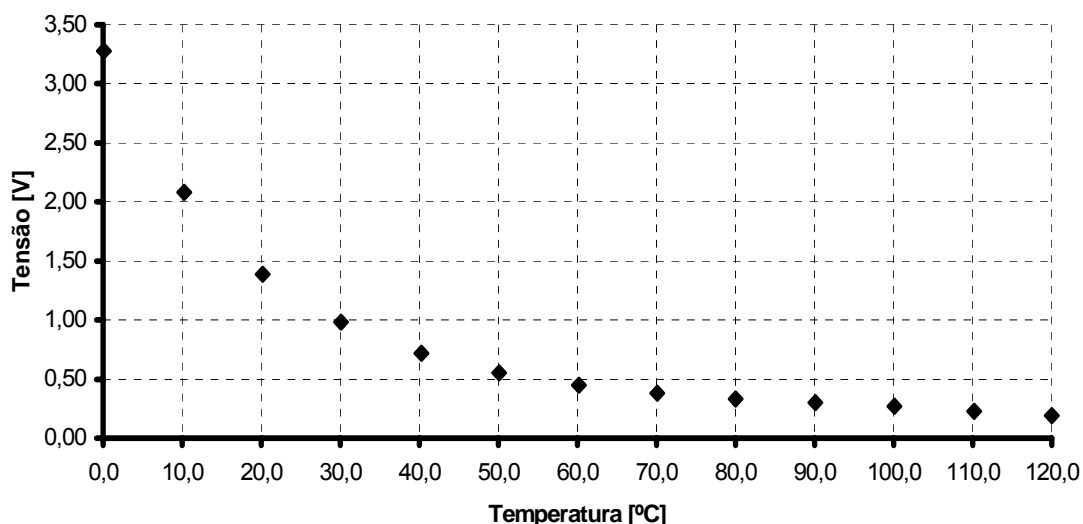


Figura 4.7 – Pontos de calibração do sensor de temperatura do líquido de arrefecimento.

4.2.4. Pressão do ar no coletor de admissão

Como mostrado no Capítulo 3, a pressão absoluta do coletor ($p_{a,i}$) é utilizada para a determinação da vazão mássica de ar no coletor e como referência da condição de carga imposta ao motor. Essa medição de pressão absoluta permite que o sistema de gerenciamento corrija os parâmetros atrelados a este sinal em função das variações de pressão atmosférica em diferentes localidades.

Para esta aplicação, optou-se pela utilização de um transdutor extensométrico (*strain gauge*) amplamente utilizado em sistemas de gerenciamento eletrônicos convencionais que possui, em um mesmo cartucho hermético, um extensômetro e um circuito condicionador que fornece, quando alimentado com 5,0 V, uma saída de tensão de 0 a 5,0V, linearmente proporcional à pressão do coletor de admissão (Item 3.2).

Como o nível de tensão máxima admissível na entrada do canal analógico do *DSP* é de 3,3 V, foi necessária a elaboração de um circuito condicionador específico composto por um divisor de tensão para adequação desse sinal. Esse circuito possui ainda um filtro ativo tipo Butterworth de 2ª Ordem, com frequência de corte de 10 Hz (passa baixa), visando eliminar os ruídos provenientes no sinal de tensão amplificado e atenuar as flutuações no sinal do transdutor de pressão, causadas pelo movimento alternativo dos pistões, abertura e fechamento das válvulas. A Figura 4.8 apresenta um diagrama esquemático desse circuito visando a adequação do sinal do sensor para a entrada analógica do *DSP*.

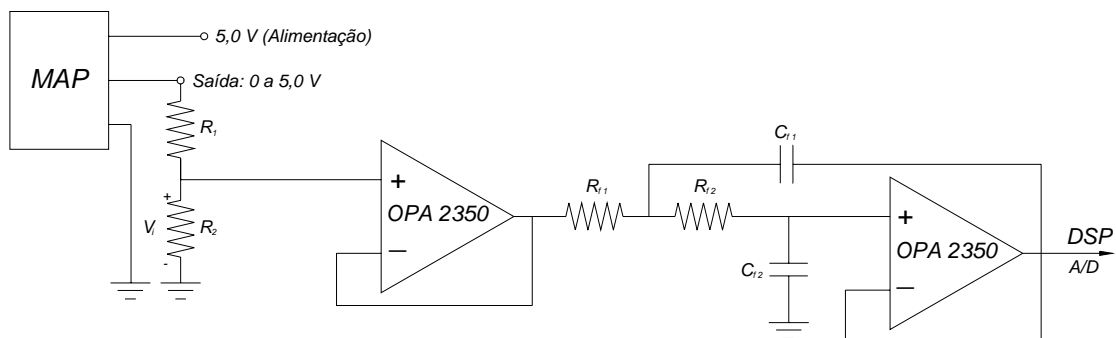


Figura 4.8 – Circuito condicionador do sinal de pressão absoluta do coletor de admissão.

A curva de calibração foi determinada a partir de um padrão secundário de pressão, sendo o sensor montado nas mesmas condições de alimentação, de conexão e de operação do sistema. A Tabela IV.5 apresenta os pontos obtidos durante a calibração do sensor realizada no Laboratório Isaac Newton do CETEC, juntamente com a incerteza de medição associada.

Tabela IV.5: Dados de calibração do sensor de pressão absoluta.

Leitura:	Pressão Abs. Exercida [mmHg]:	Incerteza do padrão [%]	Tensão medida DSP [V]:
01	150,4	± 0,27	0,25
02	225,0		0,59
03	299,4		0,93
04	375,3		1,27
05	450,0		1,62
06	525,2		1,96
07	600,4		2,30
08	637,6		2,47
09	675,7		2,64
10	693,2		2,73
11	712,5		2,82
12	725,5		2,88
13	747,9		2,98
14	784,7		3,14

Os pontos intermediários aos mostrados na curva de calibração são obtidos por meio de uma aproximação por uma equação de primeira ordem do tipo $y = ax + b$, onde as coordenadas de um ponto intermediário são obtidas a partir dessa equação. A Figura 4.9 apresenta a curva de tensão em função da pressão exercida no sensor, obtida durante os ensaios de calibração, a equação da reta obtida e o fator de linearização (R^2).

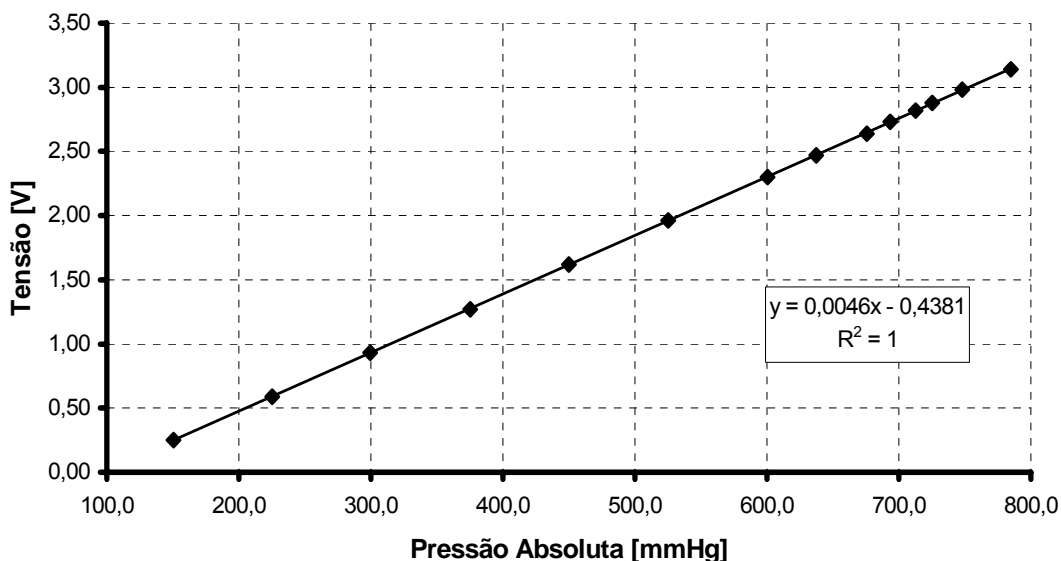


Figura 4.9 – Curva de calibração do sensor de pressão absoluta.

4.2.5. Posição da válvula borboleta

Este sensor é formado por um potenciômetro linear de três vias, acoplado ao eixo da válvula borboleta onde, mediante o movimento da mesma, varia a resistência entre seus bornes informando assim ao micro-controlador sua posição instantânea. Esse sinal é utilizado como indicação da carga solicitada ao motor e como valor de referência para os mapas de avanço de ignição e de percentual de tempo de injeção durante o funcionamento do motor.

Por se tratar de um componente comercial e de resposta linear, optou-se por utilizá-lo no sistema de gerenciamento eletrônico, adequando o sinal de referência à entrada analógica do DSP. A tensão de alimentação do sensor de posição fornecida pelo sistema original de 5,0 V foi substituída pela tensão de 3,3 V proveniente de uma fonte externa ao DSP e inserida no circuito condicionador, mostrado na Figura 4.10.

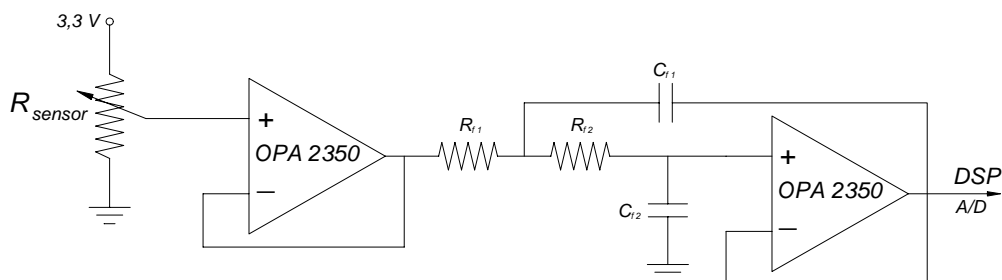


Figura 4.10 – Circuito condicionador do sinal do sensor de posição da borboleta.

A curva de tensão em função da posição da borboleta foi obtida nas posições correspondentes a zero, 45 e 90 graus (plena carga). O comportamento linear do sinal de saída permite sua aproximação por uma equação do tipo $y = ax + b$, como mostra a Figura 4.11.

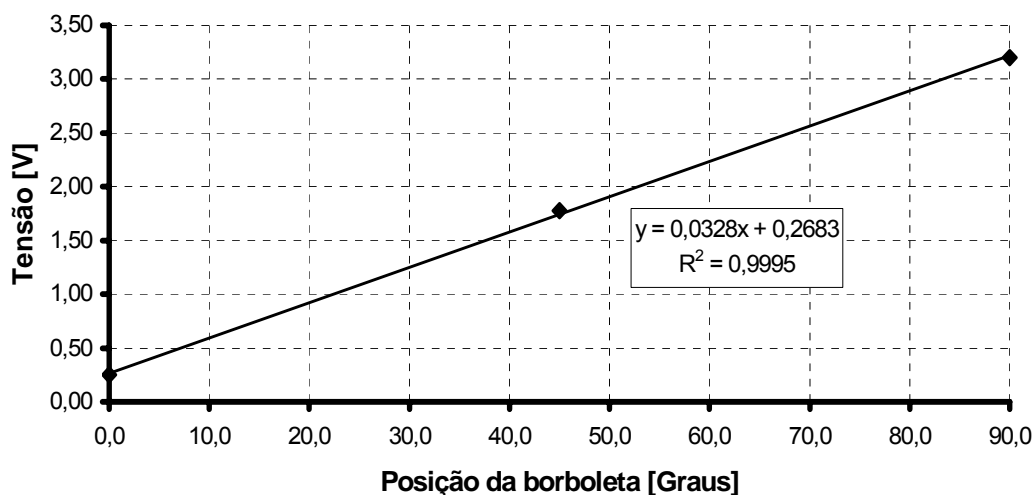


Figura 4.11 – Curva de calibração do sensor de posição da borboleta.

4.2.6. Concentração de Oxigênio no coletor de escapamento

A medição da concentração de Oxigênio no coletor de escapamento é a referência para o controle da mistura ar/combustível em malha fechada, como mostrado no Capítulo 3. O sinal de tensão proveniente do sensor de *HEGO* é utilizado para realimentação do controlador de mistura e apresenta um comportamento não-linear em função do fator λ sendo a faixa nominal de saída de 100 a 900 mV. Optou-se por utilizar um sensor do tipo *HEGO* (*Heated Exhaust Gas Oxygen Sensor*) devido à redução da histerese associada ao seu funcionamento.

Como o sensor apresenta valores de tensão em condições de mistura pobre ($\lambda > 1,05$) iguais a 100mV, e de mistura rica ($\lambda < 0,95$) iguais a 900mV, optou-se pela amplificação desse sinal na entrada do conversor, já que o nível de tensão máxima admissível na entrada do canal analógico do *DSP* é de 3,3V. O recurso utilizado para condicionamento do sinal do sensor *HEGO* é composto por um filtro ativo tipo Butterworth de 2ª Ordem, com frequência de corte de 10 Hz (passa baixa), visando eliminar os ruídos no sinal de saída do sensor. A Figura 4.12 apresenta um diagrama esquemático do circuito.

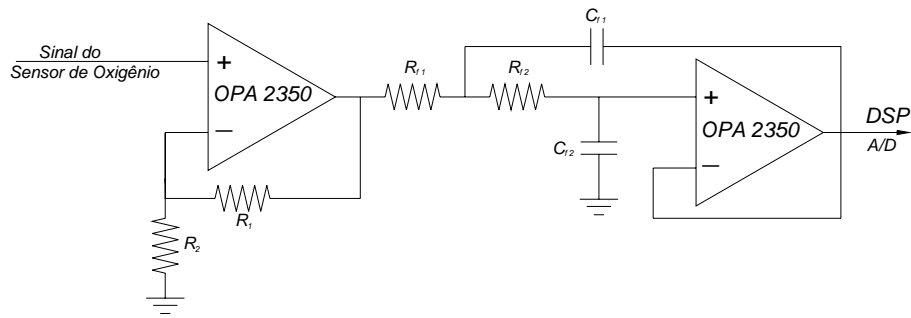


Figura 4.12 – Circuito condicionador do sinal do sensor *HEGO*.

O conceito associado ao sensor de O_2 de 4 vias apresenta uma curva de calibração (Figura 3.29) com valores reduzidos de histerese, quando comparado ao sinal de uma sonda convencional sem aquecimento. Esse fato possibilita a verificação do sinal do sensor em questão, através de comparação com um sensor de O_2 em banda larga (*Wide-band Oxygen Sensor*), sendo ambos expostos às mesmas condições de operação de um motor de combustão interna em bancada dinamométrica.

Essa verificação foi realizada através da variação da quantidade de combustível introduzida em um motor operando em bancada dinamométrica, após a estabilização da carga imposta e da sua rotação. Foram impostas desde condições de mistura pobre ($\lambda \geq 1,20$) até mistura extremamente rica ($\lambda \leq 0,80$), sendo os limites supra citados as duas condições extremas onde foi possível manter o motor em regime estabilizado, sem comprometer o funcionamento de seus componentes e sistemas.

A Tabela IV.6 apresenta os resultados comparativos da verificação realizada nas duas direções de variação de mistura, visando determinar, além das condições de operação do sensor, a faixa de histerese associada.

Tabela IV.6 – Dados obtidos na verificação do sensor de Oxigênio (HEGO).

Leitura:	Valor de Lambda Sensor de O ₂ banda larga	Incerteza do sistema de medição [kg/kg]	Tensão medida no Sensor [mV]:	
			$\lambda = 0,85 \rightarrow \lambda = 1,15$	$\lambda = 1,15 \rightarrow \lambda = 0,85$
01	0,850	± 0,002	900	900
02	0,900		900	900
03	0,950		884	864
04	0,960		876	856
05	0,970		852	835
06	0,980		798	768
07	0,990		600	590
08	1,000		460	430
09	1,010		300	286
10	1,020		150	146
11	1,030		125	120
12	1,040		115	110
13	1,050		110	105
14	1,100		100	100
15	1,150		100	100

A Tabela IV.6 apresenta a calibração realizada nas duas direções que permite avaliar a condição de histerese do sinal de saída do sensor de O₂ de 04 vias utilizado no teste. A Figura 4.13 apresenta a curva de tensão em função de Lambda sendo (a) a curva obtida em no sentido de enriquecimento ($\lambda=1,20 \rightarrow \lambda=0,80$), e (b) a curva obtida em no sentido de empobrecimento ($\lambda=0,80 \rightarrow \lambda=1,20$) da mistura ar/combustível.

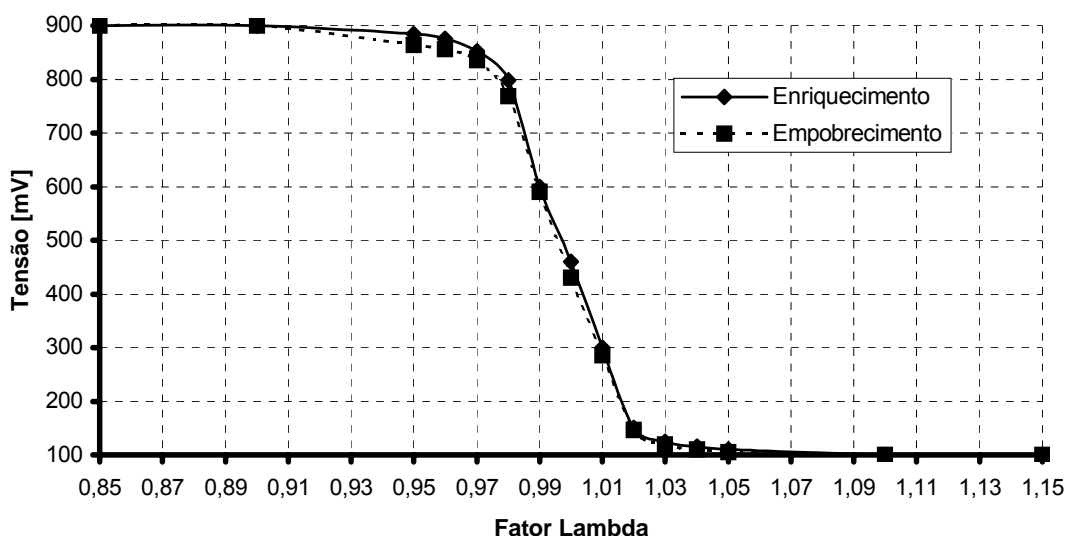


Figura 4.13 – Curvas de calibração do sensor HEGO.

4.3 Definição da Arquitetura da Unidade de Controle Eletrônico – ECU

O hardware da *ECU* baseia-se em circuitos para condicionamento dos sinais dos sensores, circuitos de potência para acionamento dos atuadores, de interface para comunicação entre módulos, além de circuitos de alimentação e da memória *RAM* externa. Os itens anteriores apresentaram os sinais e as definições dos sensores utilizados, bem como a arquitetura dos condicionadores de sinais associados. A Figura 4.14 apresenta um diagrama de blocos do hardware da *ECU* que mostra, além dos módulos condicionadores, os periféricos associados ao *DSP* utilizado e os módulos de potência para acionamento dos eletroinjetores e das bobinas de ignição.

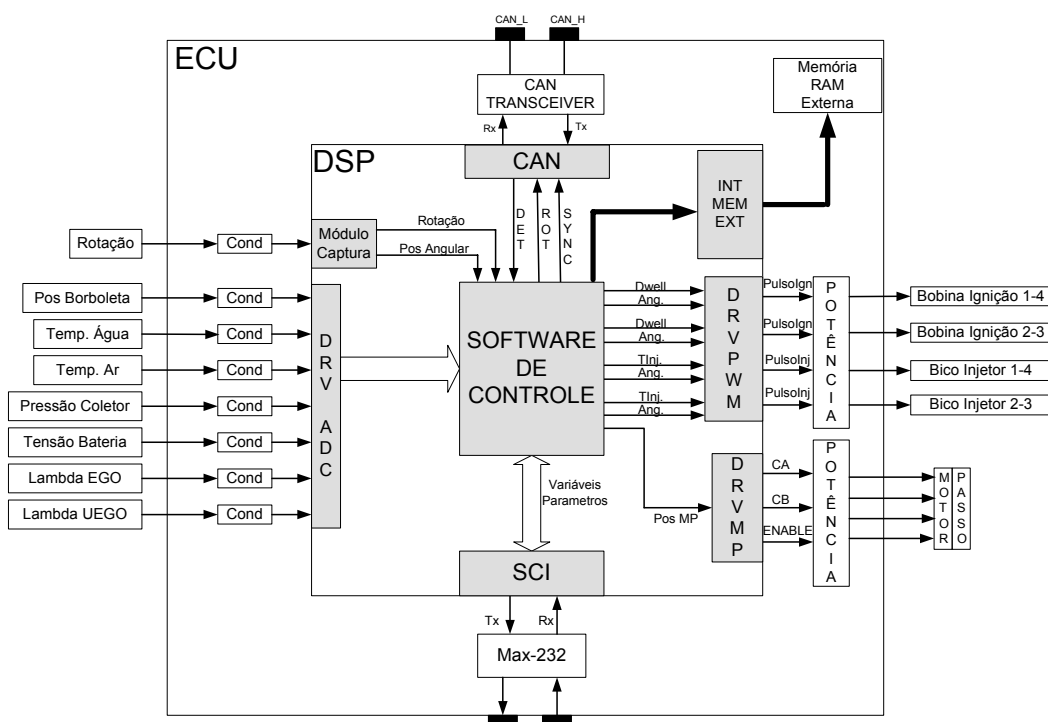


Figura 4.14 – Diagrama de blocos do hardware da *ECU*, incluindo periféricos do *DSP*.

A adoção do *DSP* TMS320F2407A como *CPU* possibilitou simplificar o desenvolvimento do hardware, já que várias funcionalidades são implementadas por periféricos internos, destacados em cinza na Figura 4.14. Os módulos de potência (*drivers*) para acionamento dos eletroinjetores e das bobinas de ignição e o módulo de comunicação *CAN* (Figura 4.14) não foram detalhados nesse trabalho visto que os *drivers* de potência possuem as mesmas características apresentadas por Carvalho (2005) e pelo fato do módulo de comunicação *CAN* ser um protocolo simplificado da camada de aplicação da rede *CAN*, baseado no *CANopen*, apresentado por Braga (2007). Os demais módulos, até então não mencionados, serão apresentados nos itens a seguir.

4.3.1 Sistema de gerenciamento eletrônico implementado

Os parâmetros que determinam as condições de operação do motor são monitorados através do sistema de aquisição de dados que tem a função de determinar cada condição específica de operação do motor, possibilitando que sistema de gerenciamento eletrônico implementado seja capaz de otimizá-las. É em função desses parâmetros que se define a quantidade e o instante da injeção de combustível e o instante da introdução da centelha para iniciar o processo de combustão da mistura. Ainda que esse sistema seja capaz de adequar os parâmetros a cada condição de operação do motor, são necessárias intervenções durante a calibração de um MCI realizadas, em sua maioria, com o motor em funcionamento.

No intuito de descrever de forma mais detalhada o sistema de gerenciamento eletrônico implementado, realizou-se uma divisão em módulos, sendo cada um deles responsável por executar as funções descritas no Capítulo 3. Esses módulos são apresentados na Figura 4.15, que mostra também um diagrama esquemático das conexões existentes entre eles.

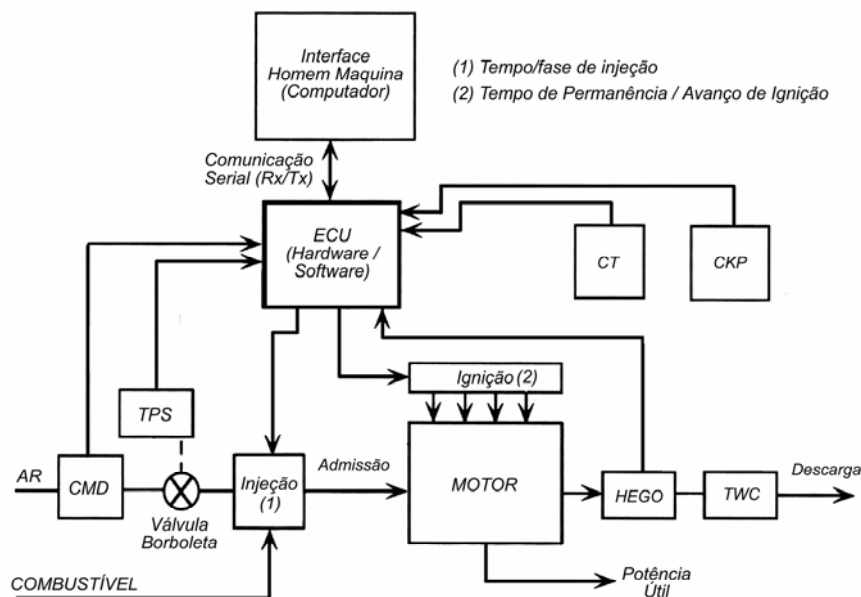


Figura 4.15 – Módulos do sistema de gerenciamento Eletrônico do Motor.

Na Figura 4.15, a unidade de controle eletrônico (ECU) do sistema de gerenciamento eletrônico do motor (SGEM) é colocada na parte central por executar o monitoramento e aquisição dos dados, o controle do tempo e da fase de injeção (1), do tempo de permanência e do ângulo de avanço de ignição (2), a comunicação com o computador que gerencia a Interface Homem-Máquina (IHM) e o software de desenvolvimento do SGEM.

O bloco correspondente ao computador possui funções distintas, sendo capaz de estabelecer dois protocolos de comunicação com o SGEM. O primeiro deles utiliza a porta paralela ou *USB* do computador para conectar, através do módulo *XDS*, o programa de desenvolvimento aos pinos de programação do DSP. No *Code Composer Studio*, software dedicado a esse desenvolvimento e fornecido pelo fabricante do *DSP*, as estratégias de controle são elaboradas em linguagem *Assembly* ou *C*, dependendo da sua complexidade. São então compiladas e enviadas via *XDS* para memória *Flash* do SGEM (*upload memory function*), sendo a conexão removida ao final da gravação.

Devido a essa função, o SGEM implementado apresenta uma diferença significativa em relação aos demais sistemas de gerenciamento eletrônico programáveis comerciais, descritos no Capítulo 3. O acesso às estratégias de controle de um sistema de gerenciamento eletrônico significa, além da possibilidade de parametrização do motor, a implementação e validação de novas estratégias de controle. Esse acesso¹ é classificado hierarquicamente como um nível superior aos demais sistemas, devido à sua indisponibilidade nos sistemas comerciais avaliados, apesar de alguns deles possibilitar a escolha de diferentes estratégias pré-determinadas como a *MoTeC*, por exemplo.

O segundo tipo de comunicação é realizado por meio de um protocolo serial (R_x/T_x) que possibilita a transferência bi-direcional de dados (*full-duplex*) a uma taxa de 9600 *kbps*, por meio de um cabo de comunicação existente entre a *IHM* e o SGEM. Através desse protocolo, as configurações realizadas na *IHM* são transferidas para as memórias físicas do SGEM (*hardware*), assim como os dados monitorados são disponibilizados na *IHM* com a possibilidade de aquisição para posterior análise dos dados. As seções seguintes apresentam as características do software desenvolvido a as suas funcionalidades.

Os itens 4.1, 4.2 deste capítulo abordam a arquitetura (*hardware*) da unidade de controle eletrônico (*ECU*) do SGEM implementado, onde são apresentadas as características físicas, protocolos de comunicação e as limitações desse sistema. Nos itens seguintes, são apresentadas as características dos demais módulos que compõe o SGEM, mostrados anteriormente na Figura 4.15, visando apresentar suas particularidades e os detalhes relevantes. Essa apresentação é iniciada pela descrição da Interface Homem-Máquina (*IHM*) para facilitar o entendimento do SGEM.

¹ A restrição imposta por esse sistema é o domínio da linguagem de programação do DSP.

4.3.2 Interface Homem Máquina (IHM)

Na etapa de planejamento da Interface Homem-Máquina (IHM) foram assumidas algumas prioridades com relação às suas características. A primeira delas diz respeito à estrutura definida como modular, que permitisse fácil expansão à medida que novas estratégias fossem desenvolvidas. Dada a importância da comunicação com a *ECU*, o protocolo deve ser robusto, de forma a garantir a integridade dos dados e a visualização das variáveis em tempo real. Por se tratar de uma *IHM*, a Interface gráfica deve ser amigável, simples, direta e capaz de permitir expansão à medida que novas variáveis, parâmetros e mapas forem agregados ao sistema. Para atingir as características citadas, a linguagem C++ foi adotada, visto que proporciona todas as vantagens de uma linguagem orientada a objetos aliadas a um alto desempenho, sendo atualmente amplamente utilizada para o desenvolvimento de *softwares* profissionais.

No ambiente de desenvolvimento, a utilização de ferramentas *RAD (Rapid Application Development)*, como o *C++Builder* da Borland, proporciona facilidades que aceleram o processo de desenvolvimento. Apesar dessa característica, no presente trabalho foi adotado o *Visual C++ 6.0*, que faz parte da plataforma de desenvolvimento *Visual Studio 6.0*. Todo o desenvolvimento do programa foi baseado na biblioteca *wxWindows*, que proporciona uma *API (Application Programming Interface)* simples, com extensa documentação disponível, adequada para a criação de aplicações com interface gráfica. Deste modo não foi necessário utilizar a *API* do windows diretamente.

A estrutura do programa foi baseada na arquitetura Documento/Visão, que é uma versão simplificada da MVC (Modelo/Visão/Controle), proporcionando a separação entre o código que gerencia os dados do programa e o código necessário para apresentá-los ao usuário. A biblioteca *wxWindows* implementa esta arquitetura e disponibiliza classes bases para o desenvolvimento do modelo. A estratégia de comunicação com a *ECU* foi baseada em uma solução *Multithread*, que possibilita a separação entre o código do protocolo criado e o código de interface gráfica e gerenciamento dos dados. Com estas estratégias foi possível desenvolver um programa que atende as prioridades estabelecidas. A Figura 4.16 apresenta a tela das configurações principais implementada, através da qual o usuário é capaz de alterar os parâmetros relevantes ao controle do motor, além das definições de cada sensor e sua respectiva curva de calibração.

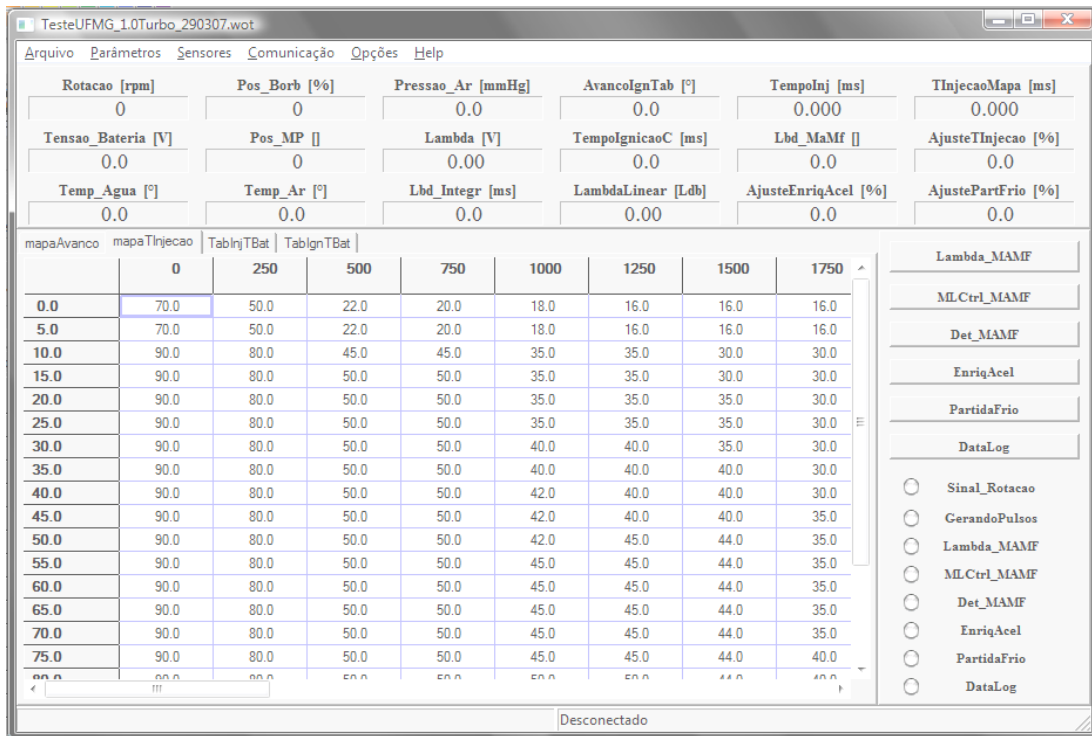


Figura 4.16 – Tela de configurações principais da IHM.

A Figura 4.16 mostra, na parte superior, as variáveis medidas e as ações de controle adotadas. Logo abaixo se encontram os mapas e tabelas de calibração de avanço e tempo de injeção, além das tabelas de compensação em função da tensão da bateria. No canto direito da tela (Fig. 4.16) são mostrados os comandos do sistema e o seu estado atual, que permitem modificar a condição aberta/fechada das malhas de controle de lambda, marcha lenta, correção de detonação, além de iniciar e interromper o processo de aquisição de dados (*DataLog*).

A barra de menus permite o acesso às funções adicionais, onde a função 'Parâmetros' acessa as janelas de configuração de parâmetros de Ignição e Injeção (Figura 4.17), através da qual se configura o valor do tempo base (**TempoInjBase [ms]**) e da fase de injeção (**AngInj14** e **AngInj23**) para cada banco de injetores, além do tempo de permanência(**TempoIgnicao [ms]**).

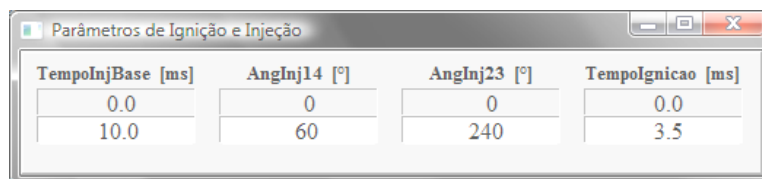


Figura 4.17 – Tela de parametrização dos sistemas de ignição e injeção.

A conexão ECU/IHM pode ser interrompida, fazendo com que o SGEM passe a condição independente de operação (*stand-alone*), desde que os dados presentes na IHM tenham sido transferidos integralmente ao SGEM e não apresentem nenhum erro de transferência, sendo essa função também controlada e apresentada na tela da IHM.

Através da IHM é possível manipular, com o motor em funcionamento, o ângulo de ignição estabelecido no mapa de avanço de ignição ou a porcentagem relativa do tempo de injeção estabelecida no mapa de injeção. Além disto, possibilita ao usuário definir o tempo de permanência de ignição e o ângulo de injeção. Em função das definições impostas pelo usuário através da IHM, o software implementado no SGEM realiza o controle do motor, baseado nas estratégias implementadas e nos valores estabelecidos pelo usuário durante o ajuste dos mapas de referência do SGEM.

Independente do critério de otimização utilizado pelo usuário, os mapas de ajuste podem ser modificados em qualquer condição, desde que as mudanças realizadas não comprometam a integridade do motor ou ultrapassem as condições de operação dos atuadores como, por exemplo, dos tempos de injeção maiores que os estabelecidos no Item 3.4 (Revisão Bibliográfica). As definições realizadas na IHM permitem ao *software* do SGEM atuar nas condições de operação do motor, através do seu *hardware* e dos atuadores presentes no sistema.

Na condição *stand-alone*, o SGEM recebe os sinais provenientes dos módulos de temperatura e pressão do ar admitido (CMD), da posição da borboleta (TPS), da rotação e da posição do eixo de manivelas (CKP) e da temperatura do motor (CT) e, em função dos dados descritos nos mapas de referência, realiza o acionamento dos eletroinjetores de combustível e das bobinas de ignição, controlando o motor de acordo com sua condição de operação. O sistema de controle da mistura ar/combustível, quando habilitado, realiza a correção do tempo-base de injeção (Equação 2.18) em malha fechada, sendo realimentado pelo sinal do sensor de concentração de O₂ no coletor de escapamento (HEGO).

O SGEM também é capaz de adotar os valores descritos nos mapas de referência associados ao tempo de injeção, sem a aplicação das devidas correções e das estratégias de controle em malha fechada. Essa estratégia é definida em mapas específicos que determinam os instantes em que os controladores devem ser habilitados ou desabilitados, em função da condição instantânea de operação do motor.

4.3.3 Software implementado

A arquitetura do *software* é baseada em eventos (interrupções) gerados por módulos periféricos do DSP (*timers*) e pela roda dentada. Os eventos de baixo nível são utilizados para a geração dos pulsos de comando das bobinas de ignição, dos eletroinjetores e para o acionamento do atuador de marcha lenta. Para tal, o sistema possui a característica particular onde os eventos de baixo nível possuem alta prioridade e podem interromper os eventos de alto nível, utilizados para execução das estratégias de controle, protocolos de comunicação e aquisição dos dados. Existe uma diferença entre os eventos gerados com o motor ligado e desligado. Os eventos mais importantes estão descritos a seguir.

4.3.3.1 Captura de transição no sinal de rotação

Este evento é gerado com o motor em funcionamento, sempre que uma transição de subida é detectada no sinal do sensor de rotação e posição (Figura 4.3-b), onde cada dente identificado pelo *DSP* gera uma interrupção que dispara um contador interno (*COUNT 2*). Este por sua vez, mede o tempo entre duas interrupções consecutivas para determinar a velocidade e a posição angular do eixo de manivelas (identificação da falha). Caso seja detectada a falha da roda dentada, executa a rotina principal de controle do sistema.

4.3.3.2 Evento de timer com período de 50 ms

Este evento é utilizado para habilitar o módulo de aquisição dos dados (*DataLog*) e também para a execução da estratégia de controle de marcha lenta com o motor em funcionamento. Por outro lado, se o motor está parado e o evento de transição do sinal de rotação não é detectado, esse evento é utilizado para controlar a amostragem das variáveis do conversor analógico-digital (*ADC*).

4.3.3.3 Eventos dos módulos de comunicação

O envio e recebimento de dados geram eventos nos quais são executadas as rotinas dos protocolos de comunicação. Estes eventos também são gerados quando erros são detectados pelos periféricos nas camadas inferiores do protocolo habilitando, quando necessário, as funções de tratamento de erros.

4.3.3.4 Características do Software

O *software* da *ECU* contém toda a inteligência do sistema, fazendo a interpretação dos sinais medidos, executando as estratégias de controle implementadas e comandando os circuitos de potência para acionamento dos atuadores. Além disso, mantém uma contínua troca de dados com a IHM, que possibilita a visualização dos dados medidos e a alteração de parâmetros da *ECU*.

Como mostrado anteriormente, o *software* foi desenvolvido no ambiente *Code Composer*, da Texas Instruments, que possibilita a programação do DSP em linguagem *Assembly* e *C*. No entanto, por questões de eficiência do código, as funções críticas foram implementadas em código *Assembly*, de acordo com o padrão “*C callable*” (Braga, 2007). A Figura 4.18 apresenta o diagrama de blocos geral do *software* desenvolvido para a *ECU*.

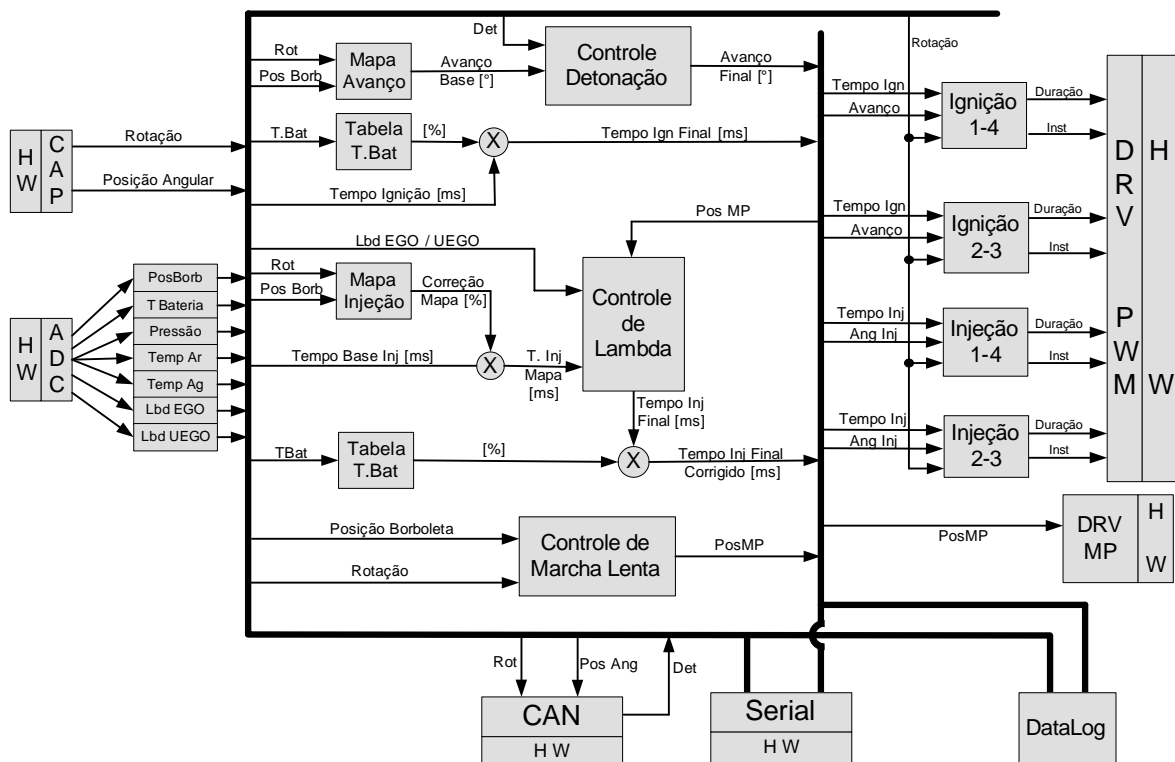


Figura 4.18 – Diagrama de blocos do software implementado.

Os módulos apresentados na Figura 4.18 correspondem a objetos do sistema. Os objetos de mesmo tipo compartilham a mesma estrutura lógica e as mesmas funções, porém possuem parâmetros próprios. Além disso, possuem interface e responsabilidades bem definidas. Esta estratégia de desenvolvimento proporciona um *software* estruturado, que facilita a manutenção e a expansão do sistema. Nas próximas seções estes módulos serão descritos.

4.3.4 Estratégia de controle implementada

A estratégia de controle implementada é baseada no sinal de posição e velocidade angular do eixo de manivelas, determinados pelo sensor indutivo. Através desse sinal é possível sincronizar os pulsos de ignição e injeção de combustível com o movimento alternativo dos pistões do motor, devido à presença de uma falha equivalente a 2 dentes na roda dentada. Esse sinal é introduzido no circuito condicionador que utiliza um amplificador comparador (Figura 4.2) para transformar a onda senoidal de saída do sensor em uma onda quadrada com amplitude de 3,3 V (Figura 4.3). O sinal de saída do comparador (Figura 4.3-b) possui 58 pulsos com o mesmo período e um pulso com um período maior, indicando a passagem da falha da roda dentada. Cada dente identificado pelo DSP gera uma interrupção que dispara um contador interno (*COUNT 2*). Este por sua vez, conta o tempo entre duas interrupções consecutivas geradas e determina o tempo gasto por cada dente para passar pelo sensor, determinado a rotação do motor. A Figura 4.19 apresenta um fluxograma da rotina implementada.

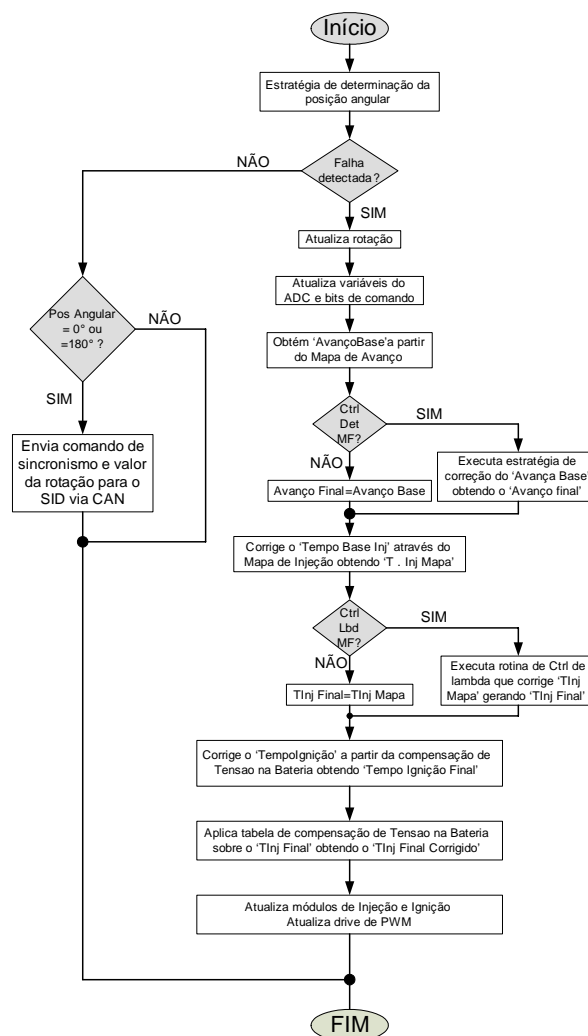


Figura 4.19 – Fluxograma simplificado da rotina de controle implementada.

A rotina de controle mostrada no fluxograma da Figura 4.19 compara, a cada interrupção gerada, o período entre dentes sucessivos e identifica a falha da roda dentada, devido ao aumento no período nesse instante. Além disso, o período da onda quadrada gerada é utilizado para medir a rotação do motor, sendo esse parâmetro a base para cálculos do ângulo de avanço, fase de injeção, tempo de permanência e tempo de abertura dos eletroinjetores.

As estratégias de controle de lambda e do avanço de ignição são executadas a cada ciclo do motor, quando a falha da roda dentada é detectada. Esta característica é possível pelo fato de que a atuação sobre os eletroinjetores e bobinas de ignição ser somente realizada uma vez por volta do eixo de manivelas. Já o controle de marcha lenta não possui esta restrição, sendo executado com período fixo de 50 ms, no evento gerado por um módulo periférico do *DSP* (*Timer2*). Como citado anteriormente, estas são as rotinas de maior prioridade durante a execução do programa implementado.

A rotina de tratamento do evento de captura de transição do sinal de rotação é ilustrada através de um fluxograma apresentado na Figura 4.19. Esta rotina executa quase toda a estratégia de controle do sistema, exceto o controle de marcha lenta que é executado no evento do timer. As estratégias são executadas apenas quando a falha da roda dentada é detectada. Inicialmente atualiza-se o valor da rotação, das variáveis analógicas e dos bits de comando. Estes bits correspondem a comandos que habilitam ou desabilitam as estratégias de controle, e são configurados através da IHM.

Os valores iniciais para o avanço e o tempo de injeção são obtidos através dos mapas de calibração. As estratégias de correção são executadas apenas se estiverem habilitadas pelos *bits* de comando. Caso contrário os valores iniciais obtidos dos mapas permanecem inalterados. Em seguida aplica-se sobre os tempos de comando de ignição e injeção a compensação da tensão medida na bateria.

Os módulos de injeção e ignição são atualizados de forma a gerar os parâmetros de comando para o periférico de *PWM* do *DSP*. Caso a posição angular não corresponda à falha, verificam-se as condições de envio do comando de sincronismo para sistema de identificação de detonação. Todos os parâmetros do software da *ECU*, incluindo os pontos dos mapas e das tabelas, ficam armazenados na memória *FLASH* interna do *DSP* (não-volátil).

Durante a inicialização do programa, estes valores são carregados na memória RAM, de forma que podem ser alterados através da IHM. Se o usuário desejar gravar novos valores na *FLASH* basta utilizar um comando disponível na IHM. Neste caso todos os parâmetros correntes são gravados na *FLASH* e não serão perdidos com o desligamento do sistema.

Como a falha da roda dentada é a referência da posição do eixo de manivelas para o sistema de gerenciamento eletrônico, sua posição em relação ao PMS, no instante em que se encontra alinhada com o sensor, deve ser medida e informada ao SGEM antes do início dos ajustes do motor. Isso ocorre devido à necessidade de uma referência física da posição do eixo de manivelas em relação à falha e ao sensor de rotação para o correto sincronismo do ângulo de avanço de ignição e do ângulo de injeção.

Nos sistemas que utilizam esse método, existe a necessidade de se identificar a falha antes que os pistões gêmeos (1 e 4) atinjam o PMS, devido ao tempo gasto pelo SGEM para processamento e das variáveis associadas à essa identificação. O tempo gasto pelo sistema (T_{APMS}) em função da rotação instantânea (n) é definido em função do tempo de processamento (T_{loop}), do tempo de permanência da bobina (D_t) e do tempo associado ao ângulo de avanço na condição imposta (T_{AV}), segundo a equação:

$$T_{APMS}(n) = T_{loop}(n) + D_t(n) + T_{AV}(n) \quad (4.5)$$

Como a identificação do PMS é feita através do número de dentes após a passagem da falha pelo sensor, recomenda-se a definição do dente equivalente ao PMS (N_{APMS}) mais próximo à falha da roda dentada, sendo essa a condição mínima aceitável pelo SGEM. Esse parâmetro é calculado na condição de rotação máxima de operação do motor ($R_{m\acute{a}x}$), em função do ângulo máximo de avanço de ignição ($AV_{m\acute{a}x}$), do tempo de permanência máximo utilizado ($D_{tm\acute{a}x}$), do tempo gasto para realizar um ciclo computacional completo (T_{loop}) e do número de dentes da roda dentada (N_{th}), de acordo com a equação:

$$N_{APMS}(n) = \left(\frac{(T_{loop} + D_{tm\acute{a}x}) \cdot R_{m\acute{a}x}}{1000} \right) + \left(\frac{AV_{m\acute{a}x} \cdot N_{th}}{360} \right) + FS \quad (4.6)$$

Onde n é a condição de rotação máxima do motor ($R_{m\acute{a}x}$). Termo FS um fator de segurança apresentado sob a forma de um número que, somado aos demais, torna

N_{APMS} um número inteiro imediatamente superior ao obtido no cálculo. Caso o dente referente ao PMS seja menor que o tempo necessário, ocorre uma inversão do sincronismo do motor, cuja forma de correção está associada à inversão dos atuadores de ignição e injeção.

Visando facilitar a utilização do sistema de gerenciamento eletrônico implementado, optou-se pela introdução no SGEM do dente equivalente, determinado pela Equação 4.6, através da IHM. Essa introdução é feita através da informação do ângulo correspondente ao N_{APMS} , em graus, através da janela de configuração mostrada Figura 4.20, parâmetro “**Ang_AntesPMS [°]**”. Essa definição deve ser realizada necessariamente no início da calibração do sistema, pelo fato dessa posição variar em função de características físicas do motor, como a geometria da câmara de combustão.

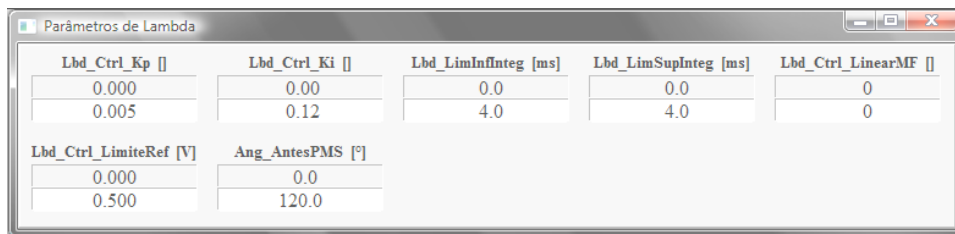


Figura 4.20 – Configuração do dente referente ao PMS, cilindros 1 e 4.

Determinado o período da onda a cada dente e em função da referência (N_{APMS}), o SGEM calcula, em milissegundos, o instante em que os cilindros estarão no PMS, sincronizando o instante dos pulsos de ignição e injeção. Esse sincronismo depende diretamente do valor fornecido pelos mapas de avanço e de tempo de injeção. A Figura 4.21 apresenta o sinal do PWM de saída do SGEM para ignição, gerando o pulso para chaveamento do primário da bobina dos cilindros 1 e 4 com 36° de avanço a 2000 RPM.

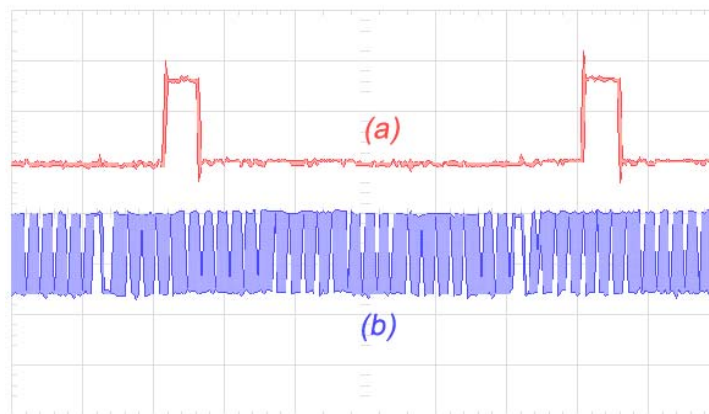


Figura 4.21 – (a) Saída em PWM para comando de ignição e (b) sinal de rotação.

De forma similar ao comando de chaveamento da bobina de ignição, mostrado na Figura 4.21, o SGEM realiza o controle da quantidade de combustível através do tempo de injeção aplicado ao eletroinjetor. O parâmetro definido como ângulo de injeção indica o instante no qual a massa de combustível será introduzida no coletor de admissão, em relação à posição da válvula de admissão. Esse parâmetro afeta diretamente a atomização do combustível e, por sua vez, a formação da mistura, sendo um dos parâmetros de maior influência nos índices de emissões de poluentes de um MCI e no consumo específico de combustível (*SFC*).

Como toda a estratégia é baseada na velocidade e na posição instantânea do eixo de manivelas, a fase de injeção, descrita na IHM em graus, representa o instante equivalente ao término da injeção do combustível em relação ao PMS. Por estar fisicamente sincronizada com o eixo de comando de válvulas, a fase garante que o combustível seja introduzido no instante desejado em relação à posição das válvulas, independente da velocidade do motor e do tempo de injeção aplicado ao eletroinjetor.

Foram implementados mapas pré-ajustados para ângulos iniciais de avanço e do tempo de injeção em função da rotação e da carga do motor (potenciômetro da borboleta). Esses mapas estabelecem o ângulo base de avanço e o valor percentual do tempo base (% *IJPU*) de injeção de acordo com a estratégia adotada, sendo determinados em toda a faixa nominal de rotação do motor (motor parado até 6500 RPM, com um incremento de 250 RPM) e apresentados em detalhe nos itens 4.3.4 e 4.3.5. Valores intermediários de rotação são obtidos através do método de interpolação dos mapas implementado, apresentado no item 4.3.3.

Vale ressaltar que a estratégia descrita anteriormente é apenas uma das inúmeras possibilidades de realizar o gerenciamento eletrônico de um MCI, implementada de forma a possibilitar a execução de testes comparativos com o sistema de gerenciamento eletrônico original e com o programável utilizados no controle de motores em teste.

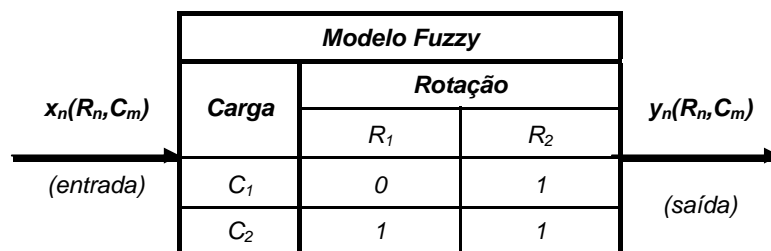
Os diferentes sistemas de gerenciamento eletrônicos comerciais existentes possuem estratégias distintas para realização do controle motor que dependem do tipo de sensores e atuadores presentes (Capítulo 3). Como se tratam de sistemas comerciais, as estratégias de interpolação não são apresentadas em detalhe. A MoTeC, por exemplo, informa apenas que os pontos intermediários aos obtidos durante a calibração do motor resultam da interpolação linear dos 04 pontos mapeados circunvizinhos ao desejado.

4.3.5 Método de Interpolação implementado

O SGEM desenvolvido utiliza os pontos descritos nos mapas de referência para realizar o controle do motor em todas as suas condições de operação. Porém, o tempo e o custo de um ajuste dos mapas de referência estão diretamente ligados ao número de pontos que os compõe. Dessa forma, definiu-se que as condições de funcionamento intermediárias aos pontos de ajuste seriam determinadas através de uma técnica de interpolação. Os sistemas de gerenciamento eletrônicos comerciais também utilizam desse artifício matemático para determinação dos pontos intermediários, porém não especificam claramente qual o método utilizado para a interpolação tri-dimensional.

Dentre as possíveis formas de realizar essa interpolação, optou-se pela aplicação de um modelo para aproximação de funções não-lineares, apresentada pelos mapas de calibração de um MCI. Jang (1997) mostra a possibilidade de alcançar essa propriedade em um método de interpolação, através da aplicação de um modelo *fuzzy* proposto por Takagi, Sugeno e Kang (modelo *fuzzy* TSK) com mecanismo de inferência de ordem zero. Esse modelo descreve a utilização de uma função de pertinência associada a cada valor lingüístico que, nesse caso, são os pontos de rotação e carga pré-estabelecidos no mapa de referência do motor, definidos como “sites” do mapa. Cada “site” do mapa corresponde a um valor lingüístico, e tem associado a ele uma função de pertinência que, por sua vez, equivale a um valor entre 0 e 1 que uma entrada $x_n(R_n, C_m)$ possui em relação a dois sites consecutivos, descritos pelo mapa de referência. A cada ponto da matriz $M(\text{rotação}, \text{carga})$ que define o mapa de referência, aplica-se uma regra de inferência, como exemplificado na Tabela IV.7, que influencia na saída $y_n(R_n, C_m)$.

Tabela IV.7 – Exemplo e regra de inferência de ordem zero (Jang, 1997).



Dessa forma, para uma entrada $x_1(R_1, C_1)$, a saída do modelo *fuzzy* proposto é $y_1=M(0,0)$. Já para a entrada $x_2(R_2, C_1)$, a saída passa a ser $y_2=M(1,0)$. O valor de saída do modelo aplicado é resultado de uma média dos y_n obtidos com a aplicação das regras de inferência, ponderados pela pertinência ou o “peso” da entrada em relação a dois sites consecutivos.

Com o objetivo de apresentar de forma mais clara o método de interpolação implementado, aplica-se a seguir a dedução das equações do modelo *fuzzy* aplicadas à condição real de ajuste. Sabe-se que os mapas de referência são definidos por matrizes de dimensão $M \times N$ e apresentados em forma tri-dimensional, onde cada ponto representa uma condição específica de operação do motor, como mostra a Figura 4.22.

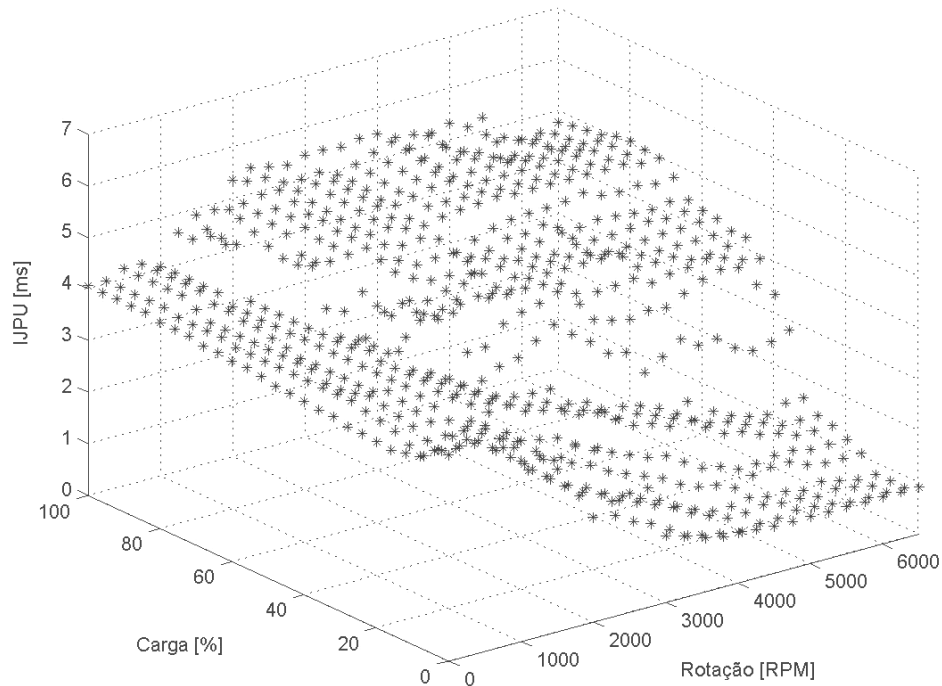


Figura 4.22 – Pontos obtidos durante a calibração. Motor Fire 1.3 8V Gasolina.

Aqui se introduz o conceito de incremento da rotação (i_{rot}), definido como a diferença entre os pontos de rotação pré-estabelecidos no mapa para realização do ajuste. Esse fator é estabelecido durante a configuração do sistema de gerenciamento para uma determinada aplicação, sendo utilizado para definição da dimensão da matriz $M \times N$ de referência e para o cálculo da interpolação.

Dessa forma, a quantidade “M” de colunas da matriz é um número inteiro, obtido pela divisão da diferença entre o maior ($R_{máx}$) e o menor valor (R_{min}) de rotação (faixa nominal de operação do motor), pelo incremento da rotação desejado (i_{rot}), segundo a equação:

$$M = \frac{(R_{máx} - R_{min})}{i_{rot}} \quad (4.7)$$

Na maioria dos sistemas de gerenciamento eletrônico comerciais, o termo R_{min} é igual a zero, para que seja possível a realização do controle desde a partida do motor até às condições de rotação máxima ($R_{máx}$).

De forma similar ao incremento da rotação, define-se o incremento da carga (i_{carga}) como a diferença entre dois pontos consecutivos. Esse fator também é introduzido durante a configuração do sistema de gerenciamento para determinação do mapa de referência, na determinação da dimensão da matriz MxN de referência e para o cálculo da interpolação. A quantidade “N” de linhas da matriz é um número inteiro, obtido pela divisão da diferença entre o maior ($C_{\text{máx}}$) e o menor valor ($C_{\text{mín}}$) de carga imposta, pelo incremento da carga desejado (i_{carga}), de acordo com a equação:

$$N = \frac{(C_{\text{máx}} - C_{\text{mín}})}{i_{\text{carga}}} \quad (4.8)$$

Como a posição da borboleta é utilizada como referência da carga do motor na construção do mapa de calibração, sua condição inicial para os sistemas de gerenciamento eletrônico é igual a zero ($C_{\text{mín}} = 0$), simplificando a Equação 4.8.

Em regime de operação quasi-estático, comportamento apresentado durante o ajuste do SGEM em bancada dinamométrica, uma das condições de operação (rotação ou carga do motor) deve ser fixada devido à necessidade de estabilização do motor durante a otimização do mapa. Contudo, essa condição não representa a dinâmica associada à aplicação do motor em um veículo, sendo necessário alterá-la em três situações distintas. A primeira delas pode ser definida como uma variação da rotação do motor em uma condição de carga constante como, por exemplo, durante uma aceleração do veículo com o motor em condição de plena carga. Nessa situação, o mapa tri-dimensional é reduzido a uma curva bi-dimensional, mostrada na Figura 4.23.

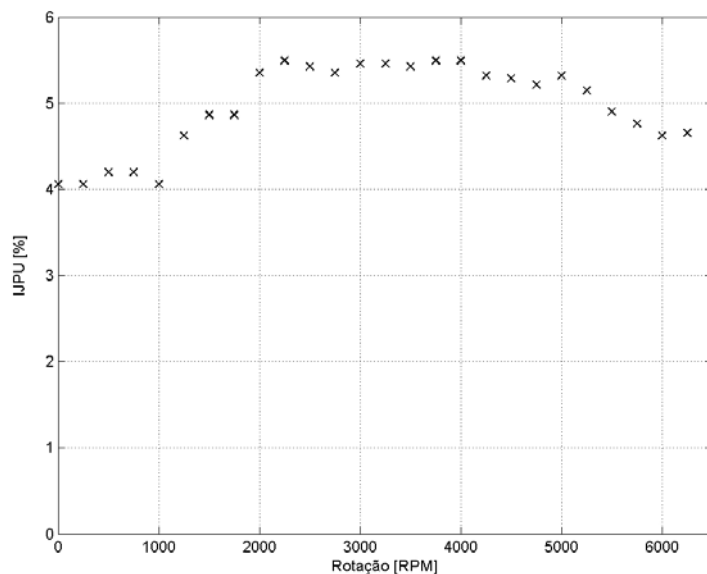


Figura 4.23 – Pontos de referência a plena carga. Motor Fire 1.3 8V Gasolina.

Esse tipo de variação da rotação do motor em uma condição de carga constante promove a alteração do parâmetro a ser interpolado apenas na direção de aumento da rotação, como apresentado na Tabela IV.8.

Tabela IV.8 - Interpolação com carga constante e rotação variável.

Carga	Rotação		
	R_n	R_j	$R_{(n+irot)}$
...
C_c	$T_{c,n}$	$T_{c,j}$	$T_{c,(n+irot)}$
...

A Tabela IV.8 apresenta um conjunto de pontos obtidos durante o ajuste que definem uma parte do mapa, onde foram encontrados, para o parâmetro de controle “ $T_{c,j}$ ”, valores de $T_{c,n}$ na condição de rotação R_n , e de $T_{c,(n+irot)}$ na condição de rotação $R_{(n+irot)}$, ambas à uma condição de carga C_c .

Considerando que ocorre uma variação na rotação sem alteração na carga na condição citada, o sistema de gerenciamento define o valor do parâmetro $T_{c,j}$ para os diferentes valores de rotação R_j compreendidos entre os pontos reais R_n e $R_{(n+irot)}$ através da equação:

$$T_{c,j} = \left(\frac{R_j - R_n}{i_{rot}} \right) \cdot T_{c,(n+irot)} + \left(\frac{R_{(n+irot)} - R_j}{i_{rot}} \right) \cdot T_{c,n} \tag{4.9}$$

A Equação 4.9 mostra que se o valor de R_j tende para o valor ajustado de R_n , o parâmetro $T_{c,j}$ também tende proporcionalmente para a condição $T_{c,n}$. Da mesma forma, se R_j tende para o valor ajustado de $R_{(n+irot)}$, o parâmetro $T_{c,j}$ tende para a condição $T_{c,(n+irot)}$. Em ambas as situações, se o valor da rotação R_j for igual aos pontos ajustados, a Equação 4.9 é simplificada com a adoção do valor descrito no mapa.

Outra forma de variar a condição de operação do motor ocorre com a mudança da carga com rotação constante como, por exemplo, durante uma manobra de retomada de velocidade em uma marcha fixa. Nessa condição, se realiza uma variação brusca na posição da borboleta com o veículo a velocidade constante, promovendo novamente uma simplificação do mapa tri-dimensional para bi-dimensional, mostrada na Figura 4.24.

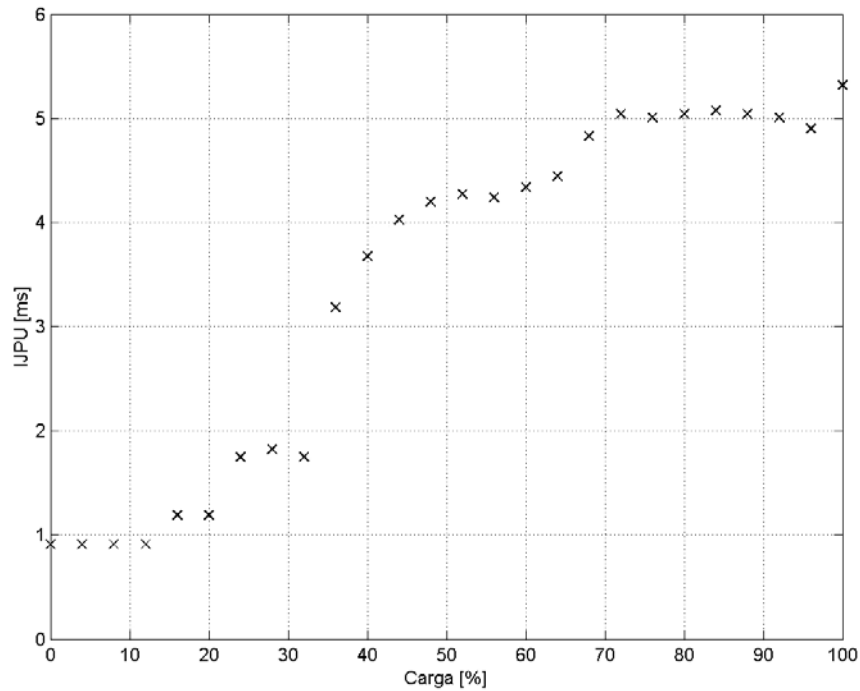


Figura 4.24 – Pontos de referência a 5000 RPM. Motor Fire 1.3 8V Gasolina.

Dessa forma, a variação do parâmetro a ser interpolado passa a ser realizada na direção do aumento da carga, como apresentado na Tabela IV.9.

Tabela IV.9 – Interpolação com rotação constante e carga variável.

Carga	Rotação		
	...	R_n	...
C_c	...	$T_{c,n}$...
C_i	...	$T_{i,n}$...
$C_{(c+icarga)}$...	$T_{(c+icarga),n}$...

A Tabela IV.9 apresenta um conjunto de pontos obtidos durante o ajuste, onde foram determinados para “ $T_{i,j}$ ”, valores equivalentes a $T_{c,n}$ e $T_{(c+icarga),n}$ nas cargas C_c e $C_{(c+icarga)}$ respectivamente ($R_n = \text{constante}$).

Considerando que ocorre uma variação na carga sem alteração da rotação, o sistema de gerenciamento define o valor do parâmetro $T_{i,n}$ para os diferentes valores de carga C_i , compreendidos entre os pontos C_c e $C_{(c+icarga)}$ (mapa de referência). Nesse calculo, o software implementado utiliza a equação:

$$T_{i,n} = \left(\frac{C_i - C_c}{i_{carga}} \right) \cdot T_{(c+icarga),n} + \left(\frac{C_{(c+icarga)} - C_i}{i_{carga}} \right) \cdot T_{c,n} \tag{4.10}$$

A Equação 4.10 mostra que se o valor de C_i tende para o valor ajustado C_c , o parâmetro $T_{i,n}$ também tende proporcionalmente para a condição $T_{c,n}$. Da mesma forma, se C_i tende para o valor ajustado de $C_{(c+icarga)}$, o parâmetro $T_{c,j}$ tende para a condição $T_{(c+icarga),n}$. Em ambas as situações, se o valor da rotação C_i for igual aos pontos ajustados, a Equação 4.10 é simplificada com a adoção do parâmetro descrito no mapa.

Apesar das situações apresentadas anteriormente serem formas possíveis de variação da condição de operação do motor, a situação que representa a condição real ocorre com uma variação da carga e, conseqüentemente, da rotação do motor. Nessa condição, o mapa tri-dimensional mostrado na Figura 4.22, que define a variação do parâmetro de controle, deve ser interpolado tanto na direção de variação da rotação quanto da carga, como apresentado na Tabela IV.10.

Tabela IV.10 - Interpolação com carga e rotação variáveis.

Carga	Rotação		
	R_n	R_j	$R_{(n+iro)}$
C_c	$T_{c,n}$	$T_{c,j}$	$T_{c,(n+iro)}$
C_i	$T_{i,n}$	$T_{i,j}$	$T_{i,(n+iro)}$
$C_{(c+icarga)}$	$T_{(c+icarga),n}$	$T_{(c+icarga),j}$	$T_{(c+icarga),(n+iro)}$

Dessa forma, a Tabela IV.10 apresenta em negrito o conjunto de pontos obtidos durante o ajuste, onde foram determinados para o parâmetro de controle “ $T_{i,j}$ ” valores equivalentes a $T_{c,n}$, $T_{c,(n+iro)}$, $T_{(c+icarga),n}$ e $T_{(c+icarga),(n+iro)}$ nas condições de carga C_c e $C_{(c+icarga)}$ e de rotação R_n e $R_{(n+iro)}$.

Considerando que, nessa situação, ocorrem variações na rotação e na carga solicitada, o sistema de gerenciamento deve definir o valor do parâmetro de controle para as os diferentes valores de carga e de rotação, compreendidos entre os pontos C_c e $C_{(c+icarga)}$ e R_n e $R_{(n+iro)}$.

Para a realização desse calculo, a interpolação passa a ser então definida por meio da variação de carga e de rotação. Considerando “ $T_{i,j}$ ” o parâmetro de controle adotado pelo sistema de gerenciamento para a condição de carga C_i e de rotação R_j (Tabela IV.10), sua determinação pode ser realizada partindo de uma das condições apresentadas anteriormente, seja da Equação 4.9 ou da Equação 4.10.

Supondo inicialmente uma variação da rotação a carga constante (primeira possibilidade de variação apresentada), o valor do parâmetro $T_{i,j}$ pode ser determinado com a aplicação da Equação 4.9 na condição específica C_i e R_j , sendo:

$$T_{i,j} = \left(\frac{R_j - R_n}{i_{rot}} \right) \cdot T_{i,(n+i_{rot})} + \left(\frac{R_{(n+i_{rot})} - R_j}{i_{rot}} \right) \cdot T_{i,n} \quad (4.11)$$

De modo simplificado, apresenta-se a Equação 4.12, sendo:

$$T_{i,j} = (A) \cdot T_{i,(n+i_{rot})} + (B) \cdot T_{i,n} \quad (4.12)$$

Onde:

$$(A) = \left(\frac{R_j - R_n}{i_{rot}} \right) \quad (B) = \left(\frac{R_{(n+i_{rot})} - R_j}{i_{rot}} \right)$$

Supondo agora que, de acordo com a segunda possibilidade, ocorra uma variação da carga a rotação a constante, o valor do parâmetro $T_{i,j}$ pode ser determinado com a aplicação da Equação 4.10 na condição específica, sendo:

$$T_{i,j} = \left(\frac{C_i - C_c}{i_{carga}} \right) \cdot T_{(c+i_{carga}),j} + \left(\frac{C_{(c+i_{carga})} - C_i}{i_{carga}} \right) \cdot T_{c,j} \quad (4.13)$$

De modo simplificado, apresenta-se a Equação 4.14, sendo:

$$T_{i,j} = (D) \cdot T_{(c+i_{carga}),j} + (E) \cdot T_{c,j} \quad (4.14)$$

Onde:

$$(D) = \left(\frac{C_i - C_c}{i_{carga}} \right) \quad (E) = \left(\frac{C_{(c+i_{carga})} - C_i}{i_{carga}} \right)$$

Como a variação ocorre simultaneamente com a rotação e a carga deve-se, a partir da Equação 4.12, definir os valores de $T_{i,n}$ e de $T_{i,(n+i_{rot})}$, na condição de carga constante e variação da rotação. A determinação do parâmetro $T_{i,(n+i_{rot})}$ está diretamente relacionada aos pontos C_c e $C_{(c+i_{carga})}$ e aos parâmetros $T_{c,(n+i_{rot})}$ e $T_{(c+i_{carga}), (n+i_{rot})}$, descritos no mapa de referência na condição $R_{(n+i_{rot})}$ e apresentados na Tabela IV.10.

Aplicando-se a Equação 4.10, substitui-se o valor de $T_{i,(n+i_{rot})}$, segundo a equação:

$$T_{i,j} = (A) \cdot \left[\left(\frac{C_i - C_c}{i_{carga}} \right) \cdot T_{(c+i_{carga}), (n+i_{rot})} + \left(\frac{C_{(c+i_{carga})} - C_i}{i_{carga}} \right) \cdot T_{c, (n+i_{rot})} \right] + (B) \cdot T_{i,n} \quad (4.15)$$

A determinação do parâmetro $T_{i,n}$ também está relacionada aos pontos C_c e $C_{(c+icarga)}$ e aos parâmetros $T_{c,n}$ e $T_{(c+icarga),n}$, descritos no mapa de referência na condição R_n . Aplicando-se novamente a Equação 4.10, substitui-se $T_{i,n}$, de acordo com a equação:

$$T_{i,j} = (A) \cdot \left[\left(\frac{C_i - C_c}{i_{carga}} \right) \cdot T_{(c+icarga),(n+i_{rot})} + \left(\frac{C_{(c+icarga)} - C_i}{i_{carga}} \right) \cdot T_{c,(n+i_{rot})} \right] + (B) \cdot \left[\left(\frac{C_i - C_c}{i_{carga}} \right) \cdot T_{(c+icarga),n} + \left(\frac{C_{(c+icarga)} - C_i}{i_{carga}} \right) \cdot T_{c,n} \right] \quad (4.16)$$

Ou na forma simplificada:

$$T_{i,j} = (A) \cdot [(D) \cdot T_{(c+icarga),(n+i_{rot})} + (E) \cdot T_{c,(n+i_{rot})}] + (B) \cdot [(D) \cdot T_{(c+icarga),n} + (E) \cdot T_{c,n}] \quad (4.17)$$

Multiplicando-se os fatores em evidência tem-se, na forma geral:

$$T_{i,j} = (A)(D) \cdot T_{(c+icarga),(n+i_{rot})} + (A)(E) \cdot T_{c,(n+i_{rot})} + (B)(D) \cdot T_{(c+icarga),n} + (B)(E) \cdot T_{c,n} \quad (4.18)$$

A Equação 4.18 apresenta uma forma de determinar o parâmetro $T_{i,j}$ para a condição específica de carga C_i e rotação R_j . A obtenção dessa equação supõe inicialmente uma condição de rotação constante e carga variável, sendo determinada a partir dos pontos obtidos durante o ajuste do SGEM para o motor. De maneira similar à condição mostrada anteriormente pode-se aplicar inicialmente a Equação 4.14 e definir os valores de $T_{c,j}$ e de $T_{(c+icarga),j}$, na condição de carga constante e variação da rotação. A determinação do parâmetro $T_{(c+icarga),j}$ está diretamente relacionada aos pontos R_n e $R_{(n+i_{rot})}$ e aos parâmetros $T_{(c+icarga),n}$ e $T_{(c+icarga),(n+i_{rot})}$, descritos no mapa de referência na condição $C_{(c+icarga)}$. Aplicando-se a Equação 4.9, determina-se esse valor de acordo com a equação:

$$T_{i,j} = (D) \cdot \left[\left(\frac{R_j - R_n}{i_{rot}} \right) \cdot T_{(c+icarga),(n+i_{rot})} + \left(\frac{R_{(n+i_{rot})} - R_j}{i_{rot}} \right) \cdot T_{(c+icarga),n} \right] + (E) \cdot T_{c,j} \quad (4.19)$$

A determinação do parâmetro $T_{c,j}$ também está relacionada aos pontos R_n e $R_{(n+i_{rot})}$ e aos parâmetros $T_{c,n}$ e $T_{c,(n+i_{rot})}$, descritos no mapa de referência na condição C_c . Aplicando-se novamente a Equação 4.9, determina-se esse valor de acordo com a equação:

$$T_{i,j} = (D) \cdot \left[\left(\frac{R_j - R_n}{i_{rot}} \right) \cdot T_{(c+icarga),(n+i_{rot})} + \left(\frac{R_{(n+i_{rot})} - R_j}{i_{rot}} \right) \cdot T_{(c+icarga),n} \right] + (E) \cdot \left[\left(\frac{R_j - R_n}{i_{rot}} \right) \cdot T_{c,(n+i_{rot})} + \left(\frac{R_{(n+i_{rot})} - R_j}{i_{rot}} \right) \cdot T_{c,n} \right] \quad (4.20)$$

Ou na forma simplificada:

$$T_{i,j} = (D) \cdot [(A) \cdot T_{(C+i_{carga}),(n+i_{rot})} + (B) \cdot T_{(C+i_{carga}),n}] + (E) \cdot [(A) \cdot T_{C,(n+i_{rot})} + (B) \cdot T_{C,n}] \quad (4.21)$$

Multiplicando-se os fatores em evidência tem-se, na forma geral:

$$T_{i,j} = (D)(A) \cdot T_{(C+i_{carga}),(n+i_{rot})} + (D)(B) \cdot T_{(C+i_{carga}),n} + (E)(A) \cdot T_{C,(n+i_{rot})} + (E)(B) \cdot T_{C,n} \quad (4.22)$$

A Equação 4.22 apresenta outra forma de determinar o parâmetro $T_{i,j}$ para a condição específica de carga C_i e rotação R_j . Diferentemente da Equação 4.18, a obtenção dessa equação supõe inicialmente uma condição de carga constante e rotação variável, determinada a partir dos pontos obtidos durante a calibração do motor.

As Equações 4.18 e 4.22 representam a forma geral para obtenção de parâmetros de controle a partir dos pontos ajustados durante o ensaio dinamométrico, sendo obtidas com a aplicação do método de interpolação utilizado. Uma comparação entre elas mostra que possuem a mesma combinação dos termos multiplicadores (A), (B), (D) e (E), sendo consideradas matematicamente iguais. Dessa forma, a interpolação tri-dimensional implementada no software do sistema de gerenciamento eletrônico utiliza a Equação 4.22 e os pontos mapeados para determinar o parâmetro de controle $T_{i,j}$ em cada condição específica de carga C_i e rotação R_j , compreendidos entre os pontos C_c e $C_{(C+i_{carga})}$ e R_n e $R_{(n+i_{rot})}$, como mostra a Tabela IV.11.

Tabela IV.11 – Pontos utilizados para determinação de condições específicas.

Carga	Rotação		
	R_n	R_j	$R_{(n+i_{rot})}$
C_c	$T_{C,n}$...	$T_{C,(n+i_{rot})}$
C_i	...	$T_{i,j}$...
$C_{(C+i_{carga})}$	$T_{(C+i_{carga}),n}$...	$T_{(C+i_{carga}),(n+i_{rot})}$

Vale aqui ressaltar que os incrementos da rotação (i_{rot}) e carga (i_{carga}) são parâmetros que refinam a malha de controle sendo, por essa razão, responsáveis pelo melhor ajuste das condições de operação do motor, devendo ser avaliados em cada condição de aplicação do sistema de gerenciamento eletrônico.

Definidos então a faixa nominal de rotação ($R_{min} - R_{máx}$) e carga imposta ($C_{min} - C_{máx}$), os incrementos da rotação (i_{rot}) e da carga (i_{carga}), a IHM gera os dois principais mapas de calibração necessários ao funcionamento do motor, sendo eles o mapa de tempo base de injeção e de avanço de ignição, apresentados a seguir.

4.3.6 Implementação do Mapa de tempo base de injeção

O controle eletrônico da quantidade de combustível inserida em um motor de combustão interna é realizado através do tempo de atuação dos eletroinjetores, como mostrado no Capítulo 3. Esse controle tem como objetivo manter a mistura ar/combustível próxima à condição estequiométrica na maior parte das condições de operação do motor. O controle em malha fechada, realimentado pelo sensor de concentração de O_2 no coletor de escapamento, assegura ainda essa manutenção nas condições de operação desejadas, independentemente das variações atmosféricas e do desgaste natural dos componentes do motor.

Nas regiões onde é possível realizar o controle da mistura ar/combustível em torno da condição estequiométrica, esse sistema determina a quantidade de combustível introduzida em função da quantidade de ar admitida e, caso necessário, corrige em função do sinal de realimentação. Porém, existem pontos de operação do motor onde a condição estequiométrica não pode ser mantida devido à necessidade de enriquecimento da mistura, como é o caso das acelerações rápidas e da condição de plena carga. Esse fato requer que o controlador da mistura ar/combustível seja desabilitado, fazendo com que o sistema adote um valor de tempo de injeção descrito no mapa, suficiente para atender as necessidades de enriquecimento exigidas pelo motor.

Por essas razões, e visando reduzir o tempo de resposta do controlador de mistura, existe a necessidade de implementação da matriz de referência para o tempo de injeção. Essa matriz define, em função da condição de operação do motor, os pontos de partida para o controle em malha fechada e para valores de referência nas condições onde o enriquecimento da mistura ar/combustível é necessário.

A quantidade de combustível introduzida é definida previamente em milissegundos de atuação dos eletroinjetores e armazenada em endereços específicos de memória. Como o armazenamento desse tipo de informação pode gerar atrasos no tempo de processamento da CPU, utilizou-se o conceito de tempo base de injeção representado em valor percentual ($\% JPU$), sendo esta uma das formas de se realizar o controle da injeção de combustível em função da rotação e da carga do motor, como mostrado na Figura 4.25.

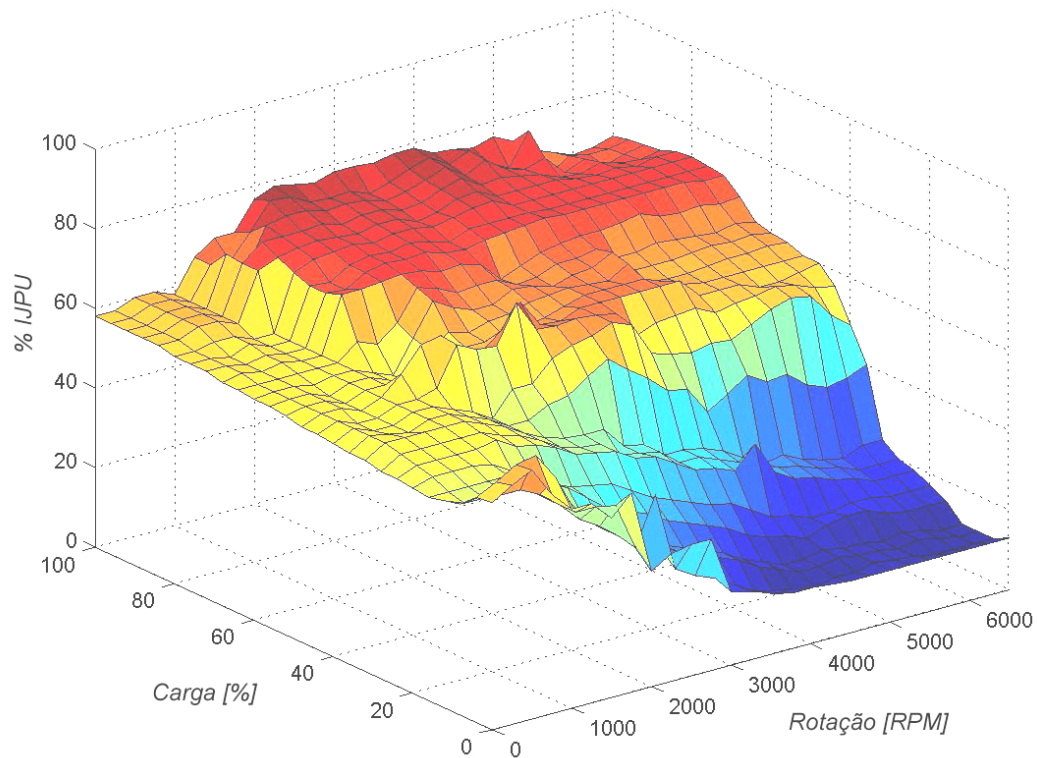


Figura 4.25 – Mapa de tempo base de injeção (%*IJP*). Motor Fire 1.3 8V Gasolina.

Representar o tempo base de injeção em valores percentuais (%*IJP*) é uma das formas de se realizar o controle de injeção de combustível, através da aplicação de um ganho no tempo base de injeção que, em função das condições de rotação e carga do motor, pode variar de 0 a 1 (0-100%). Dessa forma, define-se inicialmente a quantidade necessária de combustível na condição de maior consumo do motor, traduzida em milissegundos de atuação do eletroinjeter, como o tempo máximo de injeção a ser utilizado, sendo então implementado o mapa de %*IJP* com os ganhos associados a cada condição específica de operação.

A principal vantagem desse tipo de calibração é a possibilidade de se otimizar os parâmetros de controle do motor em pontos específicos de funcionamento durante um ensaio dinamométrico realizado em plena carga ou em cargas parciais. Apresenta grande facilidade de alteração no tempo base de injeção e, principalmente a implementação do software de controle que trabalha com um valor fixo multiplicado por um ganho variável, dentro de uma faixa pré-determinada.

No sistema desenvolvido, o mapa de injeção de combustível segue a característica definida anteriormente, sendo realizado através do controle do tempo base de injeção em valores percentuais (%*IJP*), como mostrado na Figura 4.25.

A calibração do mapa de tempo-base de injeção em valores percentuais (% *IJPU*) deve ser realizada através da interface Homem-Máquina (IHM), após a definição da dimensão da matriz de tempo de injeção, sendo a referência do intervalo de rotação e seu respectivo passo (i_{rot}), definidos na sua 1ª Linha. De forma similar, a referência do intervalo de carga e seu respectivo passo (i_{carga}), são definidos na 1ª Coluna. A matriz de controle passa a possuir, em função das características apresentadas, dimensão real $(M-1) \times (N-1)$, sendo essa característica arquivada pelo sistema. A Figura 4.16, mostrada anteriormente, apresenta a tela utilizada para realizar a definição do tempo base de injeção (“**TempInjBase**”), da fase de injeção dos cilindros 1 e 4 (“**AngInj14[°]**”) e da fase de injeção dos cilindros 2 e 3 (“**AngInj23[°]**”).

O parâmetro definido como fase de injeção indica o instante no qual a massa de combustível será introduzida no coletor de admissão, em relação à posição da válvula de admissão. Esse parâmetro afeta diretamente a atomização do combustível e, por sua vez, a formação da mistura, sendo um dos parâmetros de maior influência nos índices de emissões de poluentes de um MCI e no consumo específico de combustível (*SFC*). Como a alteração da fase de injeção representa um impacto direto no *SFC*, esse é o principal indicativo para a otimização da fase de injeção durante o ajuste do SGEM para o motor em bancada dinamométrica.

No SGEM implementado, os ângulos descritos em “**AngInj14[°]**” e em “**AngInj23[°]**” podem assumir qualquer valor entre 0° e 360°, podendo ainda serem iguais, o que implica em um sistema de injeção simultânea (*full group*), defasados de 180° para injeção semi-sequencial (banco a banco). Porém, na injeção semi-sequencial, não existe limitação quanto ao valor da defasagem entre os bancos de injetores, permitindo o acionamento de dois bancos de injeção para um mesmo cilindro. Essa é uma estratégia comum em motores multi-combustíveis onde um deles é de natureza gasosa e em motores de competição de alto desempenho, especialmente sobre-alimentados.

Com base nos dados fornecidos, o sistema de gerenciamento eletrônico desenvolvido cria uma tabela para descrição do mapa de tempo base de injeção em valores percentuais (% *IJPU*), como mostrado na Figura 4.25. Esse mapa é apresentado pela IHM de forma a ser acessado e ajustado a cada condição específica de operação do motor, visando alcançar o objetivo desejado.

4.3.7 Implementação do Controlador de Avanço de Ignição

O controle eletrônico da introdução da centelha de ignição é realizado através da variação do instante em que a corrente no circuito primário da bobina de ignição é interrompida, em relação à posição angular do eixo de manivelas, definida como ângulo de avanço de ignição (Capítulo 3). Por essa razão, a posição e a velocidade angulares do eixo de manivelas são os principais parâmetros de referência do sistema de controle de ignição. Assim como no mapa de tempo base de injeção, o mapa de avanço estático de ignição é composto por valores pré-estabelecidos, que compõe uma matriz de referência para o sistema de controle, em função da condição de operação do motor (rotação x carga), como mostrado na Figura 4.26.

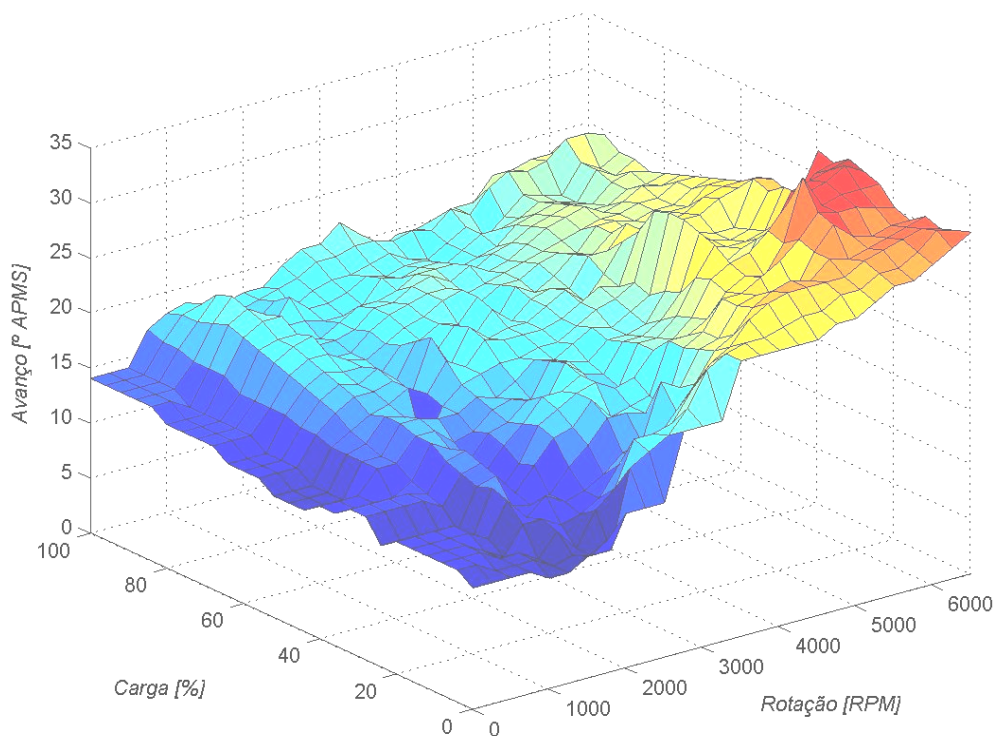


Figura 4.26 – Mapa de avanço estático de ignição. Motor Fire 1.3 8V Gasolina.

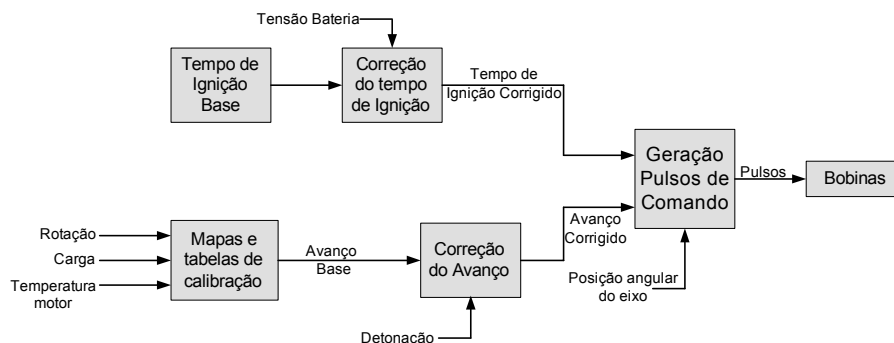
Os pontos que definem essa matriz são salvos em arquivos de texto e, quando enviados através do protocolo serial (R_x/T_x), armazenados em endereços específicos de memória no SGEM dedicados ao mapa de avanço estático de ignição. A principal diferença entre os mapas de avanço de ignição e de tempo base de injeção é o fato do avanço ser representado em um valor real de posição angular anterior ao Ponto Morto Superior ($^{\circ}$ APMS), corrigido em função do atraso causado pelo tempo de carga da bobina (tempo de permanência). Por essa razão, utilizam-se os valores de avanço máximo de ignição e o tempo máximo de permanência para definição da referência do PMS, na aplicação da Equação 4.6.

Através da interface Homem-Máquina (IHM), define-se a dimensão da matriz de avanço estático de ignição utilizando a mesma metodologia empregada na definição da matriz de tempo base de injeção. A referência do intervalo de rotação e seu respectivo passo (i_{rot}) são definidos na 1ª Linha da matriz e a referência do intervalo de carga e seu respectivo passo (i_{carga}), definidos na 1ª Coluna. A matriz de controle passa a possuir a dimensão $(M-1) \times (N-1)$, sendo essa característica arquivada pelo sistema (Figura 4.26).

Com base nos dados fornecidos, o SGEM cria uma tabela para descrição do mapa de avanço estático de ignição com os ângulos reais de avanço a serem aplicados no motor. Esse mapa é apresentado pela IHM, que permite o acesso de maneira simples com a possibilidade de ajuste a cada condição específica de operação do motor. Assim como na formação da mistura ar/combustível, onde se realiza o controle em malha fechada em torno de um valor ideal (estequiométrico), existe também a possibilidade de se desenvolver um sistema de controle de avanço dinâmico de ignição segundo o mesmo princípio de sistemas de controle em malha fechada. Esse controle é realizado em função de um sinal de re-alimentação proveniente de um acelerômetro fixado ao bloco do motor capaz de detectar a ocorrência do fenômeno de detonação (Capítulo 3).

4.3.7.1 Estrutura do Controlador

A Figura 4.27 apresenta a arquitetura de um módulo de controle de ignição, cujo objetivo é de fornecer energia suficiente ao início da combustão da mistura (centelha) capaz de garantir sua queima, além de controlar o ângulo de ignição, buscando maximizar a pressão gerada pela combustão, até que o maior torque observado (*Maximum Brake Torque - MBT*) seja alcançado ou que seja atingida a condição de LDI¹.



4.27 – Diagrama do sistema de controle de ignição implementado.

¹ Limite de Detonação Inferior (LDI): condição limite de avanço de ignição aplicado a um MCI, na qual se evidencia o início da ocorrência do fenômeno da detonação.

O controle da energia da centelha é feito a partir do valor definido para o tempo de permanência (*Dwell time*) corrigido com base na tensão da bateria, determinando assim a duração correta do pulso de comando para o fornecimento da mesma energia de ativação da combustão (Figura 4.27). O controle do avanço consiste em uma ação *feedforward*, baseada nos mapas de referência, e da re-alimentação através do sensor de detonação. A ação *feedforward* determina a condição de operação do motor, através das medições de rotação, pressão no coletor, posição da borboleta, temperatura do ar e do motor e a tensão da bateria e aplica o ângulo estático de ignição definido no mapa.

O estágio de correção do avanço recebe a informação do estágio de identificação e atua sobre o ângulo base no caso de ocorrência do fenômeno. Uma estratégia usual consiste em reduzir o avanço de um valor fixo sempre que a detonação é detectada. Se a ocorrência da detonação não é mais evidenciada, o ângulo de avanço recebe um incremento a cada passo, até retornar ao valor estático definido no mapa.

Em sistemas que utilizam bobinas individuais para cada cilindro, pode-se ainda implementar estratégias de identificação a origem da detonação e limitar o avanço apenas nos cilindros onde a mesma está ocorrendo. Isso permite que os outros cilindros operem em condição ótima, obtendo-se o melhor desempenho do motor.

4.3.7.2 Estratégia de Correção

A condição ideal de correção do avanço de ignição é realizada segundo o princípio de controle em malha fechada, como citado anteriormente. Apesar da possibilidade da correção dos valores de avanço de ignição em função da ocorrência do fenômeno da detonação, o controlador implementado, apresentado nesse trabalho, realiza apenas a aplicação dos valores de avanço estáticos de avanço de ignição mapeados durante o ajuste do SGEM no motor. Dada a complexidade do problema de detecção da detonação, através dos métodos apresentados por Braga (2004), optou-se pela elaboração de um sistema de controle em malha aberta, baseado na ação *feedforward* de controle.

Ainda que o sistema opere em malha aberta, é possível realizar uma correção em função da temperatura do ar no coletor de admissão, visto que esse é um parâmetro de grande influência na ocorrência do fenômeno da detonação.

Essa correção visa reduzir o avanço de ignição, definido no mapa de referência, em função do aumento da temperatura do ar no coletor de admissão. As principais causas são: variação nas condições atmosféricas, aumento de temperatura do ar no vão-motor, circulação natural ou forçada do ar através do sistema de arrefecimento ou pelo pico de temperatura no vão-motor após uma parada brusca do veículo.

O aumento de temperatura do ar na admissão é ainda favorecido pelo crescimento anual da frota nacional, que promove uma redução da velocidade média do trânsito nos grandes centros urbanos. Essa condição aumenta a transferência de calor entre o vão-motor os dutos do sistema de aspiração, elevando a temperatura do ar admitido. A Tabela IV.12 apresenta a matriz de correção do avanço de ignição em função do aumento anormal da temperatura do ar no coletor de admissão, causado por problemas inerentes de temperatura no vão-motor.

Tabela IV.12 – Redução do avanço de ignição em função da temperatura do ar admitido.

	Temperatura do ar no coletor de admissão [°C]					
	45	50	55	60	65	70
Correção do avanço de ignição [° APMS]	-2,0	-3,0	-3,5	-4,5	-5,0	-6,5

No exemplo apresentado, percebe-se predominantemente uma tendência à redução do avanço de ignição com o aumento da temperatura. Da mesma forma que se apresenta essa tendência à redução devido aos valores negativos apresentados, valores positivos de correção podem ser inseridos em função de temperaturas abaixo da condição mínima de ajuste (20°C) de forma a promover um avanço de ignição maior do que o mapeado, em regiões específicas de temperatura do ar de admissão.

Apesar de possíveis, essas condições não são facilmente encontradas em países tropicais, como o Brasil. As variações no ângulo de avanço de ignição estão sempre relacionadas ao mapa de avanço de ignição principal, respeitando a condição inicial estabelecida durante o ajuste do SGEM no motor. Dessa forma, caso os valores tabelados sejam iguais a zero, o SGEM adota os valores mapeados, sem a aplicação de correções citadas.

4.3.8 Estratégia de Partida a Frio

Uma das estratégias utilizadas durante a realização de partidas a frio é o aumento do tempo base de injeção em função da temperatura do motor e durante as primeiras voltas do eixo de manivelas. Esse enriquecimento da mistura facilita a partida, reduzindo os tempos associados (Krause e Spies, 1996). A primeira parte consiste no enriquecimento da mistura durante as primeiras voltas do eixo de manivelas. Através de uma janela específica da IHM (Figura 4.28) define-se o limite de temperatura do motor para habilitação dessa estratégia (“**PartFrio_TempRef**”). Em condições de partida onde a temperatura do motor for menor ou igual à definida, aplica-se o ganho percentual (“**PartFrio_GanhoInicial**”) no tempo base de injeção, que promove o enriquecimento da mistura na partida. O ganho aplicado é reduzido a cada volta, de acordo com uma taxa de decremento (“**PartFrio_TaxaDecaim**”), finalizando quando o ganho percentual aplicado for reduzido a zero.

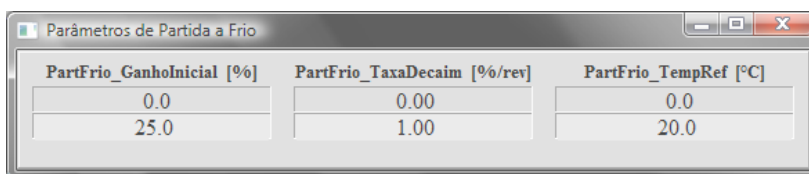


Figura 4.28 – Configuração da estratégia de enriquecimento em partidas a frio.

A segunda parte da estratégia consiste em aplicar uma correção percentual no tempo base de injeção, de acordo com a temperatura do líquido de arrefecimento do motor. A Tabela IV.13 apresenta a matriz de correção em função dessa temperatura, que define essa parte da estratégia de partida a frio.

Tabela IV.13 – Correção do tempo base de injeção em função da temperatura líquido de arrefecimento do motor.

	Temperatura do líquido de arrefecimento do motor [°C]							
	-15	-10	-5	0	5	10	15	20
Varição no Tempo base [%]	15,0	12,0	10,5	9,5	9,0	8,5	5,0	0,0

De forma similar à Tabela IV.13, podem ser implementadas as correções do tempo base de injeção em função da temperatura do ar admitido e da pressão absoluta no coletor. É importante citar que, assim como na correção do ângulo de avanço de ignição, esse enriquecimento ou empobrecimento é sempre relacionado ao mapa de injeção principal, respeitando a condição inicial estabelecida durante o ajuste do SGEM no motor. Dessa forma, caso os valores tabelados sejam iguais a zero, o SGEM adota os valores mapeados, sem a aplicação de correções durante as partidas a frio.

4.3.9 Estratégia de Enriquecimento em Aceleração

A condição definida como aceleração rápida ocorre mediante variações abruptas da posição da válvula borboleta, que promovem o aumento da vazão de ar e conseqüentemente o empobrecimento da mistura. Esse fenômeno ocorre devido ao pico de pressão no coletor e à condensação do combustível. Essa condição exige um aumento instantâneo da quantidade de combustível injetada no motor, realizada com a aplicação de um ganho no tempo base de injeção. O sistema detecta estas condições através da posição da válvula borboleta ou da pressão no coletor. Em especial, o controlador implementado responde aumentando percentualmente a largura do pulso de injeção durante a aceleração rápida, minimizando o empobrecimento da mistura causado pelo pico de pressão de ar no coletor de admissão. A Figura 4.29 apresenta os parâmetros de configuração dessa estratégia, configurados através da IHM.

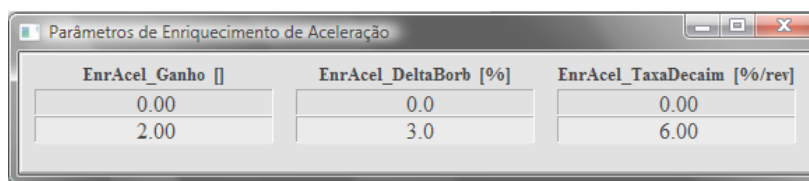


Figura 4.29 – Configuração da estratégia de enriquecimento em aceleração rápida.

A estratégia consiste em medir a posição da borboleta, sendo habilitada nas condições onde a variação da posição é maior que o valor mínimo configurado em “**EnrAcel_DeltaBorb**”. O controlador aplica um ganho percentual no tempo de injeção, definido em “**EnrAcel_LimMinDelta**”, para compensar o empobrecimento da mistura causado pela abertura da borboleta. O ganho percentual aplicado é reduzido a cada ciclo, de acordo com a taxa de decremento definido em “**EnrAcel_TaxaDecaim**”. O fim da estratégia ocorre quando o ganho percentual aplicado for igual a zero.

Devido à necessidade de enriquecimento da mistura ar/combustível, o sinal de re-alimentação (EGO) deve ser desprezado, permanecendo o controlador de mistura em malha aberta durante a sua ocorrência, evitando uma ação contrária ao enriquecimento. Como esta estratégia está diretamente ligada às condições de operação do motor no veículo, as simulações feitas em dinamômetro permitem apenas avaliar se o valor de referência, o ganho percentual e a taxa de decremento são suficientes para o motor aumentar a rotação em aceleração livre (sem cargas aplicadas). A validação completa dessa estratégia exige o motor aplicado sobre o veículo, não sendo objetivo desse trabalho.

4.3.10 Implementação do Controlador de Mistura Ar/Combustível

A primeira parte do desenvolvimento de um sistema de controle é a determinação do modelo matemático que traduz o seu comportamento dinâmico quando estimulado por uma entrada ou perturbação. Para a determinação do modelo, mediu-se o comportamento de um motor² com a aplicação de entradas em degrau no valor do tempo base de injeção, promovendo variações em degrau no fator Lambda (λ). As condições iniciais de operação do motor para obtenção do modelo são de borboleta fechada, rotação próxima à referência de marcha lenta (± 1050 RPM, mantida por uma posição fixa do atuador de marcha lenta) e mistura em torno da condição estequiométrica. O mapa de avanço estático de ignição foi mantido constante em 10° APMS em todos os pontos.

A aplicação de um degrau no tempo de injeção requer que o valor adicional aplicado, correspondente ao degrau, não varie com a rotação. Deste modo, os valores descritos no mapa de percentual do tempo base de injeção devem ser capazes de manter valores de mistura estequiométrica ao longo da faixa de oscilação da rotação. Porém, os testes mostram a impossibilidade da adoção de um valor fixo de tempo de injeção, capaz de manter o motor funcionando de forma estável na condição estequiométrica, independente da rotação. À medida que o tempo de injeção é ajustado e a relação ar/combustível real ($A/F_{(R)}$) se aproxima da estequiométrica ($\lambda \rightarrow 1,00$), a oscilação da rotação faz com que a mistura ultrapasse a condição estequiométrica (empobrecimento), causando uma tendência oscilatória na rotação. Por isso, os testes de obtenção do modelo foram realizados com mistura rica, minimizando esse efeito.

Todos os pontos do mapa de tempo base de injeção ($\%JPU$) foram configurados para 20% de correção, sendo o degrau aplicado apenas pela mudança no tempo base de injeção. Os testes de resposta ao degrau foram realizados com a alteração deste parâmetro através da IHM, e da medição da rotação e de λ através de um sensor *UEGO*. Os dados foram aquiridos pelo módulo *DataLog* a uma frequência de 20 Hz. Foram aplicadas entradas com degrau positivo e negativo com diferentes amplitudes. A Tabela IV.14 mostra os parâmetros de entrada e os obtidos para definição do modelo.

² Motor FIASA 1.0 8V m.p.i – Gasolina, montado sob bancada didática para realização de aulas experimentais.

Tabela IV.14: Parâmetros de entrada da simulação e do modelo de 1ª Ordem com tempo morto para controle de mistura ar/combustível.

Teste	Amplitude Degrau [ms]	Instante Degrau [s]	Início da Resposta [s]	Amplitude Resposta [λ]	Constante Tempo [s]	Ganho [λ /ms]	Tempo Morto [s]
1	0,15	2,78	2,95	-0,052	0,20	-0,346	0,17
2	-0,15	3,47	3,66	0,053	0,21	-0,353	0,19
3	0,30	3,99	4,20	-0,101	0,20	-0,336	0,21
4	-0,30	3,18	3,35	0,105	0,24	-0,350	0,17
5	0,30	2,05	2,25	0,099	0,23	-0,330	0,20
6	-0,30	2,32	2,56	-0,101	0,25	-0,336	0,24
7	0,45	4,41	4,62	0,150	0,22	-0,333	0,21
8	-0,45	4,86	5,08	-0,148	0,20	-0,328	0,22
Médias					0,21	-0,34	0,20

A dinâmica apresentada após a aplicação das entradas mostra que o sistema apresenta um comportamento de 1ª Ordem com atraso de tempo (Figuras 4.30 e 4.31). A partir dos resultados obtidos na faixa de operação considerada, o sistema apresenta comportamento de 1ª ordem com tempo morto. Dessa forma, foi possível ajustar um modelo de 1ª ordem com tempo morto, capaz de explicar de forma satisfatória o comportamento do sistema na faixa de operação considerada.

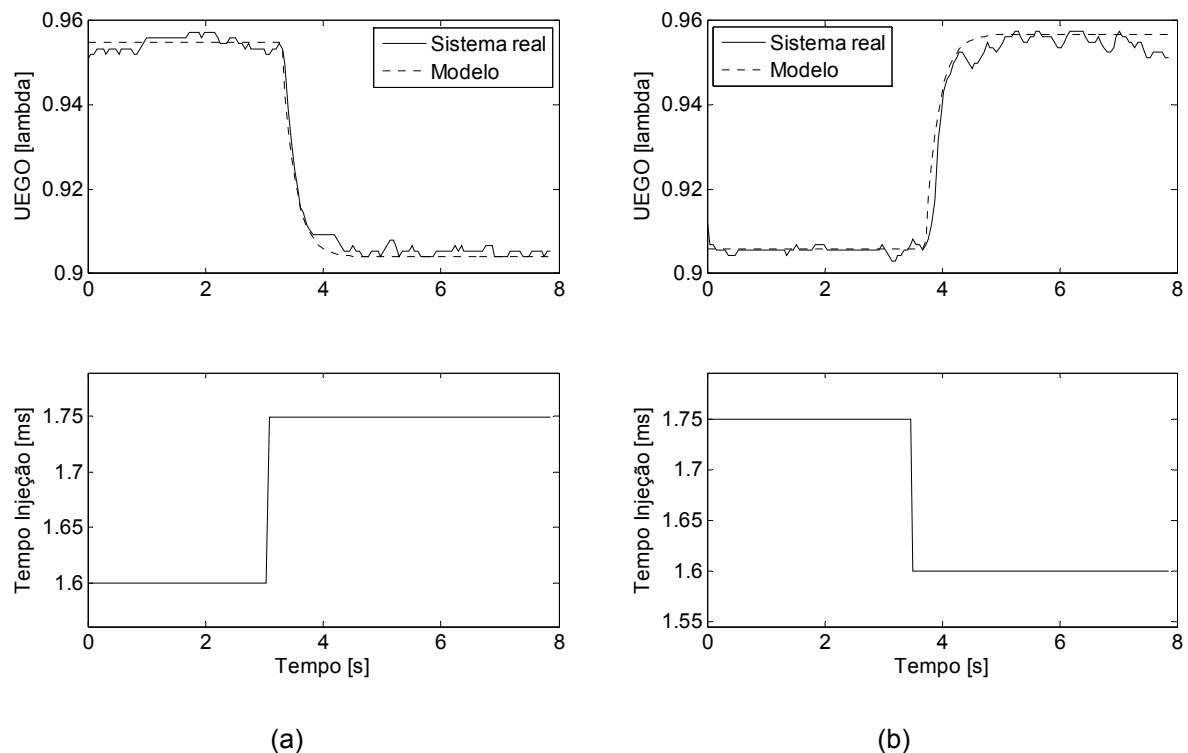


Figura 4.30 – Resposta dinâmica do sistema real à entrada degrau positiva (a) e negativa (b), com amplitude de 0,15 ms no tempo base de injeção.

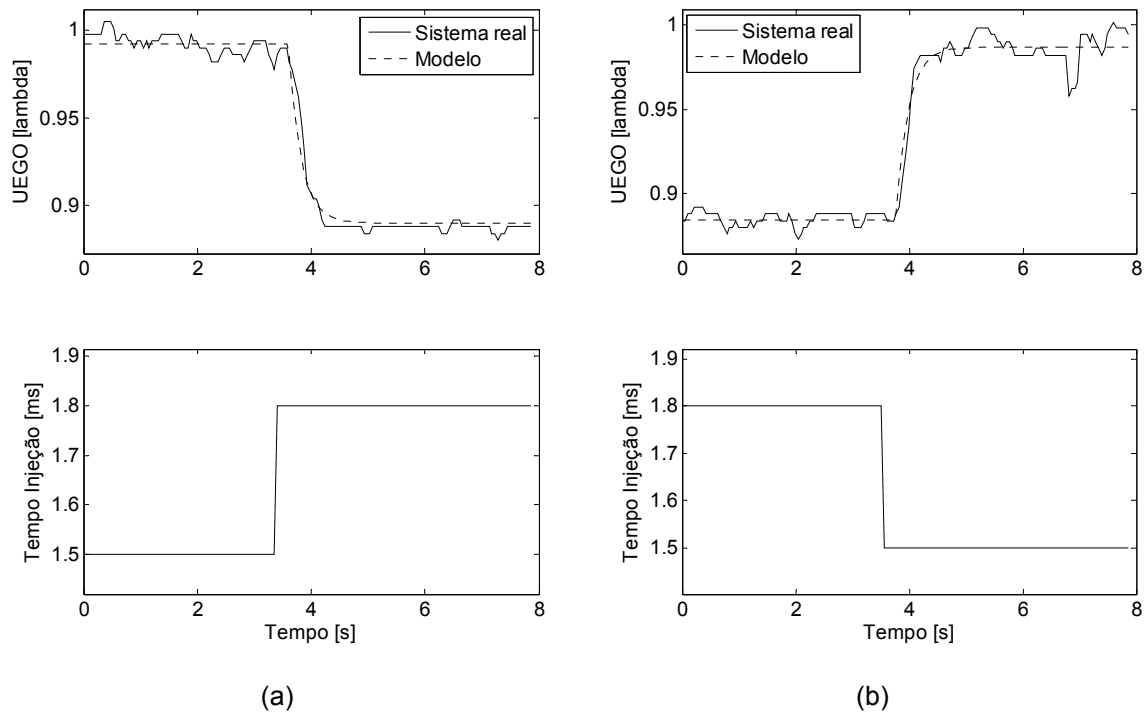


Figura 4.31 – Resposta dinâmica do sistema real à entrada degrau positiva (a) e negativa (b), com amplitude de 0,30 ms no tempo de injeção.

As Figuras 4.30 e 4.31 mostram os testes de obtenção do modelo com a aplicação de degraus positivos e negativos em diferentes amplitudes. Observa-se que o modelo obtido descreve o comportamento do sistema de forma satisfatória, na condição de mistura rica. Na condição de mistura pobre, o sistema real se afasta deste comportamento linear e, conseqüentemente, do modelo apresentado. A função de transferência do modelo de 1ª ordem obtido pode ser descrita segundo a equação:

$$G(s) = \frac{K}{\tau \cdot s + 1} \cdot e^{-\theta \cdot s} = \frac{-0,34}{0,22 \cdot s + 1} \cdot e^{-0,2 \cdot s} \quad (4.23)$$

Devido à necessidade de controlar a mistura ar/combustível em torno da condição estequiométrica ($\lambda = 1,00$), na maioria das condições de operação de um motor, um controlador Proporcional Integral (PI) foi implementado e dedicado exclusivamente a essa função. Braga (2007) apresenta toda a metodologia necessária à implementação desse sistema de controle em função da dinâmica apresentada pelo modelo, através da aplicação do método de síntese direta mostrado por Seborg *et al* (1989), além da sintonia do controlador implementado em um motor comercial.

Deve-se ressaltar que o modelo aqui apresentado somente deve ser aplicado em sistemas com re-alimentação por meio de sensor linear (*UEGO*). A utilização do *EGO* implica em uma característica não-linear na malha de realimentação, tornando a abordagem clássica através de modelos lineares inadequada. Deste modo, foi utilizada uma estratégia alternativa para obter valores iniciais dos ganhos do controlador PI realimentado pelo sensor *EGO*, que consiste em simular a malha de controle com um controlador PI e o modelo obtido com sensor *UEGO*, aplicando uma não-linearidade do *EGO* na malha de realimentação, como mostra o modelo da malha de controle da Figura 4.32, utilizando o ambiente *Simulink* do Matlab.

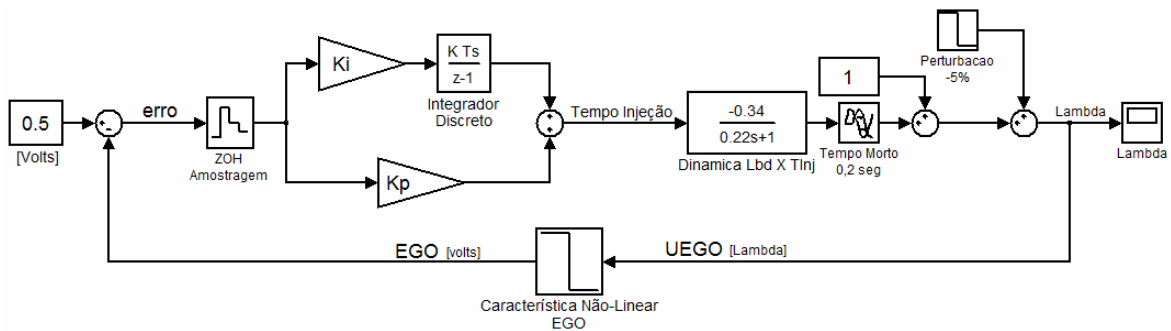


Figura 4.32 – Malha de controle de Lambda com re-alimentação não-linear (EGO).

A opção de se implementar um controlador PI foi baseada nas referências bibliográficas e devido às características do motor como sistema de controle. A Figura 4.33 mostra a janela de configuração desse controlador através da IHM. Aos leitores interessados em conhecer o controlador de mistura ar/combustível implementado, recomenda-se a leitura de Braga (2007) onde são apresentados todos os detalhes desse sistema, juntamente com a metodologia e os testes realizados com esse controlador.

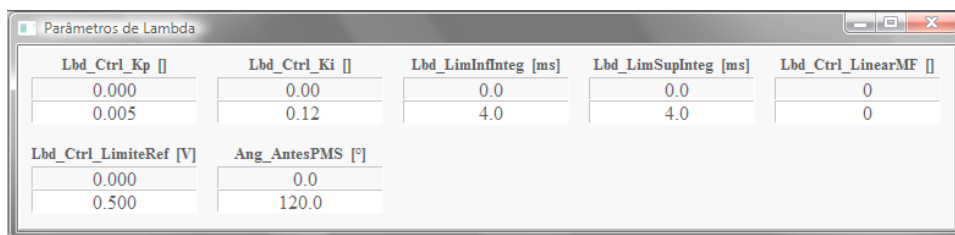


Figura 4.33 – Configuração do controlador de mistura ar/combustível via IHM.

A exibição dos parâmetros do controlador de Lambda (Figura 4.33) permite configurar os ganhos K_p e K_i do controlador, os limites máximo e mínimo para a correção gerada, o tipo de sensor utilizado na re-alimentação (*EGO* ou *UEGO*), o valor de referência para o controlador e posição angular da falha da roda dentada em relação ao PMS do cilindro 1. Para facilitar o entendimento de cada parâmetro, os mesmos são apresentados na Tabela IV.15, juntamente com a sua respectiva descrição e unidade.

Tabela IV.15 – Parâmetros do controlador de mistura ar/combustível.

Parâmetro	Descrição
Lbd_Ctrl_Kp	Ganho proporcional Kp do controlador PI.
Lbd_Ctrl_Ki	Ganho proporcional Ki do controlador PI.
Lbd_LimInfInteg	Limite mínimo, em milisegundos, para correção do controlador PI.
Lbd_LimSupInteg	Limite máximo, em milisegundos, para correção do controlador PI.
Lbd_Ctrl_LinearMF	Tipo de sensor utilizado na re-alimentação (0 = EGO e 1 = UEGO).
Lbd_Ctrl_LimiteRef	Valor de referência, em volts, para <i>set point</i> do controlador.
Ang_AntesPMS	Posição angular da falha da roda dentada em relação ao sensor de rotação, com o cilindro 1 no PMS e em fase de compressão.

O valor de referência para o controlador implementado é dado em tensão, e deve ficar em torno de 500 mV para o controle através do EGO e em torno de 1V para controle com UEGO. Deve ser lembrado que o sensor UEGO apresenta uma relação direta entre a tensão gerada e o valor do lambda, como mostrado no Capítulo 3.

Apesar de possuir as mesmas características de um controlador convencional, as aplicações automotivas exigem que o sistema de controle seja capaz de alternar entre condições de operação em malha aberta e em malha fechada, além da inibição completa da ação de controle em função da necessidade de enriquecimento ou empobrecimento de algumas condições de operação, compensando fenômenos inerentes ao seu funcionamento.

Para que o controlador seja capaz de alternar entre condições de malha aberta ou malha fechada é necessária a definição, através de um mapa, das condições nas quais o sistema de controle adota a possibilidade de controle. O mapa de referência de Lambda é um dos principais componentes do sistema, sendo a base de dados utilizada pelo SGEM para identificar as regiões nas quais o controlador de mistura ar/combustível adota a condição de operação em malha aberta ou em malha fechada.

É possível realizar essa alternância a partir da inclusão de um fator multiplicador de dois estados ($f_{0/1}$) na equação que define a ação do controlador PI de mistura ar/combustível (Eq 3.19), de forma a inibir a correção de T_{CL} , de acordo com a equação:

$$C_L(t) = K_P \cdot \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt \right] \cdot f_{0/1} \quad (4.24)$$

O fator multiplicador de dois estados ($f_{0/1}$) é um número inteiro que pode assumir o valor zero ou 1, dependendo da condição descrita no mapa. Para valores de $f_{0/1} = 1$, a ação de controle PI é mantida, tornando o controlador de mistura ar/combustível apto a operar na condição de malha fechada, com a aplicação do fator de correção de Lambda (C_L).

Por outro lado, se $f_{0/1} = 0$, a ação de controle PI é inibida, o controlador retorna à condição de malha aberta, que define o tempo de injeção de combustível em função de um modelo (Equação 3.17). A referência de Lambda é descrita em um mapa MxN, formado por 0 ou 1, que depende da condição de operação do motor, como apresentado na Tabela IV.16.

Tabela IV.16 – Mapa de referência para controlador de mistura ar/combustível.

Carga [%]	Rotação [RPM]										
	1000	1500	2000	...	3500	4000	4500	...	5500	6000	6500
0	1	1	1	...	1	1	1	...	1	1	1
5	1	1	1	...	1	1	1	...	1	1	1
10	1	1	1	...	1	1	1	...	1	0	0
...
45	1	1	1	...	1	1	1	...	0	0	0
50	1	1	1	...	1	1	0	...	0	0	0
55	1	1	1	...	1	0	0	...	0	0	0
...
90	1	1	1	...	0	0	0	...	0	0	0
95	1	1	0	...	0	0	0	...	0	0	0
100	1	0	0	...	0	0	0	...	0	0	0

Como o mapa de referência define a condição de operação do controlador, existe uma faixa de transição entre a condição de malha fechada ($f_{0/1} = 1$) e de malha aberta ($f_{0/1} = 0$) para cada linha. Esses pontos formam, como destacado na Tabela IV.16, uma diagonal que representa a transição entre condições de operação do controlador.

Sua posição reflete diretamente no consumo mássico de combustível, visto que em malha aberta, a quantidade de mistura definida no mapa é sempre maior que a necessária para a condição de mistura estequiométrica. Grande parte dos motores de combustão interna atuais apresentam ainda a necessidade de enriquecimento de até 15% em relação à condição estequiométrica ($\lambda = 0,85$), em condições de rotação e carga elevadas, onde a temperatura do conversor catalítico (*TWC*) pode superar os limites de operação, devido à sua proximidade ao coletor de descarga (*closed couple conversor*).

Uma forma de evitar o controle de temperatura do conversor catalítico com o enriquecimento da mistura é a utilização de sistemas de recirculação dos gases de descarga (*EGR*), que possibilitam esse controle através da introdução de parte dos gases de descarga no coletor de admissão do motor. Essa ação promove, além da redução consumo de combustível com o enriquecimento da mistura, uma redução dos níveis de emissão de poluentes devido à alta reatividade do Monóxido de Carbono (CO) e dos Óxidos de Nitrogênio (NO_x) presentes nos gases de descarga que são re-introduzidos na câmara de combustão e reagem com o Oxigênio (O₂) presente.

A desvantagem da utilização da *EGR* é o decremento de torque gerado pela recirculação dos gases que, em motores sobre-alimentados, pode ser compensada com o aumento na pressão no coletor de admissão.

Outra forma de controlar a temperatura do conversor catalítico é a maximização do ângulo de avanço de ignição mesmo em cargas parciais, tornando as curvas de avanço mais planas, sem prejuízos ao torque desenvolvido pelo motor.

A diagonal de transição também influencia na curva de consumo específico de combustível (*SFC*), pelo fato do motor desenvolver uma potência nominal maior com o enriquecimento da mistura, quando comparados aos valores obtidos com mistura estequiométrica, nas mesmas condições de rotação e carga. O calor latente dos combustíveis líquidos também favorece a redução do *SFC* visto que a absorção de calor do ar admitido aumenta o rendimento volumétrico e a pressão média efetiva (PME) do ciclo e, conseqüentemente, a potencia nominal desenvolvida pelo motor (Baeta, 2006).

Por essa razão, os pontos de transição devem sempre ser avaliados não só em função da temperatura do conversor catalítico, mas também em relação ao consumo específico de combustível. A composição e a concentração dos gases de descarga também sofrem influência da posição da diagonal de transição, sendo essa outra condição que deve ser avaliada durante a definição sua definição.

Já o enriquecimento da mistura ar/combustível é uma condição necessária ao funcionamento do motor que deve ser cuidadosamente avaliada para evitar o consumo excessivo e desnecessário de combustível, além da grande influência nos índices de emissão de poluentes. A Figura 4.34 apresenta um fluxograma da estratégia do controlador de mistura ar/combustível implementado.

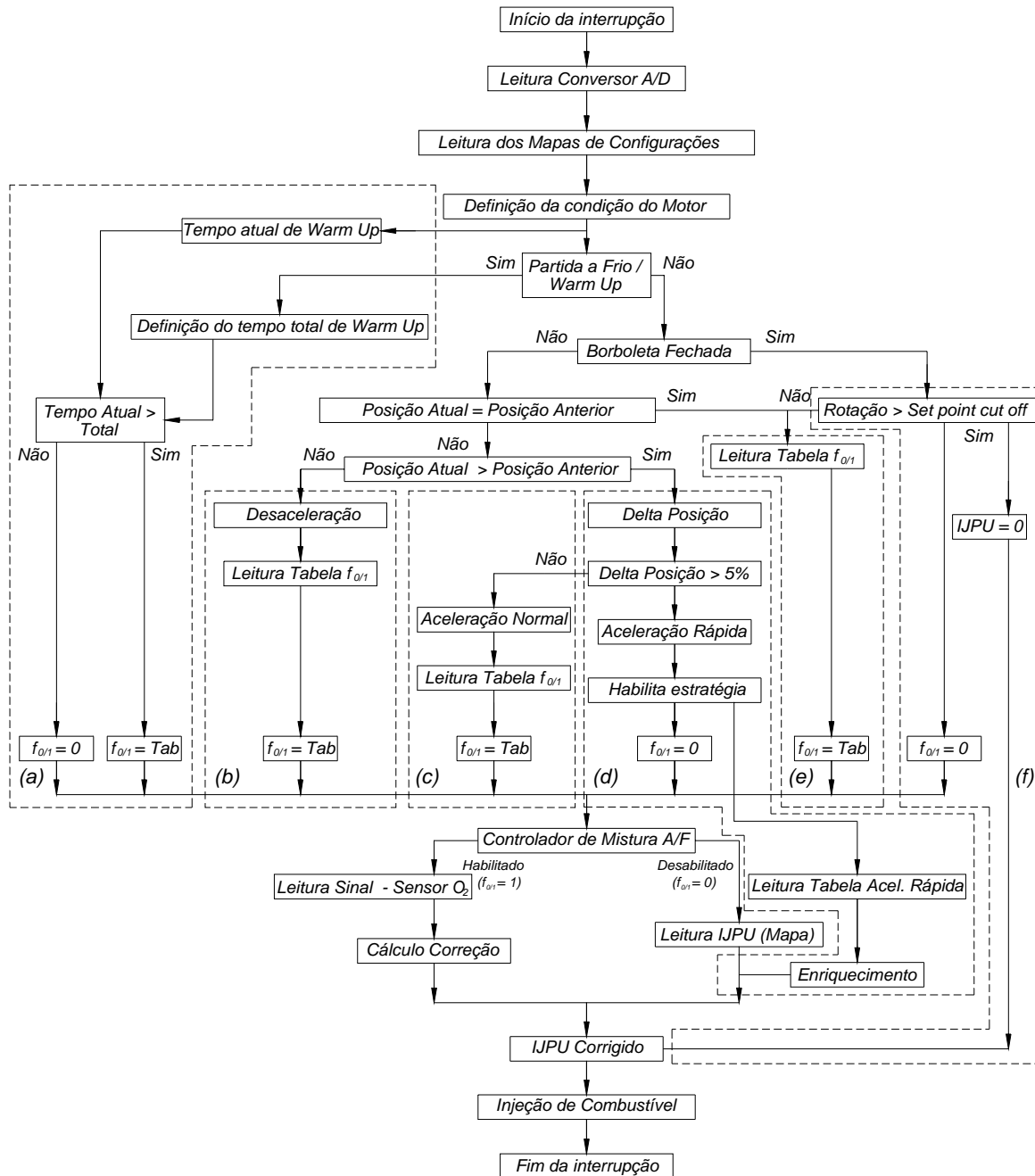


Figura 4.34 – Fluxograma do controlador de mistura ar/combustível implementado.

A Figura 4.34, mostra das as condições que exigem a operação do controlador em malha aberta onde se impõe a condição de $f_{0/1} = 0$ (4.34-a, 4.34-d e 4.34-f), e as condições controladas pelo Mapa de referência ($f_{0/1} = Tab$) onde, em função da condição de operação, o controlador pode operar em malha aberta ou fechada (4.34-b, 4.34-c e 4.34-e).

Uma das condições de operação do controlador em malha aberta é evidenciada durante as partidas a frio e a fase de aquecimento do motor, mostrada na Figura 4.34-a, visto que o sinal de realimentação, proveniente do sensor de O₂, apresenta uma histerese em temperaturas inferiores a 300 °C. Nessas condições, o sistema implementado mantém o controlador na condição de $f_{0/1} = 0$ (malha aberta) durante um intervalo de tempo definido pela Tabela de referência (Tabela IV.17) que apresenta o tempo de operação em malha aberta em função da temperatura do líquido de arrefecimento do motor.

Tabela IV.17 - Tempo de operação em malha aberta em função da temperatura do motor.

	<i>Temperatura do líquido de arrefecimento [°C]</i>							
	<i>←-15</i>	<i>-10</i>	<i>0</i>	<i>+10</i>	<i>+20</i>	<i>+30</i>	<i>+40</i>	<i>+ 50→</i>
Tempo Open Loop [s]	40,0	32,0	26,5	21,5	18,0	11,5	3,0	1,0

Esse tempo pode também ser, por exemplo, a saída de um modelo matemático que correlaciona entradas como a temperatura do ar no coletor de admissão, a temperatura do líquido de arrefecimento, a cilindrada e a relação volumétrica de compressão do motor, a rotação de marcha lenta, a massa, e o calor específico do material cerâmico presente no conversor catalítico.

A partir dessas variáveis é possível estimar a energia fornecida ao sistema de escapamento e, por sua vez, o tempo de aquecimento do sensor de O₂. Esse é um método que pode otimizar a condição descrita na Tabela IV.17, visando minimizar o tempo de operação do controlador de mistura em malha aberta. Porém, devido a limitações para a simulação de baixas temperaturas para ajuste e validação, o modelo descrito anteriormente não foi implementado.

Finalizado a fase de aquecimento do motor, o sistema passa então para a condição de operação definida no mapa de referência ($f_{0/1} = Tab$), sendo a posição da borboleta o primeiro critério avaliado pelo sistema.

Em condições de desaceleração (4.34-b), aceleração normal (4.34-c) ou regime estável de operação (4.34-e), o controlador opera em condição de malha aberta ou fechada, em função dos valores descritos no mapa de referência.

Outra condição que exige a operação do controlador em malha aberta é a necessidade de enriquecimento da mistura durante uma aceleração rápida. Essa condição é caracterizada pela variação brusca da posição da borboleta e identificada pelo seu sensor de posição. A Figura 4.34-d apresenta uma condição onde variações maiores que 5% na posição da borboleta indicam a necessidade de enriquecimento da mistura e, para que ocorra, a condição de $f_{0/1} = 0$ deve ser imposta ao controlador.

A condição de malha aberta é necessária não só para promover o enriquecimento da mistura, mas também para o seu empobrecimento. Na condição de desaceleração do veículo com a borboleta fechada, o sistema habilita a estratégia de corte de combustível (*fuel cutoff*) visando reduzir o consumo de combustível e melhorar a condição de freio motor. Para possibilitar o corte da injeção de combustível ($JPU=0$) é necessário que o controlador seja desabilitado ($f_{0/1} = 0$), inibindo sua ação de correção. Essa condição é identificada quando a borboleta do motor está fechada e sua rotação acima de um valor de referência pré-estabelecido (*Set point – cut off*).

Devido à complexidade do controlador de mistura ar/combustível, a Tabela IV.18 apresenta de forma resumida as condições de malha fechada e aberta em função das diferentes condições de operação do motor.

Tabela IV.18 – Condições de operação do controlador de mistura ar/combustível.

Controle em Malha Fechada (Closed loop control)		
Aceleração Normal	$f_{0/1} = \text{Tabela}$	Estequiométrico – Rico
Regime Estável	$f_{0/1} = \text{Tabela}$	Estequiométrico – Rico
Desaceleração Normal	$f_{0/1} = \text{Tabela}$	Estequiométrico – Rico
Controle em Malha Aberta (Open loop control)		
Aquecimento (<i>Warm-Up</i>)	$f_{0/1} = 0$	Enriquecimento
Aceleração Rápida	$f_{0/1} = 0$	Enriquecimento
Desaceleração (<i>Cutoff</i>)	$f_{0/1} = 0$	Empobrecimento

4.3.11 Implementação do Controlador de Marcha Lenta

Assim como no controlador de mistura ar/combustível, a implementação do controlador de marcha lenta foi iniciada com a determinação do modelo matemático que traduz a dinâmica da rotação em função da posição do atuador de marcha lenta. Para tal, mediu-se o comportamento de um motor³ com a aplicação de entradas em degrau na vazão mássica de ar no coletor através da variação da posição do atuador de marcha lenta, cujo controle e acionamento serão abordados nos itens seguintes.

As condições iniciais de operação do motor para obtenção deste modelo são de válvula borboleta fechada, rotação próxima à referência de marcha lenta, a partir de uma posição fixa do atuador de marcha lenta e mistura em torno da condição estequiométrica. Como a variação da posição do atuador de marcha lenta causa perturbação no Lambda e, conseqüentemente na rotação, foi necessário realizar os testes com o controlador de Lambda em malha fechada, re-alimentado pelo sensor *EGO*. Braga (2007) apresenta em detalhes o ajuste dos ganhos do controlador de Lambda para a condição citada.

Assim como no modelo para controle da mistura, o mapa de avanço de ignição (Item 4.3.6) foi mantido constante em 10° APMS em todos os pontos. Apesar do atuador de marcha lenta se mover como uma rampa, o mesmo é rápido o suficiente para ser considerado uma entrada degrau para o sistema real.

Os testes de resposta ao degrau foram realizados com a alteração da posição do atuador de marcha lenta através da IHM, e da medição da rotação em função do degrau aplicado. Os dados foram adquiridos pelo módulo *DataLog* a uma frequência de 20 Hz. Como o período de amostragem é de 50 ms, a amplitude máxima aplicada no atuador foi de 10 passos, visto que o acionamento do mesmo requer um tempo mínimo de 5,0 ms. Foram aplicadas entradas com degrau positivo (fechamento) e negativo (abertura) e com amplitude diferente. A Tabela IV.19 mostra os parâmetros de entrada positiva da simulação e os obtidos para definição do modelo.

³ Motor FIASA 1.0 8V m.p.i – Gasolina, montado sob bancada didática para realização de aulas experimentais.

Tabela IV.19 – Parâmetros de entrada positiva da simulação e do modelo de 1ª Ordem com tempo morto para controle de marcha lenta.

Teste	Amplitude Degrau [ms]	Instante Degrau [s]	Início da Resposta [s]	Amplitude Resposta [RPM]	Constante Tempo [s]	Ganho [RPM/passo]	Tempo Morto [s]
1	5	3,35	3,66	-112	0,47	-22,4	0,31
2	5	4,67	4,96	-114	0,49	-22,8	0,29
3	5	3,95	4,27	-111	0,52	-22,2	0,32
4	8	3,63	3,96	-176	0,48	-22,0	0,33
5	8	5,12	5,39	-174	0,53	-21,8	0,27
6	10	9,34	9,62	-213	0,49	-21,3	0,28
7	10	4,20	4,49	-217	0,54	-21,7	0,29
8	10	6,31	6,58	-210	0,52	-21,0	0,27
Médias					0,50	-21,89	0,30

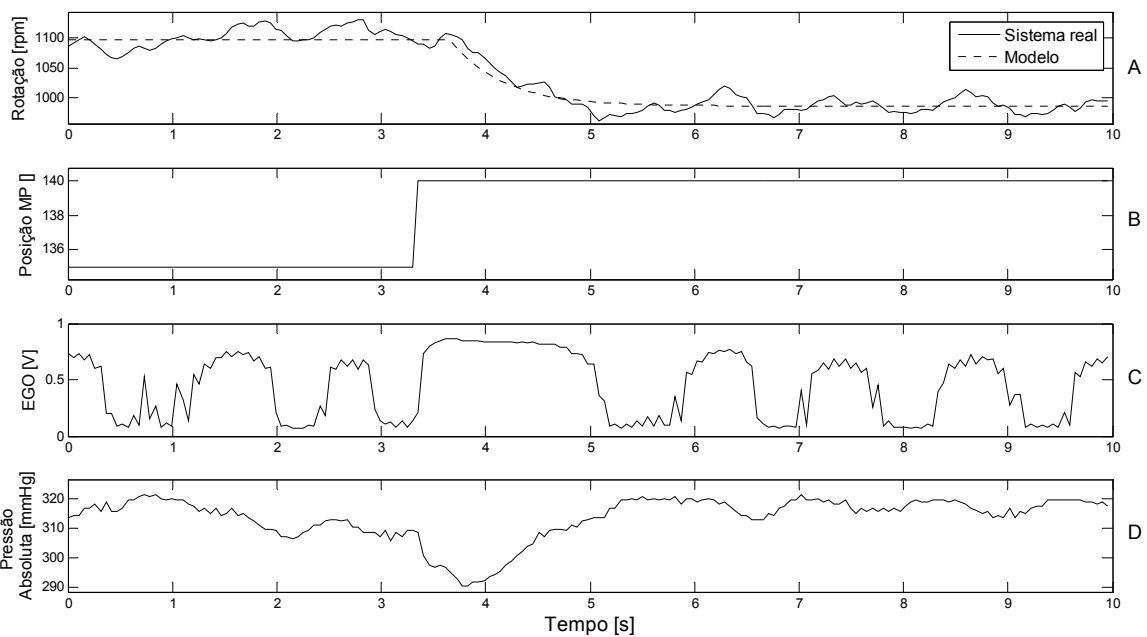


Figura 4.35 – Resposta dinâmica do sistema real e do modelo à entrada degrau positiva com amplitude de 5 passos no atuador de marcha lenta.

A dinâmica apresentada com a aplicação da entrada degrau positiva mostra que o sistema apresenta um comportamento de 1ª Ordem com tempo morto (Figura 4.35). A partir da média dos parâmetros descritos na Tabela IV.19, pode-se determinar a função de transferência do modelo de 1ª ordem obtido, descrita segundo a equação:

$$G(s) = \frac{K}{\tau \cdot s + 1} \cdot e^{-\theta \cdot s} = \frac{-22}{0,5 \cdot s + 1} \cdot e^{-0,3 \cdot s} \quad (4.25)$$

A Figura 4.35 mostra uma condição oscilatória da mistura (Curva C) em torno da condição estequiométrica desejada para esse tipo de controlador. Apresenta ainda a variação de pressão de ar no coletor de admissão (Curva D) no momento do fechamento do atuador de marcha lenta (degrau).

A aplicação de um degrau negativo (abertura) acarreta em um aumento na vazão mássica de ar no coletor de admissão, causando um pico de pressão no coletor, responsável pelo empobrecimento da mistura. A Curva D da Figura 4.36 apresenta esse pico de pressão, enquanto a Curva C mostra o empobrecimento da mistura desde a aplicação do degrau ($t = 3,0s$) até o momento que o controlador de mistura consegue corrigir o tempo base de injeção para a condição de mistura em torno da condição estequiométrica ($t = 6,0s$).

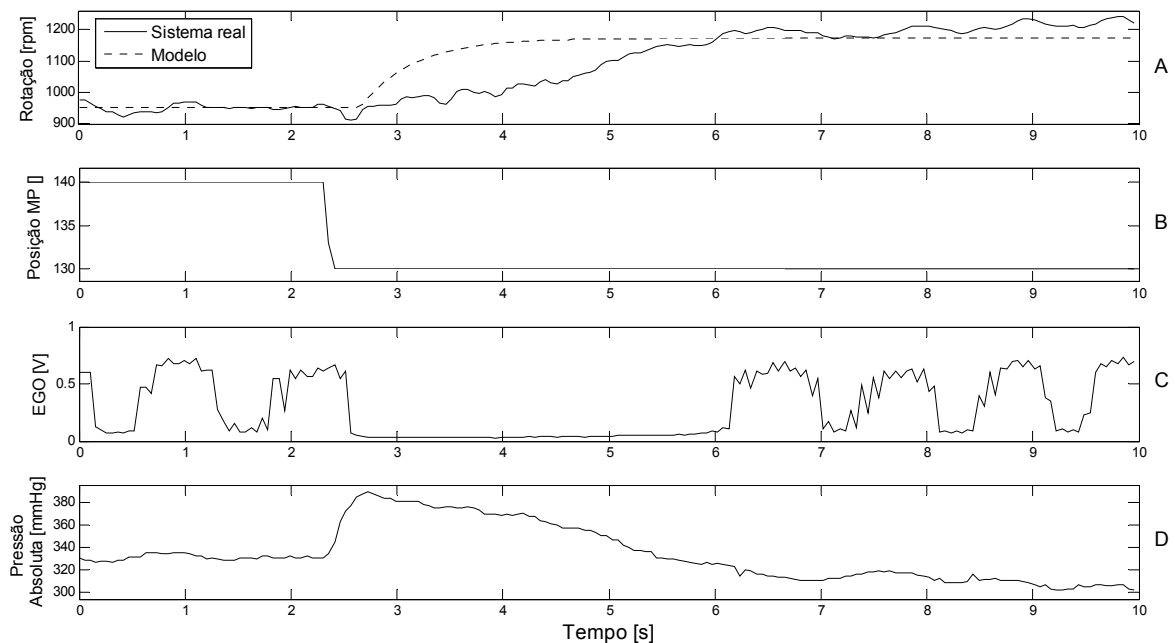


Figura 4.36 – Resposta dinâmica do sistema real e do modelo à entrada degrau negativa de 10 passos no atuador de marcha lenta.

O empobrecimento da mistura afeta diretamente no torque desenvolvido pelo motor em marcha lenta, prejudicando a dinâmica do sistema e dificultando a aceleração do motor (Curva A da Figura 4.36). O sistema real apresenta, como resposta à abertura do atuador de marcha lenta (degrau negativo), uma dinâmica diferente da obtida com o fechamento do mesmo (degrau positivo). A Curva A da Figura 4.36 mostra que o modelo obtido com entradas positivas não é capaz de descrever o comportamento do sistema com entradas negativas.

Uma solução possível para o problema de controle apresentado é a associação da estratégia de enriquecimento em aceleração (Item 4.3.8) ao movimento do atuador de marcha lenta, evitando o empobrecimento da mistura causado pela sua abertura (Curva C da Figura 4.36).

Nessa solução, associa-se um ganho percentual no tempo base de injeção, no momento em que ocorre uma abertura do atuador de marcha lenta em uma velocidade superior a um valor pré-estabelecido. Essa estratégia é similar à adotada ao movimento abrupto da válvula borboleta, em condições de aceleração rápida do motor. A adoção dessa solução torna a mistura rica no momento da abertura do atuador de marcha lenta como mostra a Curva C da Figura 4.37.

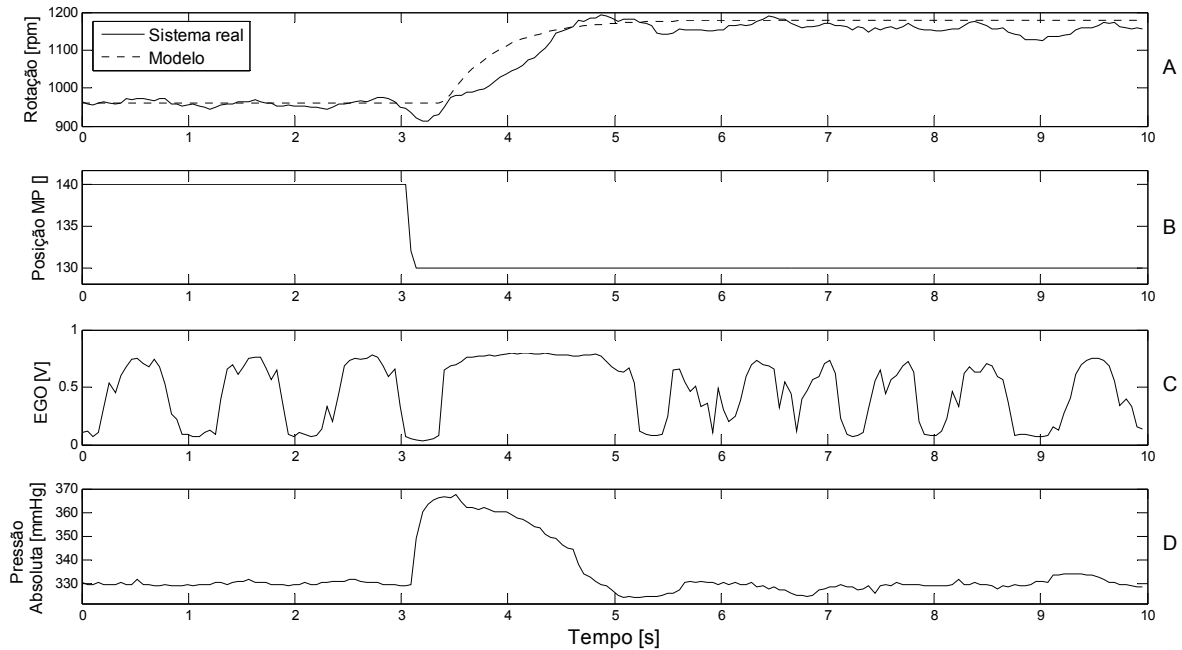


Figura 4.37 – Resposta dinâmica do sistema real e do modelo à entrada degrau negativa de 10 passos no atuador de marcha lenta, com estratégia de enriquecimento.

A inversão na condição de mistura alcançada pela adoção da estratégia de enriquecimento em aceleração (Curva C) torna a dinâmica do modelo de 1ª Ordem, obtido nas condições de desaceleração, satisfatória, possibilitando a utilização da função de transferência descrita na Equação 4.25 no projeto do controlador dedicado à esse sistema. Braga (2007) apresenta a metodologia necessária à implementação desse sistema de controle em função da dinâmica apresentada pelo modelo (Equação 4.25), através da aplicação do método de síntese direta mostrado por Seborg *et al* (1989), além da sintonia do controlador implementado em um motor comercial.

A Figura 4.38 mostra a janela de configuração dos parâmetros do controlador de marcha lenta. Aos leitores interessados em conhecer a estratégia de controle de marcha lenta implementada, recomenda-se novamente a leitura de Braga (2007) onde são apresentados todos os detalhes desse sistema, juntamente com a metodologia e os testes realizados com esse controlador. Para facilitar o entendimento, cada parâmetro mostrado na Figura 4.38 é descrito na Tabela IV.20.

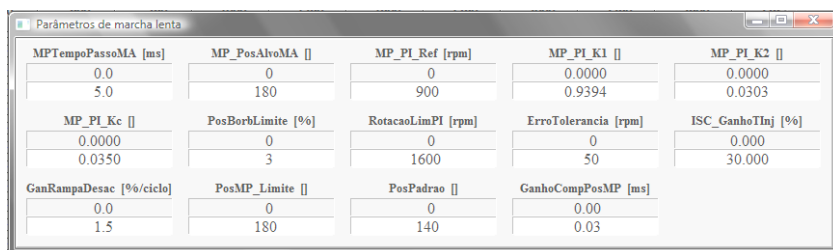


Figura 4.38 – Configuração dos parâmetros do controlador de marcha lenta.

Tabela IV.20 – Parâmetros de ajuste do controlador de marcha lenta.

Parâmetro	Descrição
MP_TempoPassoMA	Tempo mínimo entre duas mudanças de estado, em milissegundos.
MP_PosAlvoMA	Posição alvo do atuador de marcha lenta quando o controlador está em malha aberta.
MP_Pi_Ref	Referência de rotação do controlador de marcha lenta (<i>set point</i>).
MP_Pi_K1	Ganho K1 do controlador PI de marcha lenta.
MP_Pi_K2	Ganho K2 do controlador PI de marcha lenta.
MP_Pi_Kc	Ganho Kc do controlador PI de marcha lenta.
PosBorbLimite	Limite da posição da borboleta a partir do qual é considerada fechada.
RotacaoLimPI	Valor máximo de rotação na qual o PI atua. Valor superior, controlador desabilitado.
ErroTolerancia	Valor de tolerância no controle da rotação.
ISC_GanhoTinj	Ganho percentual no tempo de injeção para enriquecimento em aceleração rápida.
GanRampaDesac	Taxa de redução do ganho [%/ciclo], aplicada no enriquecimento em aceleração rápida.
PosMP_Limite	Posição máxima permitida para o atuador de marcha lenta. Nesta posição o MCI deixa de funcionar sendo desnecessário fechar o obturador.
PosPadrao	Posição padrão da estratégia de compensação da posição do atuador de marcha lenta.
GanhoCompPosMP	Valor do ganho da estratégia de compensação da posição do atuador de marcha lenta.

A estratégia de controle do atuador de marcha lenta desenvolvida é a mesma apresentada por Braga (2007). Essa estratégia é capaz de comandar, através de um *driver* específico, um atuador do tipo obturador cujo acionamento é realizado por um motor de passo. O critério de seleção utilizado na escolha foi a disponibilidade desse tipo de atuador na maioria dos motores disponíveis para teste.

Para controlar esse atuador, foi desenvolvido um circuito de acionamento (*driver*) para um motor de passo bipolar, com rotor a imã permanente e duas bobinas independentes. Esse *driver*, por sua vez, é formado por circuitos do tipo “ponte H”, que possibilitam a circulação de corrente bidirecional na carga. A Figura 4.39 mostra o circuito de acionamento desenvolvido.

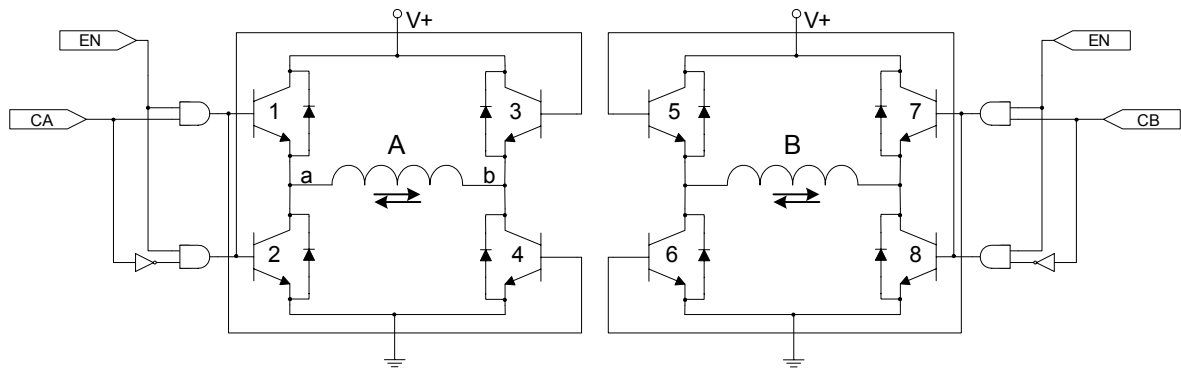


Figura 4.39 – Circuito de acionamento do atuador de marcha lenta (Braga, 2007).

De acordo com a Figura 4.39, quando o comando CA assume nível lógico 1, as chaves 1 e 4 conduzem, enquanto 2 e 3 permanecem bloqueadas. Neste caso, a corrente sobre a bobina A circula de ‘a’ para ‘b’. Mudando o comando CA para nível lógico 0 as chaves 2 e 3 passam a conduzir, enquanto 1 e 4 ficam bloqueadas. Deste modo, a corrente sobre a bobina A inverte o sentido e passa a circular de ‘b’ para ‘a’. O mesmo ocorre com o circuito da bobina B. Um sinal de *enable* (EN) permite bloquear todas as chaves, de forma que nenhuma corrente circula pelas bobinas, o que faz o rotor ficar parado na ultima posição. Em situações nas quais o motor deve ficar parado, esta estratégia é útil, pois proporciona economia de energia e evita o aquecimento desnecessário dos componentes.

Para mover o obturador até uma posição desejada, deve-se aplicar uma seqüência de comandos sobre CA e CB de forma que as bobinas criem um campo magnético girante capaz de girar o rotor. Pelo fato do obturador ser montado sobre um fuso e impedido fisicamente de girar, o movimento giratório do rotor em torno desse fuso promove um deslocamento linear do obturador a cada mudança de estado no comando aplicado sobre CA e CB, denominado de passo. A Tabela IV.21 apresenta a seqüência de comandos a serem aplicados para que o obturador se mova no sentido de abertura e de fechamento. Já a Figura 4.40 apresenta o fluxograma da estratégia implementada.

Tabela IV.21 – Seqüência de comandos para movimentação do obturador.

Comando CB	Comando CA
1	1
0	1
0	0
1	0

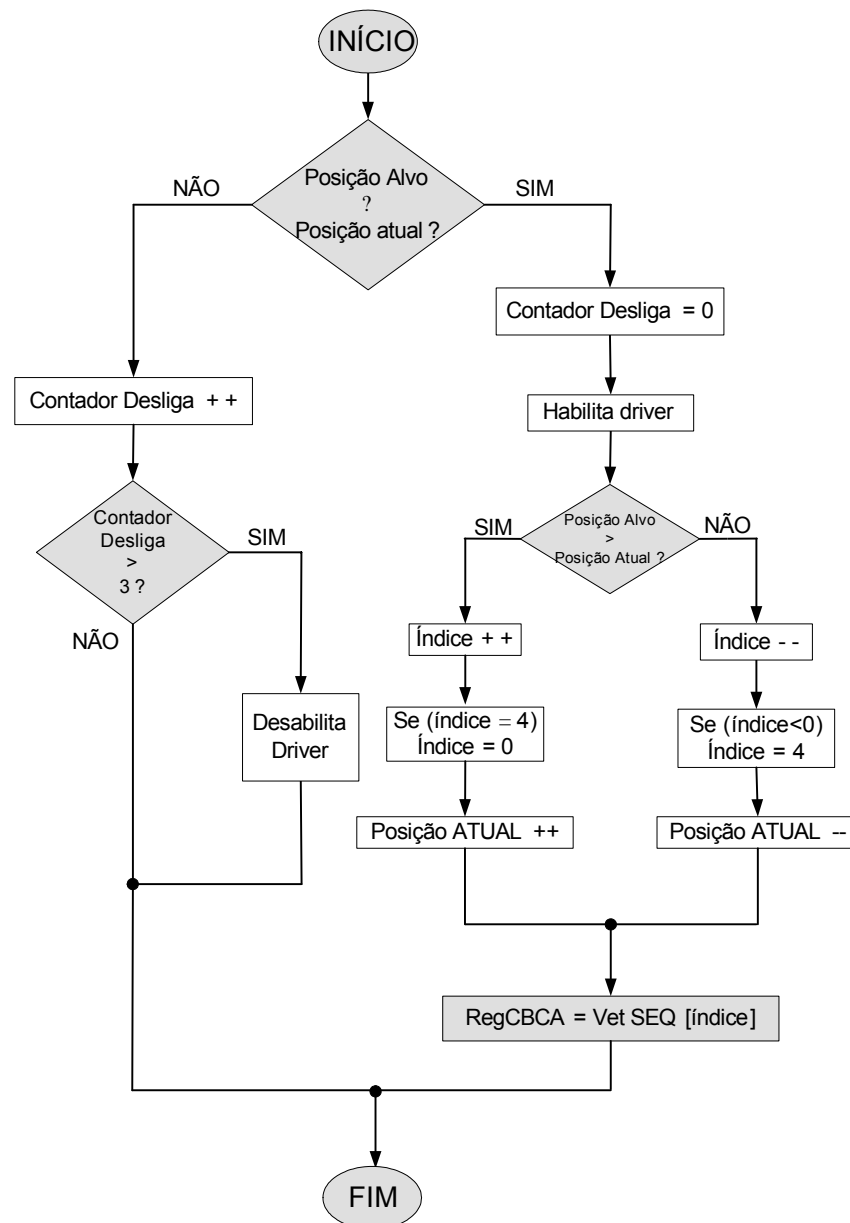


Figura 4.40 – Fluxograma de acionamento do atuador de marcha lenta (Braga, 2007).

O módulo recebe como entrada apenas a variável “**PosicaoAlvo**”, que indica a posição desejada para o obturador. Essa posição é comparada à posição atual, desabilitando o *driver* de comando, caso sejam iguais. Para evitar o desligamento desnecessário, esperam-se 3 períodos antes de desabilitar o *driver*, medidos pela variável “**ContadorDesliga**”. Se a posição alvo for diferente da posição atual, o *driver* é habilitado e a direção do movimento identificada (abertura ou fechamento). O movimento do obturador é controlado por um vetor denominado “**VetSEQ[índice]**” que comanda a seqüência de acionamento do motor de passo.

Cada índice do vetor indica uma condição de acionamento do *driver* do atuador (Figura 4.40) sendo que aumento do índice comanda o fechamento do obturador. A identificação da direção e do número de passos descrita no vetor é carregada no registro “**RegCBCA**” para executar o deslocamento desejado do motor de passo. Cada execução desta rotina gera o deslocamento de apenas 1 passo da válvula em direção à posição desejada.

É importante respeitar um tempo mínimo entre as mudanças de estado, que garante a energização correta das bobinas e a movimentação adequada do obturador. Caso este tempo mínimo não seja respeitado o obturador pode perder passos durante a sua movimentação. Esta situação é muito prejudicial ao sistema, já que o controle é realizado em malha aberta, não existindo nenhuma realimentação da posição real do obturador.

A *ECU* apenas aplica uma seqüência de pulsos e considera que o obturador se moveu até a posição desejada. Garantir o tempo mínimo leva a manter a consistência entre a posição real do obturador e a posição considerada pela *ECU*. Dessa forma, a rotina apresentada na Figura 4.40 é executada com período de 5,0 ms, valor que corresponde a um tempo mínimo que garante a ausência de perda de passos. Esse valor também pode ser alterado através da IHM, parâmetro “**MPTempoPassoMA**” (Figura 4.38) desde que o atuador utilizado garanta a coerência entre a posição real e a considerada pela *ECU*.

Deve-se ressaltar que o tempo mínimo entre as mudanças de estado determina a velocidade de resposta do obturador, o que afeta diretamente o desempenho da malha de controle de marcha lenta. Deste modo, deve-se adotar uma relação de compromisso, para que o tempo de permanência garanta a movimentação correta do obturador e ao mesmo tempo proporcione uma resposta dinâmica satisfatória (Braga, 2007).

Foi possível determinar, através de testes experimentais, que o tempo de permanência de 5 ms garante a ausência de perda de pulsos durante a movimentação do obturador. Foi determinado também o seu número máximo de passos que no atuador de marcha lenta testado é de 220. Por essa razão, o obturador gasta 1,1 segundo para percorrer sua excursão total. Neste trabalho foi adotada a convenção de que a posição zero do motor de passo corresponde à válvula toda aberta, enquanto a posição 220 corresponde ao fechamento total, validados por Braga (2007).

4.3.12 Implementação do Controlador da Injeção de Combustível

O controlador de injeção de combustível tem como principal objetivo determinar a quantidade de combustível a ser injetada, sendo formado por três ações diretas de controle:

- Correção no tempo base (controle da relação $A/F(r)$);
- Compensação da mistura em função do atuador de marcha lenta;
- Enriquecimento da mistura em acelerações rápidas;

Sua estrutura é baseada na ação direta no controle em malha fechada com re-alimentação (*feedforward*) e formada pelo acoplamento das três ações de controle mostradas anteriormente. A Figura 4.41 apresenta em detalhes a estrutura do controlador de injeção de combustível.

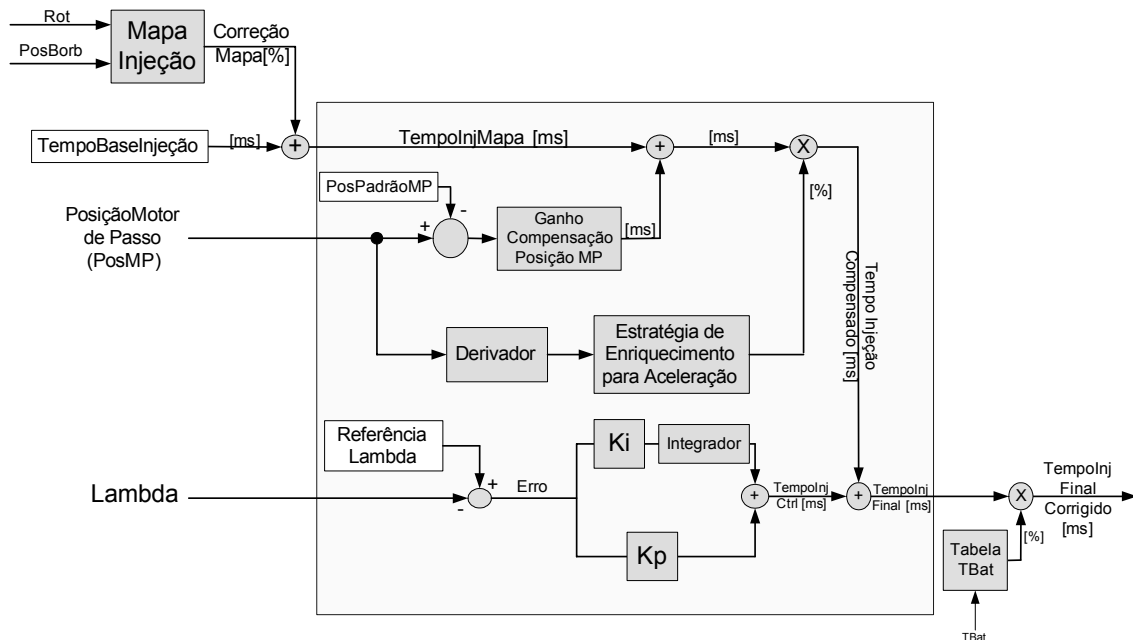


Figura 4.41 – Estrutura do controlador de injeção de combustível (Braga, 2007).

A Figura 4.41 mostra o acoplamento das ações de controle e as perturbações associadas ao controlador de injeção de combustível, causadas pela variação da rotação (**Rot**) e da posição da borboleta (**PosBorb**), pela variação da quantidade de ar admitida com a movimentação do atuador de marcha lenta (**PosMP**), pela variação instantânea da posição da borboleta em acelerações rápidas e pelo sinal da condição de mistura em re-alimentação (**Lambda**). Dessa forma, o controlador de injeção de combustível deve associar prioridades às ações de controle, visto que as estratégias são acopladas. A seguir são apresentadas as características principais de cada uma das ações de controle, para facilitar o entendimento do acoplamento entre elas.

4.3.12.1 Ação direta do mapa de injeção

O tempo base de injeção (*JPU*) é um parâmetro que pode ser alterado via IHM. Sobre ele aplica-se a correção percentual descrita no mapa de tempo base de injeção (*%JPU*) em função da rotação e da posição da borboleta, como apresentado no Item 4.3.5. O mapa de injeção tem grande importância no controle da mistura, por que ajusta o tempo de injeção diretamente, sem a atuação do controlador PI em malha fechada. O atraso de tempo na malha de lambda e a característica não-linear do sensor EGO fazem com que o controlador PI em malha fechada não seja capaz de responder às perturbações de rotação e carga em tempo hábil, ficando então responsável por corrigir eventuais erros em regime permanente.

4.3.12.2 Ação devido à correção da marcha lenta

A principal perturbação na mistura ar/combustível é a variação da vazão mássica de ar no coletor de admissão, inferida através da variação da posição da válvula borboleta ou do atuador de marcha lenta. Como a estratégia implementada prevê somente as variações de posição da borboleta, a perturbação do atuador de marcha lenta não é percebida pelo sistema. Nesta condição, a correção da mistura seria feita apenas pelo controlador PI em malha fechada, o que implicaria em um baixo desempenho na rejeição a esta perturbação.

Para corrigir o efeito da movimentação do atuador de marcha lenta foi implementada uma estratégia para compensar a variação da sua posição, que consiste em considerar uma posição padrão na qual o mapa de injeção deve ser ajustado. Nesta situação, a correção percentual gerada pelo mapa para cada posição da borboleta inclui também a vazão de ar que passa pelo atuador de marcha lenta na posição padrão. Verifica-se então qual o desvio gerado no tempo de injeção quando o obturador do atuador é deslocado de uma posição em relação à ajustada, adicionando ao tempo de injeção o desvio proporcional à diferença. Caso o obturador esteja mais fechado do que na posição padrão, o desvio adicionado será negativo e o tempo de injeção reduzido. Tanto a posição padrão quanto o desvio no tempo de injeção para cada passo de diferença são parâmetros do sistema e podem ser configurados através da IHM (Figura 4.38). A estratégia de compensação direta a mistura não permite um afastamento da condição estequiométrica com a movimentação do obturador, proporcionando um melhor desempenho para o controlador de mistura ar/combustível.

4.3.12.3 Ação direta de enriquecimento para aceleração

Existe ainda a necessidade do enriquecimento instantâneo da mistura durante variações bruscas na posição da válvula borboleta (aceleração rápida) ou quando o atuador de marcha lenta movimentada rapidamente para compensar a queda de rotação causada pela inserção de cargas externas no eixo de manivelas (alternador, compressor de ar condicionado, bomba de direção hidráulica, etc). Em ambas as situações, o aumento súbito da vazão de ar causa um pico de pressão no coletor que acarreta no empobrecimento de mistura e, por sua vez, redução no torque gerado pelo motor.

A solução adotada para compensar esse efeito foi o acoplamento da estratégia de enriquecimento para aceleração rápida à abertura rápida do atuador de marcha lenta. Essa estratégia consiste em medir a variação da posição do obturador e aplicar um ganho percentual no tempo de injeção, caso ocorram variações superiores a um limite pré-estabelecido. O ganho aplicado é reduzido a cada ciclo segundo uma taxa de decremento, finalizado quando for igual à zero. Todos esses parâmetros são configurados através da IHM (Figura 4.38). Como esta estratégia corresponde a um enriquecimento desejado, o controlador deve permanecer em malha aberta ($f_{0/1} = 0$) durante a sua ocorrência, não gerando uma ação corretiva contrária.

Algumas considerações devem ser feitas com relação ao ajuste destes ganhos, em função do acoplamento das ações de controle apresentadas. A malha de realimentação (Lambda) tem a função de corrigir erros estacionários, visto que o seu desempenho dinâmico é prejudicado pelo elevado tempo morto e pela característica não-linear da medição. As ações diretas de controle citadas compensam as perturbações de forma a garantir um desempenho dinâmico satisfatório. Além disso, o controle de mistura em malha fechada, por meio de um sensor *EGO*, proporciona um comportamento oscilatório em torno da referência. No sistema real, esta variação da mistura em torno da condição estequiométrica influencia diretamente na oscilação da rotação. No entanto, se o fator lambda oscila em alta frequência, a dinâmica do motor filtra esta influência e a rotação tende a estabilizar em torno do *set point*. Esta observação é importante pois a perturbação na rotação causada pelo Lambda prejudica o desempenho do controlador de marcha lenta. Ao mesmo tempo, a amplitude de oscilação deve ser mantida pequena, favorecendo o desempenho do *TWC* e reduzindo os níveis de emissões. Braga (2007) mostra que o ajuste dos ganhos deve ser capaz de evitar que o atuador de marcha lenta permaneça em constante movimento, gerando perturbações na malha de lambda que, por sua vez, afetaria a rotação e levaria todo o sistema à instabilidade.

4.4 Considerações Finais

Até então foram apresentadas as etapas julgadas necessárias ao desenvolvimento de um sistema de gerenciamento eletrônico de motores de combustão interna (SGEM), que vão desde a especificação de componentes e de *hardware*, até estratégias de modelagem do comportamento dinâmico dos motores e otimização das malhas de controle. Os modelos apresentados para controle da mistura ar/combustível e da rotação da marcha lenta foram obtidos em um motor específico, com o objetivo de demonstrar o comportamento real do SGEM implementado. As metodologias para obtenção desses modelos visam disponibilizar ao usuário dessa nova ferramenta, um procedimento para aquisição dos dados para simulação e ajuste dos controladores implementados, em função da dinâmica associada a um MCI, com a aplicação de entradas conhecidas.

Como resultados deste trabalho são apresentadas curvas características de diferentes MCI's submetidos a ensaios em bancada dinamométrica, sendo obtidas com um sistema de gerenciamento eletrônico diferente (sistema original, programável ou pelo SGEM implementado). Também é apresentada a validação dinâmica dos sistemas de controle da mistura ar/combustível e de marcha lenta, a partir da aplicação de perturbações externas. Pretende-se mostrar, com estes resultados, a possibilidade de otimização de um MCI controlado pelo SGEM implementado (*hardware*, *software* e estratégias), bem como as vantagens, desvantagens e limitações associadas à sua utilização. Os resultados representam uma validação completa do SGEM desenvolvido até o presente momento e indicam seu perfeito funcionamento.

A aplicação desse sistema em um veículo experimental depende ainda do desenvolvimento de mapas de referência dedicados à dirigibilidade do veículo como filtros de avanço de ignição em trocas de marcha ou de tempo de resposta em aceleração. Devido à sua natureza subjetiva e em função do tempo que envolve tal aplicação esses mapas não são apresentados neste trabalho, apesar de estarem em fase de desenvolvimento. As estratégias de partida a frio e de compensação pela tensão de bateria também não são avaliadas devido à indisponibilidade de recursos físicos para tal, visto que necessitam de câmaras climáticas. A implementação do controle de ignição em malha fechada com re-alimentação por sinal de detonação, bem como a validação do SGEM implementado quanto à resistência a ruídos e interferências eletromagnéticas, não são abordadas neste trabalho, devido à necessidade de desenvolvimentos específicos, previstos para serem realizados dentro de outros trabalhos acadêmicos.

CAPÍTULO 5

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O sistema de gerenciamento eletrônico desenvolvido foi testado em motores de quatro tempos, alimentados com gasolina comum (E25), visando avaliar as condições de operação e a resposta dinâmica em situação real de utilização. Para tal, foram realizados ensaios dinamométricos segundo NBR ISO 1585 (1996), que especifica às condições de ensaio de motores projetados para veículos rodoviários, as correções nas medidas e a forma de apresentação das curvas características em função da rotação do motor. As correções foram determinadas em função das condições atmosféricas locais e aplicadas a todos os dados obtidos, de acordo com ABNT NBR ISO 1585 (1996). A pressão seca foi calculada conforme ABNT NBR 5484 (1985), utilizando como referência às temperaturas de bulbo úmido e bulbo seco medidas no ensaio.

Durante os testes de validação foram levantadas as curvas características de 3 diferentes motores, controlados por sistemas de gerenciamento eletrônico de produção (originais), programável (MoTeC M4) e pelo sistema gerenciamento eletrônico implementado neste trabalho. Foram ainda realizados testes de validação de *hardware*, *software* e da estratégia de interpolação dos mapas, onde se aplicou o mesmo ajuste (configuração inicial, mapa de tempo base de injeção e de avanço de ignição) no controle de um motor utilizando o sistema MoTeC M4 e o SGEM implementado.

Os sistemas de controle da mistura ar/combustível e de marcha lenta foram testados de forma dinâmica, a partir da aplicação de perturbações externas, inerentes ao funcionamento de um MCI. Esses testes permitiram avaliar a resposta do controlador, bem como ajustar os ganhos associados a cada ação de controle implementada e o acoplamento das malhas de controle.

A apresentação dos resultados inicia pela descrição do sistema de gerenciamento eletrônico SGEM implementado, seguido dos testes executados com esse sistema com diferentes motores. Para facilitar a visualização e a compreensão do leitor, os resultados foram divididos por motor ensaiado e subdivididos em tópicos.

5.1 Sistema de Gerenciamento Eletrônico Implementado

Na metodologia foram apresentadas as etapas do desenvolvimento do sistema de gerenciamento eletrônico proposto inicialmente (SGEM). Esse sistema possibilita o controle da formação e ignição da mistura ar/combustível em todas as condições de operação de um MCI, como demonstrado a seguir.

O SGEM implementado é montado sobre uma única placa de circuito impresso, incluindo os *drivers* de potência para acionamento dos eletroinjetores e bobinas de ignição, além dos demais sistemas mostrados na Figura 5.1. Optou-se pela incorporação dos *drivers* de ignição ao *hardware* principal, no intuito de evitar a utilização de módulos auxiliares para tal função e facilitar a sua instalação. O projeto, a simulação, a montagem e os testes operacionais da placa de circuito impresso foi realizado por alunos e professores do Departamento de Engenharia Eletrônica – DELT da UFMG, sob orientação do Prof. Dr. Marcos Antônio Severo Mendes.

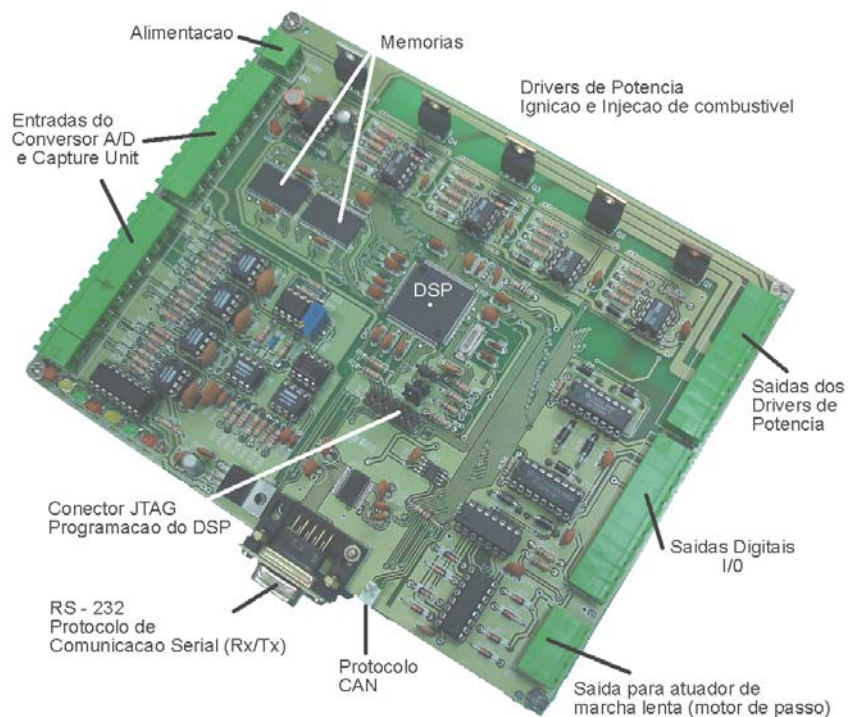


Figura 5.1 – Placa de circuito impresso do SGEM e seus componentes principais.

O SGEM implementado possui funções configuradas de acordo com a aplicação, com os respectivos parâmetros ajustáveis. A partir das estratégias implementadas, o sistema atual (Figura 5.1) disponibiliza as seguintes funções:

- Elaboração e ajuste de mapas dos parâmetros de ignição e de injeção;
- Compensação associada à temperatura do motor, temperatura e pressão do ar;
- Controle de marcha lenta através de atuador tipo motor de passo;

- Controle de corte de combustível em desacelerações (*fuel cutoff*);
- Controle da mistura ar/combustível em malha fechada (*Wide / Narrow band*);
- Calibração dos sensores utilizados.

Quanto à adequação do sistema aos diferentes tipos de sensores e atuadores utilizados e de inúmeros parâmetros de ajuste, o SGEM pode ser adequado a qualquer tipo de motor. Entre os parâmetros disponíveis, podem ser citados:

- Modulação da largura do pulso de injeção (tempo de injeção);
- Limitação da corrente máxima nos *drivers* de injeção (*hardware*);
- Compensação do pulso de injeção devido à queda de tensão na bateria;
- Determinação da carga solicitada (Posição borboleta ou pressão no coletor);
- Tipo dos sensores de referência e de sincronismo;
- Tipo do sistema de ignição e número de bobinas presentes;
- Tempo de permanência (*Dwell time ignition*).

Estes parâmetros permitem ao SGEM a atuação em injetores de baixa ou alta impedância, sistemas de ignição indutivos, sensores de rotação ópticos, magnéticos ou de efeito *hall*. Além destes parâmetros de configuração do motor, possui estratégias de controle como partida a frio e aquecimento, ganho de aceleração rápida e limitação de rotação e pressão no coletor. Também foram disponibilizadas saídas auxiliares para diferentes funções que permitem ao usuário atribuir funções, sendo elas:

- Controle de dispositivo genérico (*PWM* ou chaveado);
- Geração de pulsos para tacômetro e comando da bomba de combustível;
- Comando para dispositivo *On/Off* genérico em função da carga e da rotação.

O *hardware* do sistema de controle de ignição é composto por dois *drivers* de potência independentes, nos quais foram aplicados *IGBT's* capazes de alimentar bobinas de ignição com corrente de até 14A (primário). Possuem ainda proteção contra curtos-circuitos e correntes superiores aos valores suportados pela placa. O *hardware* que compõe o controlador de mistura ar/combustível também é composto por dois *drivers* de potência independentes, nos quais foram aplicados *MosFET's* capazes de acionar eletroinjetores de alta e baixa impedância, com corrente de até 40A em regime constante. Também possuem proteção contra curtos-circuitos e correntes superiores aos valores suportados pela placa de circuito impresso. Em ambos, é possível realizar o sincronismo dos sinais em qualquer posição do eixo de manivelas (0° a 360°), além da possibilidade de defasagem e superposição de sinais de entre si.

O sistema conta ainda com um *driver* específico para acionamento de atuadores de marcha lenta do tipo motor de passo, e a estratégia equivalente de controle mediante ajuste de ganhos em função do motor de combustão interna controlado.

Os *softwares* associados ao SGEM possuem acesso irrestrito ao código fonte e são divididos em dois grupos sendo um deles dedicado ao gerenciamento da unidade de controle eletrônico (*ECU*) e o outro responsável pela configuração do sistema para uma determinada aplicação (IHM). No primeiro caso, o *software* foi desenvolvido em ambiente *Code Composer*, da *Texas Instruments*, e possui estrutura modular que permite o acesso e a modificação das ações de controle. Exige do usuário o conhecimento de programação em linguagem “*Assembly*” e “*C callable*”, sendo cada linha do código comentada visando facilitar o entendimento e a implementação de novas estratégias.

O *software* de configuração que gera a IHM permite o acesso à parametrização do motor a ser controlado, bem como à modificação da interface gráfica e das funções associadas à visualização de parâmetros e de condições de operação. Para a parametrização do motor, o sistema exige do usuário conhecimentos básicos de funcionamento de um motor e de seu ajuste. Já a modificação da interface gráfica exige do usuário conhecimentos da linguagem *Visual C++ 6.0*.

O SGEM implementado apresenta algumas limitações quanto à aplicação. O sistema de ignição é composto por 2 *drivers* que permitem, no máximo, o controle de um motor de 04 cilindros com duas bobinas estáticas ou de um maior número de cilindros com a utilização de um distribuidor de ignição. Permite ainda o controle de um motor monocilíndrico com duas velas de ignição independentes (*Twin Spark*).

No que diz respeito ao sistema de formação e controle da mistura ar/combustível, é possível controlar a injeção de combustível de forma simultânea (*full group*) sem limitação quanto ao número de cilindros, desde que a corrente total por *driver* de potência não ultrapasse o valor citado. O controle em modo semi-sequencial (banco a banco) é possível de ser implementado em motores de até 04 cilindros. Para operação em modo sequencial sincronizado, existe a necessidade de implementação da estratégia de reconhecimento do tempo de cada cilindro, sendo que o sistema atual permitirá o controle em motores de até 2 cilindros. Uma vantagem do SGEM em relação aos sistemas programáveis utilizados no comparativo é a possibilidade de alterar o ângulo de injeção mesmo sem a presença de um sensor de sincronismo, sendo essa característica aplicada em ambos os *drivers* de injeção.

5.2 Resultados obtidos para o Motor FIASA 1.0 8V m.p.i

5.2.1 Curvas características de desempenho

No intuito de se verificar as condições operacionais do sistema de gerenciamento eletrônico implementado em uma primeira análise, optou-se pela utilização de um motor comercial veicular, de baixa cilindrada (994 cm³) devido à sua disponibilidade no Laboratório de Motores do DEMEC. A Tabela V.1 apresenta as características técnicas desse motor, fornecidas pelo fabricante.

Tabela V.1 – Características técnicas do Motor FIASA 1.0 8V m.p.i.

Características técnicas:

Fabricante: Fiat Automóveis S/A

Cilindrada: 994 cm³

Diâmetro do cilindro x Curso do pistão: 76,0 mm x 54,8 mm

Relação de Compressão: 9,35:1

Potência máxima: 45,0 kW (61,0 CV)@6000 RPM (NBR ISO 1585/1996)

Torque máximo: 79,5 N.m (8,1 kgf.m)@3000 RPM (NBR ISO 1585/1996)

Combustível: Gasolina Comum (E25)

Número de cilindros: 4 (quatro) dispostos em linha.

Regime de Marcha Lenta: 850 ± 50 RPM

Número de válvulas: 8 (oito) - 1 de Admissão e 1 de descarga por cilindro

Tipo de aspiração: Natural

Tipo de Injeção: Multiponto semi-sequencial Magneti Marelli – Mod. IAW 1G711

Os primeiros ensaios foram realizados com o sistema de gerenciamento eletrônico original do motor, fabricado pela Magneti Marelli, modelo IAW 1G711, sendo estes resultados tomados como ensaios de referência do motor. Todos os sensores e atuadores, bem como as calibrações originais de avanço e tempo de injeção foram mantidas. Foram levantadas 2 (duas) curvas com o motor operando em regime de plena carga no intuito de reduzir as incertezas associadas ao ensaio.

Assim como nos testes com o sistema original, os sensores e atuadores foram mantidos no intuito de verificar a flexibilidade e a intercambialidade do sistema em teste. As bobinas de ignição e os eletroinjetores foram então conectados aos *drivers* de potência do SGEM implementado e realizados novos ensaios dinamométricos à plena carga com o sistema de gerenciamento eletrônico implementado variando-se os valores de avanço e do tempo de injeção (% tempo base) em cada ponto de operação do motor em plena carga exclusivamente.

O critério utilizado para a otimização do motor foi o de máximo torque observado (MBT) sem a ocorrência do fenômeno da detonação. Como em regime de plena carga o sistema de controle da mistura ar/combustível passa a operar em malha aberta (*open loop*), os valores de Lambda, medidos por meio de uma Sonda Linear fabricada pela Horiba, modelo MEXA 110h, foram mantidos próximos aos valores medidos durante os testes com o sistema original.

A detecção da detonação foi realizada através do método auditivo, utilizando-se um acelerômetro piezo-elétrico fixado ao bloco do motor. O critério utilizado como avanço máximo foi o de busca pelo maior torque observado (MBT), limitado pelo início da detonação (LDI). Pelo fato do avanço influenciar diretamente a temperatura do catalisador, a cada regime de rotação esta temperatura foi observada, respeitando o valor máximo de 750 °C recomendado pelo fabricante do motor em teste.

Os ensaios dinamométricos desse motor foram realizados no Laboratório de Ensaio de Motores – LEM do CETEC. O equipamento utilizado é dinamômetro hidráulico modelo D210-1e fabricado pela SCHENCK. A Figura 5.2 apresenta um vista geral do motor acoplado ao dinamômetro.

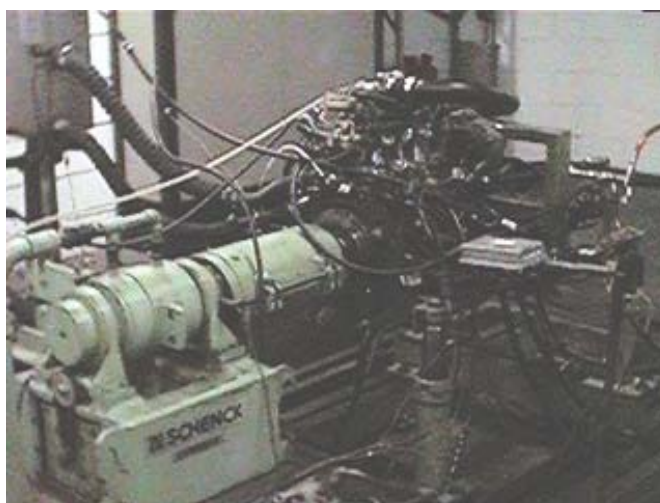


Figura 5.2 – Vista geral do motor em teste acoplado ao dinamômetro.

A incerteza combinada do ensaio foi determinada por Baeta (2006) segundo metodologia descrita por Gonçalves Jr. (2001) em conformidade com o Guia de Expressão da Incerteza da Medição ABNT NBR 5725 (2003). O Anexo A apresenta as incertezas máximas associadas a cada grandeza de medição para essa bancada dinamométrica, sendo destacadas a incerteza de medição da Rotação de ± 30 RPM, do Torque Corrigido de $\pm 0,9$ N.m e da Potência Corrigida de $\pm 1,0$ kW (Baeta, 2006). As mesmas não foram exibidas nos gráficos pois a maioria seria encoberta pelos pontos medidos.

A Figura 5.3 apresenta um gráfico comparativo do Torque Corrigido (NBR 1585), obtido com o sistema de ignição original (IAW 1G711) e com o sistema de gerenciamento eletrônico desenvolvido (SGEM).

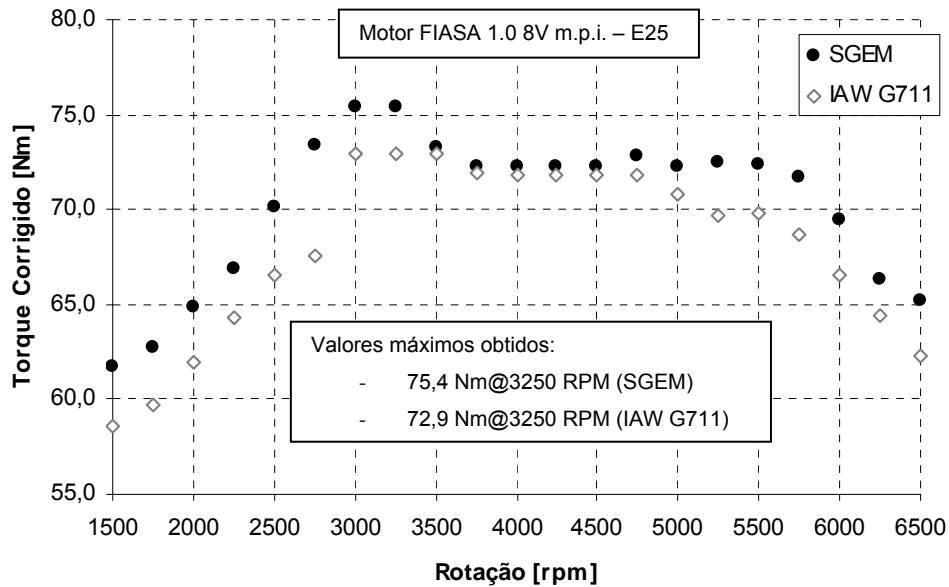


Figura 5.3 – Curva de Torque Corrigido (NBR 1585).

De acordo com o gráfico apresentado na Figura 5.3, pode ser observada uma tendência de aumento do Torque Corrigido em toda a curva. Os valores mais expressivos foram obtidos nas regiões que vão de 1500 a 3500 RPM ($\approx 12\%$ de aumento) e na região de 5000 a 6500 RPM ($\approx 10\%$ de aumento). Esse aumento se deve ao fato de que a utilização do SGEM permitiu aumentar os ângulos estáticos de avanço de ignição até a ocorrência da detonação (LDI) em ambas as faixas de rotação citadas.

Outra característica observada é a manutenção do torque constante em torno de 72 N.m de 3750 a 5500 RPM. Esse fato foi possível devido ao critério de ajuste (MBT), tornando o motor mais elástico, melhorando sua dirigibilidade quando aplicado ao veículo.

Já a Figura 5.4 apresenta um gráfico comparativo da Potência Corrigida (NBR 1585), obtido com o sistema de ignição original (IAW 1G711) e com o sistema de gerenciamento eletrônico desenvolvido (SGEM).

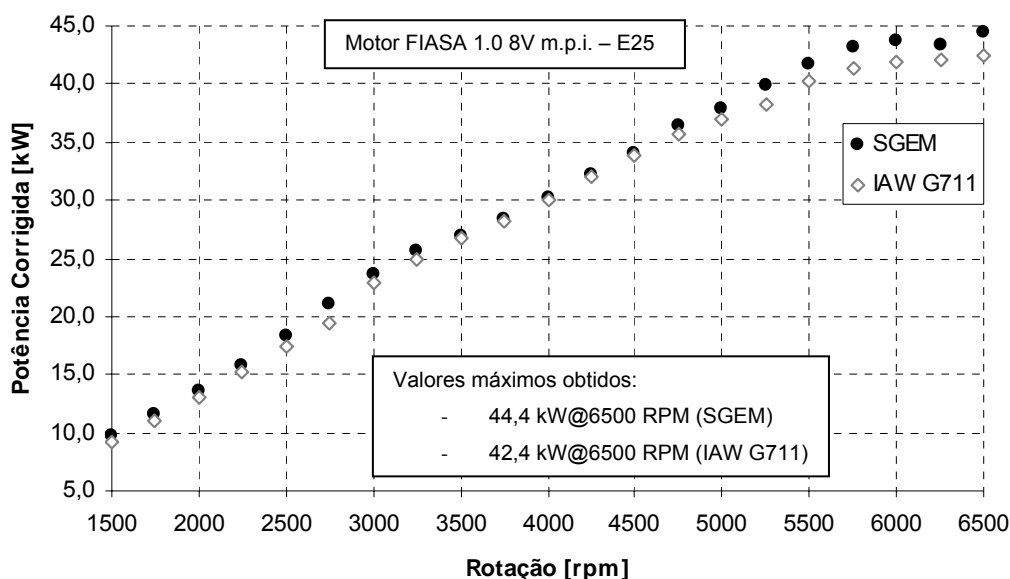


Figura 5.4 – Curva de Potência Corrigida (NBR 1585).

O aumento do Torque constatado durante o ensaio reflete diretamente no aumento da Potência Corrigida, mostrado na Figura 5.3. Observa-se a mesma tendência de aumento na Potência desenvolvida pelo motor em teste, onde os valores mais expressivos foram obtidos também nas regiões de 1500 a 3500 RPM ($\approx 8\%$ de aumento) e na região de 5000 a 6500 RPM ($\approx 4\%$ de aumento).

Como o ajuste do SGEM ao motor foi realizado somente em regime de plena carga, os testes aqui apresentados permitem apenas uma avaliação prévia do seu comportamento. Os resultados obtidos mostram que, em relação ao sistema original (IAW 1G711), o SGEM não apresenta problemas operacionais, como observado nas Figuras 5.3 e 5.4. Os ganhos atingidos em relação ao sistema original se devem à possibilidade de otimização dos parâmetros, utilizando o SGEM implementado. Vale ressaltar que o sistema original inclui margens de segurança visando aumentar a vida útil dos motores, fato não considerado nesta etapa por não ser o objetivo do teste.

O consumo de combustível não foi avaliado devido à indisponibilidade do sistema de medição durante os ensaios. Os índices de emissões também não foram avaliados por se tratar de ensaios iniciais de validação do sistema de gerenciamento desenvolvido.

5.2.2 Validação do Controlador de Injeção de Combustível

Ainda no motor FIASA 1.0 8V m.p.i, foram testadas e validadas as estratégias do controlador de injeção de combustível. Vale ressaltar que, devido ao acoplamento entre as malhas de controle de mistura ar/combustível e rotação de marcha lenta mostrado na metodologia e por Braga (2007), são necessários ajustes específicos para essa validação. A dinâmica do sistema real, controlado pelo SGEM implementado, foi avaliada com a aplicação de entradas tipo degrau, sendo positivas no caso de inserção de carga e negativas no caso de retirada da carga inserida. Essa inserção foi realizada através do alternador, com o acionamento do eletroventilador do sistema de arrefecimento. Estima-se que a carga inserida devido a esse acionamento seja da ordem de 0,45 kW em função da potência elétrica de acionamento do eletroventilador (0,35 kW), do rendimento total do sistema de recarga (0,90) e do sistema de acoplamento entre motor e alternador (0,85). Essa perturbação pode ser considerada significativa visto que a potência útil disponível no motor, na condição de marcha lenta, é da ordem de 2,2 kW.

Como o controlador de injeção de combustível é composto por diferentes sistemas de controle, deve-se avaliar a dinâmica em malha fechada de cada um deles individualmente. Durante a realização dos testes dinâmicos do controlador de mistura ar/combustível, percebe-se uma grande influência do fator Lambda sobre a rotação do motor (borboleta fechada e atuador de marcha lenta parado). A Figura 5.5 apresenta essa influência nas Curvas A e B.

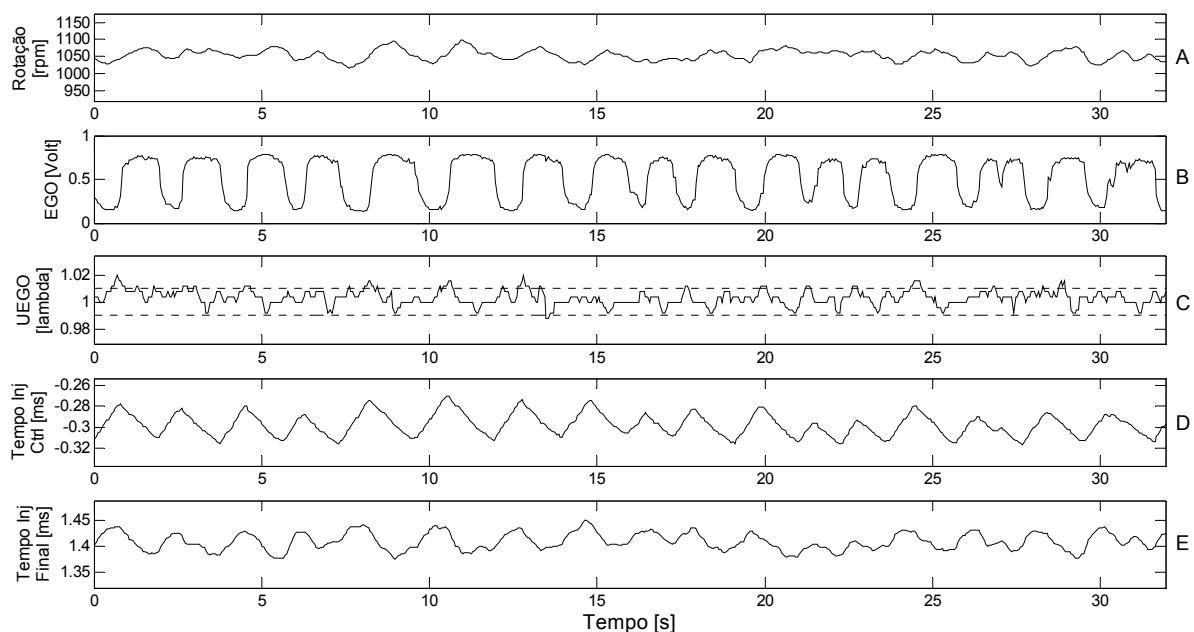


Figura 5.5 – influência do Fator Lambda na rotação do motor.

A Figura 5.5 mostra que enquanto o fator Lambda medido com sonda linear apresenta uma variação menor que $\pm 2\%$ (Curva C) a rotação apresenta uma variação de até 100 RPM, equivalente a 10% do valor nominal da rotação estabilizada para o teste (Curva A). Este fato implica em uma limitação para o ajuste do controlador de lambda com sensor EGO, sendo necessário reduzir os ganhos para que as perturbações na rotação sejam pequenas o suficiente para não causar nenhum tipo de instabilidade ao sistema.

Esse resultado mostra que não é possível manter a rotação em torno de uma faixa estreita de referência. Fatores como variações entre ciclos de combustão, variação do Lambda, além da resolução de controle do atuador de marcha lenta (20 RPM/passos) impossibilitaram a estabilização da rotação em uma condição fixa, fazendo com que a função erro fosse levada a zero. Deste modo, foi adotado um critério de parada do atuador em uma região de histerese de 50 RPM em torno da rotação de referência (*set point*). Esta estratégia permite a estabilização da marcha lenta e evita a geração de perturbação no controle de Lambda, causada pela movimentação contínua do atuador de marcha lenta. A adoção dessa medida possibilitou garantir a estabilidade e o motor em funcionamento, como mostrado a seguir.

Para o controlador de marcha lenta, a condição mais crítica consiste no acionamento do eletroventilador, situação que causa uma queda na rotação e que deve ser corrigida por uma aceleração rápida do motor, através da abertura do atuador de marcha lenta. Porém, como demonstrado no item 4.3.10, essa abertura provoca um aumento na pressão de ar no coletor de admissão, o que gera um empobrecimento imediato da mistura. A adoção da estratégia de enriquecimento instantâneo da mistura em função da abertura abrupta do atuador de marcha lenta possibilita a correção desse empobrecimento, permitindo ao controlador de marcha lenta uma resposta dinâmica satisfatória quanto a perturbações externas.

Por outro lado, os testes dinâmicos do controlador de mistura ar/combustível mostram uma maior susceptibilidade à remoção da carga inserida. A remoção da carga promove um aumento instantâneo na rotação do motor, fazendo com que o controlador de marcha lenta reduza a vazão de ar no coletor de admissão, através do movimento do atuador. A redução na vazão faz com que a mistura desloque da condição estequiométrica e tenda a uma condição de mistura rica, gerando uma perturbação no controlador.

Os testes realizados mostraram que tanto o controlador de marcha lenta, quanto o de mistura ar/combustível são capazes de contornar as perturbações externas, impostas pelo funcionamento de um MCI, de forma satisfatória, apresentando grande capacidade de estabilização da rotação e da mistura ar/combustível nos valores de referência.

O teste final do controlador de injeção de combustível em malha fechada foi realizado com a aplicação e remoção de carga no eixo do motor, através do acionamento do eletroventilador do sistema de arrefecimento, como citado anteriormente. Devido ao acoplamento das malhas de controle de marcha lenta e de mistura ar/combustível, a situação foi adequada para analisar o desempenho dinâmico do controlador de mistura ar/combustível diante da atuação do controlador de marcha lenta.

Os testes realizados consistem em manter ambos os controladores em malha fechada, avaliando o seu comportamento com a inserção da carga equivalente ao eletroventilador, estabilização na nova condição seguida da sua remoção (desligamento). A referência de rotação do controlador de marcha lenta foi configurada para 900 RPM e o controlador de lambda foi configurado para manter a mistura na condição estequiométrica, através da re-alimentação por um sensor *EGO*. A Tabela V.2 apresenta os parâmetros de controle testados, cujos valores são os mesmos ajustados por Braga (2007).

Tabela V.2 – Valores de ajuste do controlador de injeção de combustível (Braga, 2007)

Parâmetro de controle:	Valor ajustado:
Tempo base de Injeção – IJPU [ms]	10,0
Tempo de Ignição – Dwell time [ms]	3,5
Tempo de duração entre passos do atuador [ms]	5,0
Referência rotação marcha lenta [RPM]	900
Tolerância da rotação de marcha lenta [RPM]	± 50
Ganho Kc – Controlador PI de marcha lenta	0,035
Ganho Ti – Controlador PI de marcha lenta	0,8
Ganho Kc – Controlador PI de mistura $A/F_{(r)}$	0,005
Ganho Ti – Controlador PI de mistura $A/F_{(r)}$	0,12
Ganho Enriquecimento em aceleração rápida [%]	30
Taxa de decremento do ganho de aceleração [%/rev]	1,5
Posição padrão do atuador de marcha lenta [passo]	140
Compensação do IJPU pela posição atuador ML [ms]	0,03

A Figura 5.6 apresenta a resposta dinâmica do controlador devido à inserção e remoção da carga aplicada para avaliação (eletroventilador). Na Curva A são mostrados o comportamento da rotação ao longo do tempo e a faixa de tolerância do controlador (linhas tracejadas). A Curva B apresenta a posição real do atuador de marcha lenta em número de passos. A re-alimentação do controlador de lambda foi feita através do sinal do *EGO*, que pode ser observada na Curva C. Já o valor de Lambda instantâneo é apresentado na Curva D, medido por meio de uma sonda linear tipo *UEGO*, juntamente com a indicação da região de tolerância de 1% em torno do ponto estequiométrico (linhas tracejadas). A Curva E apresenta a correção aplicada ao tempo de injeção pelo controlador de mistura, enquanto a Curva F mostra o tempo de injeção final aplicado aos eletroinjetores.

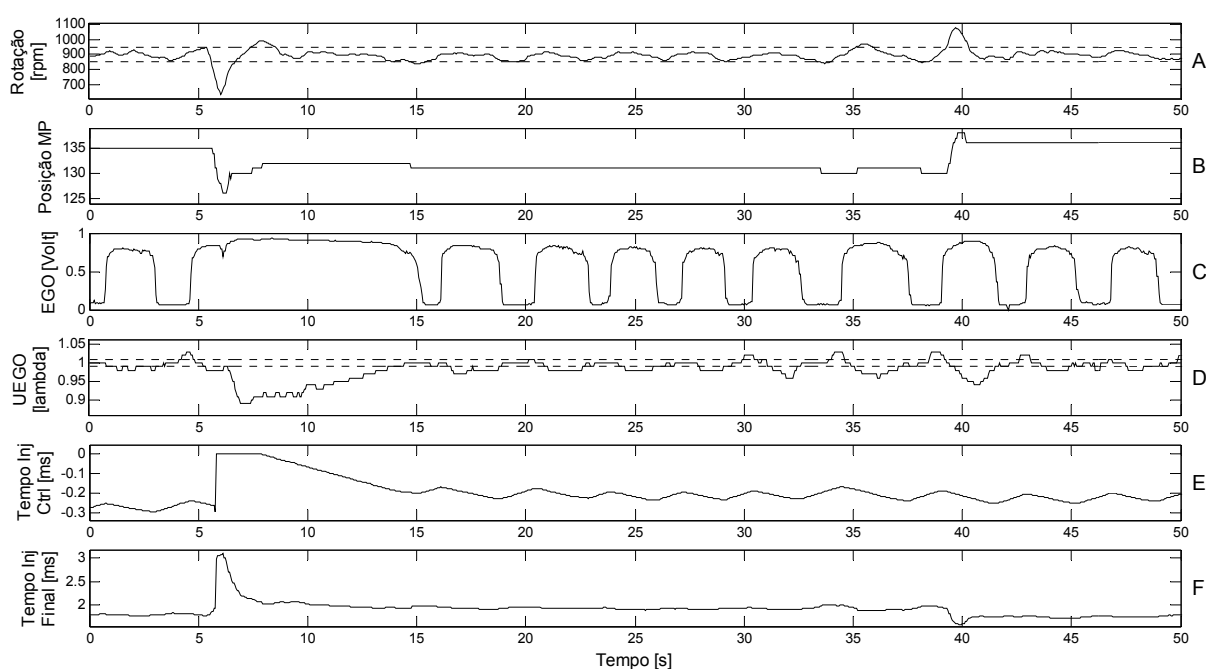


Figura 5.6 – Controle de marcha lenta e lambda em malha fechada usando sensor *EGO*.

A condição inicial da aquisição mostra o sistema em regime permanente com a rotação real dentro da faixa de tolerância e o fator Lambda a condição estequiométrica. A posição inicial do atuador de marcha lenta é de 135 passos, enquanto o tempo de injeção está em torno de 1,8 ms. O controlador de mistura aplica uma correção negativa média de 0,27 ms, em função da característica oscilatória da re-alimentação (*EGO*).

No instante $t \approx 5,0$ s, o eletroventilador é inserido, causando uma queda na rotação do motor e conseqüente abertura do atuador de marcha lenta. O empobrecimento da mistura causado por essa ação é compensado pela entrada da estratégia de enriquecimento através do aumento no tempo de injeção (Curva F, instante $t \approx 6,0$ s). O valor do o tempo de injeção passa a ser de aproximadamente 3,0 ms, que

corresponde ao ganho de 30% aplicado sobre o tempo de injeção somado à contribuição de 0,27 ms que deixa de ser aplicada pelo controlador de mistura, em malha aberta durante a estratégia de enriquecimento. O controlador é mantido na condição de malha aberta por aproximadamente 2,0 s (correção nula mostrada na Curva E). Esse valor corresponde ao tempo necessário para que o ganho de enriquecimento de 30% seja reduzido a zero ao passo de 1,5% por ciclo, sendo a redução gradual do ganho de enriquecimento observada no tempo de injeção final (Curva F).

A perturbação promove uma queda na rotação, cujo mínimo é de 650 RPM. Porém, a abertura do atuador de marcha lenta e o enriquecimento da mistura promovem o retorno da rotação à região de controle em aproximadamente 1,0 s, seguida de um *overshoot* de 5% no limite superior da tolerância. A partir desse ponto o controlador de marcha lenta atua até que a rotação retorne a faixa de tolerância.

No instante $t \approx 8,0$ s, o ganho da estratégia de enriquecimento chega a zero e o controlador de mistura volta a atuar em malha fechada, iniciando a aplicação de uma correção negativa, visto que o sinal do sensor *EGO* indica mistura rica. À medida que o λ se aproxima da condição estequiométrica, a rotação diminui se aproximando do limite de tolerância inferior, até ultrapassá-lo (instante $t \approx 16,0$ s). Nota-se que a abertura de 1 passo do atuador de marcha lenta é suficiente para corrigir a rotação, que passa a oscilar dentro da região de tolerância, em função da variação do λ .

A nova condição de regime permanente é atingida (instante $t \approx 16,0$ s) com o atuador de marcha lenta na posição de 131 passos, 04 passos mais aberto que a condição inicial, enquanto o tempo de injeção é mantido em torno de 2,1 ms. Ainda na condição considerada como regime permanente, após o instante $t \approx 30,0$ s, ocorre uma oscilação de λ em maior amplitude que influi na rotação, sendo essa situação corrigida pelo controlador de marcha lenta. Essa oscilação representa exatamente uma variação entre ciclos do motor, inerentes à sua dinâmica.

No instante $t \approx 38,0$ s ocorre outra perturbação no sistema, promovida pela remoção da carga aplicada (desligamento do eletroventilador), que traz como consequência um aumento na rotação do motor, fazendo com que o controlador de marcha lenta diminua a vazão de ar admitida pelo motor. A redução instantânea da quantidade de ar admitida causa uma perturbação na malha de controle de λ , devido ao enriquecimento da mistura mostrado na Curva D (instante $t \approx 40,0$ s).

Nessa situação, a mistura é corrigida inicialmente pela estratégia de compensação da posição do atuador de marcha lenta, que diminui o tempo de injeção de 0,03 ms a cada passo dado pelo atuador em relação à posição padrão de referência (140 passos). A correção da mistura após a correção da rotação é realizada pelo controlador de mistura, em função do sinal de re-alimentação do sensor *EGO*.

A nova condição de regime permanente após a retirada da carga é atingida (instante $t \approx 42,0$ s) com o atuador de marcha lenta na posição de 136 passos, 01 passo mais fechado que a condição inicial ($t = 0,0$ s), enquanto o tempo de injeção é mantido novamente em torno de 1,8 ms e com as variáveis controladas próximas de suas respectivas referências.

Ainda na Figura 5.6 podem ser observadas algumas características dinâmicas do sistema de controle com o motor em funcionamento. Nas regiões citadas como regime permanente de operação do motor, percebe-se que a rotação (Curva A) oscila na mesma frequência do valor de Lambda (Curvas C e D). Essa oscilação se deve à aplicação de um sensor *EGO* na realimentação da malha, cuja resposta dinâmica é não-linear, além da presença de uma histerese na sua condição de operação. Ambas as características podem ser visualizadas na curva de calibração desse sensor, mostrada no item 4.2.6. O intervalo definido entre $15,0s \leq t \leq 30,0s$ mostra claramente a necessidade da adoção de uma faixa de tolerância para o valor da rotação de marcha lenta, visto que as oscilações do fator Lambda são intrínsecas ao sistema baseado no *EGO* e ao funcionamento cíclico de um MCI que não sendo possível evitar pequenas oscilações da rotação.

A redução dessa faixa de tolerância, utilizando o sensor *EGO* pode impor que o atuador de marcha lenta se mova constantemente tentando corrigir a oscilação da rotação. Este movimento contínuo do atuador faz com que a perturbação em Lambda promova oscilações na mistura em maiores amplitudes e, conseqüentemente, levar a dinâmica da rotação à instabilidade.

Apesar de o exemplo apresentado ter sido obtido em um único motor, a aplicação dos conceitos aqui discutidos, bem como a avaliação da dinâmica associada ao controlador, permitem mostrar a resposta do controlador e auxiliam no ajuste dos ganhos associados a cada ação de controle. O bom entendimento da Figura 5.6 é fundamental para aplicação do controlador de injeção de combustível em um MCI diferente do citado. Os testes realizados mostram que o controlador implementado apresenta uma dinâmica satisfatória, quando aplicado a um motor de baixa cilindrada.

5.3 Resultados obtidos para o Motor FIAT FIRE 1.3 8V

5.3.1 Curvas características de desempenho

Visto que os resultados atingidos pelo SGEM implementado em comparação a um sistema de gerenciamento original (IAW 1G711) mostraram a capacidade de otimização dos parâmetros de operação de um MCI, optou-se pela realização de novos testes comparativos, utilizando outro motor comercial veicular. A Tabela V.3 apresenta as características técnicas do motor FIRE 1.3 8V utilizado.

Tabela V.3 - Características técnicas do Motor FIRE 1.3 8V.

Características técnicas:
<i>Fabricante:</i> Fiat Automóveis S/A
<i>Cilindrada:</i> 1242 cm ³
<i>Diâmetro do cilindro x Curso do pistão:</i> 76,0 mm x 54,8 mm
<i>Relação de Compressão:</i> 9,35:1
<i>Potência máxima:</i> 45,0 kW (61,0 CV)@6000 RPM (NBR ISO 1585/1996)
<i>Torque máximo:</i> 79,5 N.m (8,1 kgf.m)@3000 RPM (NBR ISO 1585/1996)
<i>Combustível:</i> Gasolina Comum (E25)
<i>Número de cilindros:</i> 4 (quatro) dispostos em linha.
<i>Regime de Marcha Lenta:</i> 850 ± 50 RPM
<i>Número de válvulas:</i> 8 (oito) – 1 de Admissão e 1 de descarga por cilindro
<i>Tipo de aspiração:</i> Natural
<i>Tipo de Injeção:</i> Multiponto seqüencial fasada Magneti Marelli – Mod. IAW 4SF

Além da utilização de um motor diferente, os testes aqui descritos têm o objetivo de comparar os resultados obtidos com o SGEM implementado com os resultados de um sistema de gerenciamento reprogramável comercial. Desta forma, para este motor, não foram realizados testes com o sistema de gerenciamento original, o qual foi substituído pelo sistema de gerenciamento reprogramável fabricado pela MoTeC, modelo M4. Todos os sensores e atuadores originais do motor foram mantidos, porém a estratégia de injeção, que no sistema original é seqüencial fasada via software, foi modificada para semi-seqüencial, para equivalência ao SGEM implementado.

Diferentemente do ajuste descrito no item 5.2, foram levantados os mapas de avanço de ignição e de tempo base de injeção para condições de partida a 6500 RPM e com abertura de borboleta de 0 a 100% (fechada até plena carga). Destaca-se aqui a opção pelo ajuste do motor em função da rotação e da posição da borboleta, visto que as curvas de referência foram obtidas em plena carga. Em ambos os sistemas de

gerenciamento, o incremento da rotação para determinação dos mapas de avanço e tempo base de injeção foi de 250 RPM. O incremento na posição da borboleta foi de 5%. O ajuste de um motor deve ser iniciado pela configuração dos sistemas de gerenciamento eletrônico utilizados no ensaio. Por essa razão, os parâmetros de configuração iniciais em ambos os sistemas estão apresentados na Tabela V.4.

Tabela V.4 – Parâmetros iniciais para configuração da ECU (Baeta *et al*, 2004).

Parâmetro de controle:	MoTeC M4¹	SGEM
Tempo base de Injeção – <i>IJPU</i> [ms]	7,0 (7)	7,0
Estratégia de Injeção	Semi-sequencial (2)	Semi-sequencial
Ângulo de início da injeção – <i>Injection Timing</i>	150° DPMS - fixo	150° DPMS - fixo
Compensação pela tensão da bateria	Não aplicado	Não aplicado
Referência de carga aplicada	% borboleta (1)	% borboleta
Número de cilindros	4 (4)	4
Tipo de sensor de referência	Magnético (2)	Magnético
Tipo de sensor de sincronismo	Magnético (-1)	Não utilizado
Número de dentes da roda fônica por volta	60 (60)	60
Tipo de Falha da roda fônica	2 consecutivas (83)	2 consecutivas
Direção de detecção da falha	<i>Trigger</i> em subida (1)	<i>Trigger</i> em subida
Posição da falha em relação ao sensor APMS	95° APMS (95)	144° APMS
Tipo de Ignição	Estática (1)	Estática
Número de bobinas de ignição	2 (2)	2
Tempo de Ignição – <i>Dwell time</i> [ms]	3,5 – fixo (0,0)	3,5 – fixo
Tempo de retardo de ignição	50 μ s (50)	-

A diferença na configuração dos sistemas de gerenciamento eletrônico testados, de acordo com a Tabela V.4, está no tipo de sensor de sincronismo, visto que o SGEM não necessita desse sinal para operação em modo semi-sequencial. Outra diferença é a posição da falha em relação ao sensor devido à utilização de sensores independentes para cada sistema e da impossibilidade de fixação na mesma posição e no tempo de retardo de ignição, não considerado no SGEM implementado. Após a configuração inicial dos sistemas de gerenciamento e dos sensores e atuadores presentes no motor em teste, realizou-se a partida do motor, seguida do ajuste dos mapas de referência do mesmo em bancada dinamométrica. Para tal, aplicou-se à metodologia descrita por Baeta *et al* (2004).

¹ Os números entre parênteses são os códigos de configuração da MoTeC para a estratégia descrita.

Concluída a etapa de ajuste foram levantadas 3 (três) curvas com o motor em regime de plena carga, sendo o resultado final obtido a partir de uma média das três leituras. Durante esses ensaios, realizou-se a otimização dos mapas de avanço de ignição, percentual do tempo base de injeção (%*I**JPU*) e ângulo de injeção. Assim como nos testes anteriores, a detecção da detonação foi realizada através do método auditivo, utilizando-se um acelerômetro piezo-elétrico fixado ao bloco do motor. O critério utilizado como avanço máximo foi o de busca pelo maior torque observado (*MBT*), limitado pelo início da detonação (*LDI*). Devido à sua influência direta na temperatura do catalisador, a cada regime de rotação a mesma foi observada, sempre respeitando o valor máximo de 950 °C, recomendado pelo fabricante do motor em teste. Os valores de Lambda foram medidos por meio de sonda linear e mantidos próximos em ambas as calibrações. O mesmo aconteceu com o ângulo de injeção.

As Figuras 5.7 e 5.8 apresentam gráficos comparativos com os valores médios do Torque Corrigido e Potência Corrigida (NBR 1585) respectivamente, obtidos com a MoTeC (M4) e com o sistema de gerenciamento eletrônico desenvolvido (SGEM). Como a bancada dinamométrica utilizada para a realização destes ensaios é a mesma apresentadas em 5.2.1, as incertezas máximas estão apresentadas no Anexo A.

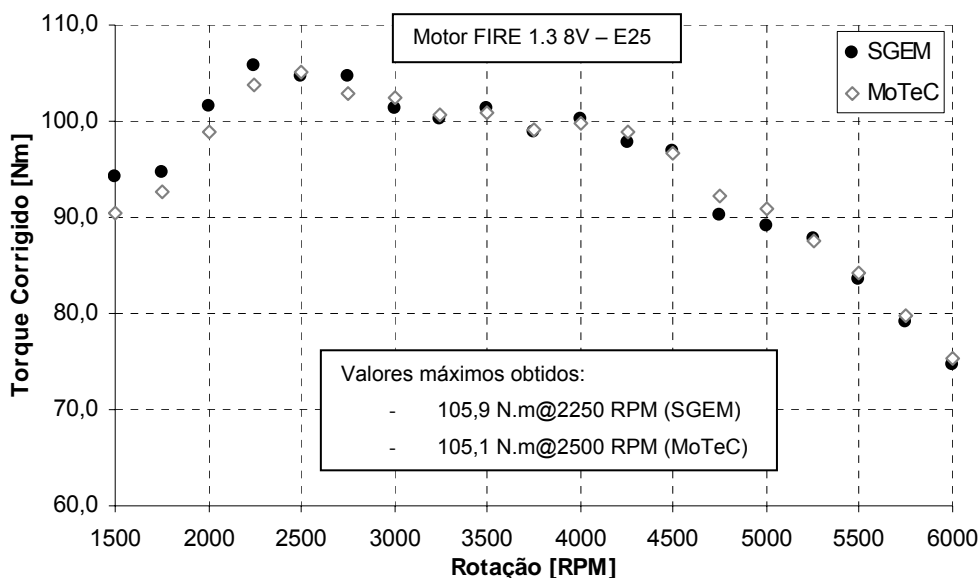


Figura 5.7 – Curva de Torque Corrigido (NBR 1585).

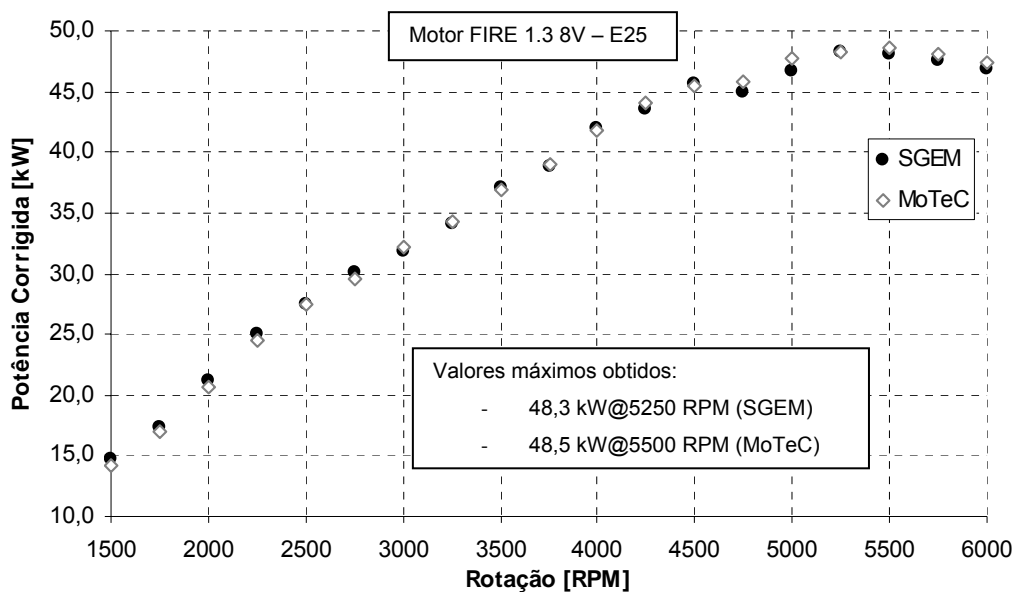


Figura 5.8 – Curva de Potência Corrigida (NBR 1585).

De acordo com os gráficos mostrados nas Figuras 5.7 e 5.8 é possível perceber que as curvas de Torque e Potência corrigidos possuem a mesma tendência, com os valores máximos por rotação alternando entre si. Percebe-se um aumento de torque em baixa rotação quando o motor é controlado pelo SGEM, que vai de 1500 ($\approx 4,0\%$) a 2250 RPM ($\approx 2,0\%$). A partir desse ponto até a rotação máxima (6000 RPM), os valores máximos obtidos em cada regime de rotação se alternam entre os dois sistemas de gerenciamento eletrônico testados. Dentro dessa faixa, destacam-se duas condições do Torque Corrigido, sendo a primeira delas um aumento de 1,8% a 2750 RPM e a segunda uma redução de 2,0% a 4750 e 5000 RPM. Como estes valores estão dentro da faixa de oscilação ao longo de toda curva, pode-se dizer que está associado à incerteza do sistema de medição (Anexo A) e ao tipo de dinamômetro utilizado que, devido ao princípio de funcionamento hidráulico, apresenta oscilações normais de ± 10 RPM em condição de operação (Plint e Marty, 1999).

As oscilações do Torque corrigido refletem diretamente nos valores de Potência Corrigida, mostrado na Figura 5.8. Observa-se a mesma tendência de alternância dos valores máximos obtidos em cada regime de rotação entre os dois sistemas de gerenciamento eletrônico testados, dentro de uma faixa de $\pm 2,0\%$. O consumo de combustível não foi avaliado devido à indisponibilidade do sistema de medição durante os ensaios.

5.4 Resultados obtidos para o Motor GM 1.8 8V GIII Flex

5.4.1 Curvas características de desempenho

Os resultados apresentados no item 5.3 permitem observar o bom desempenho do SGEM implementado em relação ao sistema programável da MoTeC, modelo M4. Dessa forma, optou-se por realizar um teste comparativo, com o objetivo de avaliar as curvas características de um MCI com a aplicação dos mesmos mapas de referência nos dois sistemas de gerenciamento eletrônico testados. Neste teste, foram levantados os mapas de avanço de ignição e de tempo base de injeção para condições de partida a 6500 RPM e com abertura de borboleta de 0 a 100%. Novamente optou-se pelo ajuste do SGEM no motor em função da rotação e da posição da borboleta, visto que as curvas de referência foram obtidas em plena carga.

Em ambos os sistemas de gerenciamento, o incremento da rotação para determinação dos mapas de avanço e tempo base de injeção foi de 250 RPM e o incremento na posição da borboleta foi de 5%, definida como “calibração 5x250”. Esses mapas de referência estão apresentados no Anexo B. Visando testar também a flexibilidade do sistema, optou-se pela utilização de um motor veicular de maior cilindrada, capaz de desenvolver valores de potência e torque superiores aos anteriores. A Tabela V.5 apresenta as características técnicas fornecidas pelo fabricante, sendo ele o motor GM 1.8 8V Flex GIII, alimentado com gasolina comum (E25).

Tabela V.5 – Características técnicas do Motor GM 1.8 8V Flex GIII.

Características técnicas:
<i>Fabricante:</i> General Motors do Brasil
<i>Cilindrada:</i> 1794 cm ³
<i>Diâmetro do cilindro x Curso do pistão:</i> 80,5 mm x 88,2 mm
<i>Relação volumétrica de compressão:</i> 10,5:1
<i>Potência máxima:</i> 82,3 kW (112,0 CV)@5400 RPM (NBR ISO 1585/1996)
<i>Torque máximo:</i> 174,0 N.m (17,8 kgf.m)@2800 RPM (NBR ISO 1585/1996)
<i>Combustível:</i> Gasolina Comum (E25)
<i>Número de cilindros:</i> 4 (quatro) dispostos em linha.
<i>Regime de Marcha Lenta:</i> 850 ± 50 RPM
<i>Número de válvulas:</i> 8 (oito) – 1 de Admissão e 1 de descarga por cilindro
<i>Tipo de aspiração:</i> Natural
<i>Tipo de Injeção:</i> Multiponto seqüencial fasada Delphi - Modelo MT27E

Além da utilização de um motor diferente, os testes aqui descritos diferenciam-se dos anteriores pela remoção do sensor de sincronismo do sistema de gerenciamento programável da MoTeC. Essa remoção foi realizada no intuito de estabelecer as mesmas condições iniciais, apresentados na Tabela V.6, para ambos os sistemas (M4 e SGEM). Outra modificação realizada foi à instalação de um sistema mecânico para acionamento da válvula borboleta, pelo fato do sistema original ser realizado pela estratégia *drive-by-wire*, indisponível MoTeC M4 e no SGEM implementado até o momento. Os demais sensores e atuadores originais do motor foram mantidos, porém a estratégia de injeção, que no sistema original é seqüencial fasada via software, foi modificada para semi-seqüencial, para equivalência dos sistemas.

Tabela V.6 – Parâmetros iniciais para configuração do sistema.

Parâmetro de controle:	MoTeC M4²	SGEM
Tempo base de Injeção – <i>IJP</i> U [ms]	12,0 (12)	12,0
Estratégia de Injeção	Semi-seqüencial (2)	Semi-seqüencial
Ângulo de injeção – <i>Injection Timing</i>	45° DPMS - fixo	156° DPMS – fixo
Compensação pela tensão da bateria	Não aplicado	Não aplicado
Referência de carga aplicada	% borboleta (1)	% borboleta
Número de cilindros	4 (4)	4
Tipo de sensor de referência	Magnético (2)	Magnético
Tipo de sensor de sincronismo	Não utilizado	Não utilizado
Número de dentes da roda fônica por volta	60 (60)	60
Tipo de Falha da roda fônica	02 consecutivas (83)	02 consecutivas
Direção de detecção da falha	<i>Trigger</i> descendente (1)	<i>Trigger</i> ascendente
Posição da falha em relação ao sensor APMS	135° APMS (135)	144° APMS
Tipo de Ignição	Estática (1)	Estática
Número de bobinas de ignição	2 (2)	2
Tempo de Ignição – <i>Dwell time</i> [ms]	3,5 – fixo (0,0)	3,5 – fixo
Tempo de retardo de ignição	50 μ s (50)	-

A diferença na configuração dos sistemas de gerenciamento eletrônico testados está na remoção do sensor de sincronismo, na posição da falha em relação ao sensor devido a diferenças de estratégia de identificação da falha e no tempo de retardo de ignição, não considerado no SGEM implementado. A mesma metodologia descrita por Baeta *et al* (2004) foi aplicada no ajuste do motor em bancada dinamométrica.

² Os números entre parênteses são os códigos de configuração da MoTeC para a estratégia descrita.

Realizou-se o ajuste dos mapas de avanço de ignição, percentual do tempo base de injeção (%*IJPU*) e ângulo de injeção. O critério utilizado como avanço máximo foi o de busca pelo maior torque observado (*MBT*), limitado pelo início da detonação (*LDI*), cuja detecção foi realizada através do método auditivo, conforme descrito em 5.3.1. Devido à sua influência direta na temperatura do catalisador, a cada regime de rotação a mesma foi observada, respeitando o valor máximo de 950 °C, recomendado pelo fabricante do motor. Os valores de Lambda foram medidos por meio de sonda linear e mantidos próximos em ambos os ajustes. O ângulo de injeção foi mantido fixo no valor que apresentava a mistura mais rica para um mesmo tempo de injeção.

Existe ainda uma particularidade nos testes realizados com esse motor. O ajuste descrito foi realizado a cada 250 RPM, desde a partida do motor até 6500 RPM. Porém, o incremento de rotação, utilizado para obtenção de suas curvas características, foi de 400 RPM a partir de 1600 RPM, até a rotação máxima de 6000 RPM, medindo ainda a rotação a 6250 RPM para verificar a inflexão na curva de potência. Por se tratar de um trabalho comparativo, reduziu-se o incremento da rotação para 200 RPM nas faixas de ocorrência do Torque e da Potência máximos.

Nas condições apresentadas, somente alguns pontos que descrevem o mapa de referência coincidem com o ponto de medição. Essa condição permite a realização de uma pré-avaliação do método de interpolação implementado em função das curvas características apresentadas.

Durante o funcionamento do motor com a MoTeC M4, observou-se que as alterações no ângulo de injeção, realizadas no software de ajuste, não refletiam sobre a condição de Lambda em um tempo fixo de injeção. Foi possível constatar, através de um osciloscópio, que o sinal de comando do eletroinjetor não era re-posicionado em relação à falha, apesar da modificação na tabela de ângulo de injeção (*Injection Timing Table*). Segundo o manual da MoTeC, e na função de ajuda do *software*, a alteração dessa condição depende do tipo de sensor de referência utilizado e de características físicas da roda dentada. Devido a esse fato, o ângulo de injeção não pôde ser alterado no modo semi-sequencial, o que prejudicou o desempenho da MoTeC M4. De acordo com o sinal medido, o instante final da injeção coincide com a falha da roda dentada, fazendo com que a massa total de combustível necessária por ciclo, seja injetada antes do final do ciclo de admissão e antes do final do ciclo e expansão em cada cilindro.

5.4.1.1 Resultados dos testes a plena carga

As Figuras 5.9 e 5.10 apresentam gráficos comparativos com os valores médios do Torque Corrigido e Potência Corrigida (NBR 1585), obtidos com a MoTeC M4 e com o SGEM. Os resultados com o sistema de gerenciamento eletrônico original do motor não foram apresentados devido às diferenças na estratégia de injeção, visto que o sistema original realiza injeção seqüencial sincronizada e adota o controle do avanço de ignição em malha fechada (detecção da detonação por meio de acelerômetro). A incerteza expandida para a bancada dinamométrica utilizada nestes ensaios a seguir é menor que 1,0%, obtida através de ensaios de proficiência por colaboração interlaboratorial (Relatório preliminar, 2006).

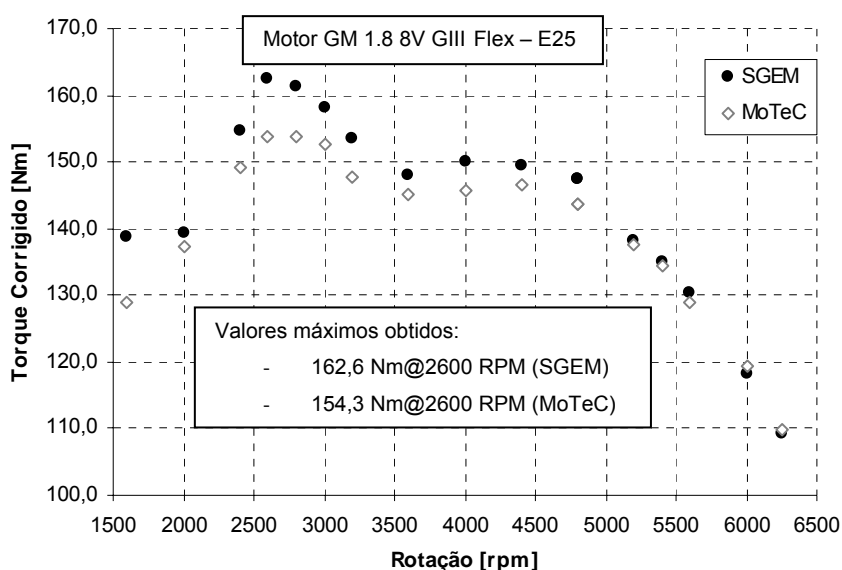


Figura 5.9 – Curva de Torque Corrigido (NBR 1585). Calibração 5x250.

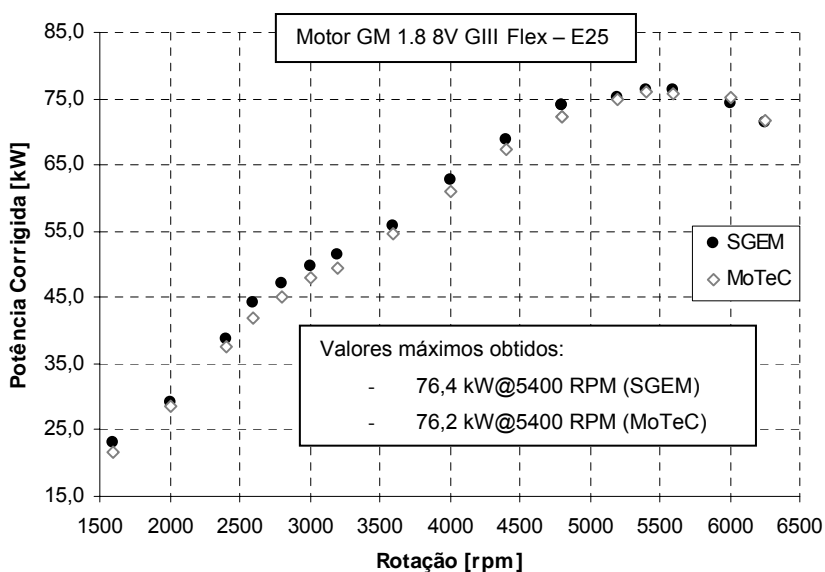


Figura 5.10 – Curva de Potência Corrigida (NBR 1585). Calibração 5x250.

A Figura 5.9 apresenta um aumento do Torque corrigido quando o motor é controlado pelo SGEM, que vai de 1600 ($\approx 6,0\%$) a 4800 RPM ($\approx 3,0\%$). Dentro dessa faixa, destaca-se o aumento de 5,1% a 2600 RPM (Torque máximo). A partir de 4800 RPM até a rotação máxima (6250 RPM), os valores máximos obtidos em cada regime de rotação alternam entre os dois sistemas testados dentro de uma faixa de $\pm 0,5\%$. Como a incerteza expandida da sala dinamométrica utilizada que é de $\pm 1,0\%$, pode-se associar essa variação à incerteza do sistema de medição. A Figura 5.10 apresenta as curvas de Potência Corrigida para ambos os sistemas. Observa-se um aumento na Potência, como reflexo do aumento de Torque, na mesma faixa de rotação citada. Como o aumento ocorre em rotações mais baixas que a de Potência máxima, foram obtidos valores similares de Potência Máxima a 5400 RPM. As curvas apresentadas nas Figuras 5.9 e 5.10 foram obtidas com a aplicação dos mesmos mapas de referência nos dois sistemas de gerenciamento eletrônico testados. No caso de avanço de ignição em plena carga, utilizou-se a curva mostrada na Figura 5.11, visto que a mesma apresenta uma condição próxima ao LDI em ambos os sistemas.

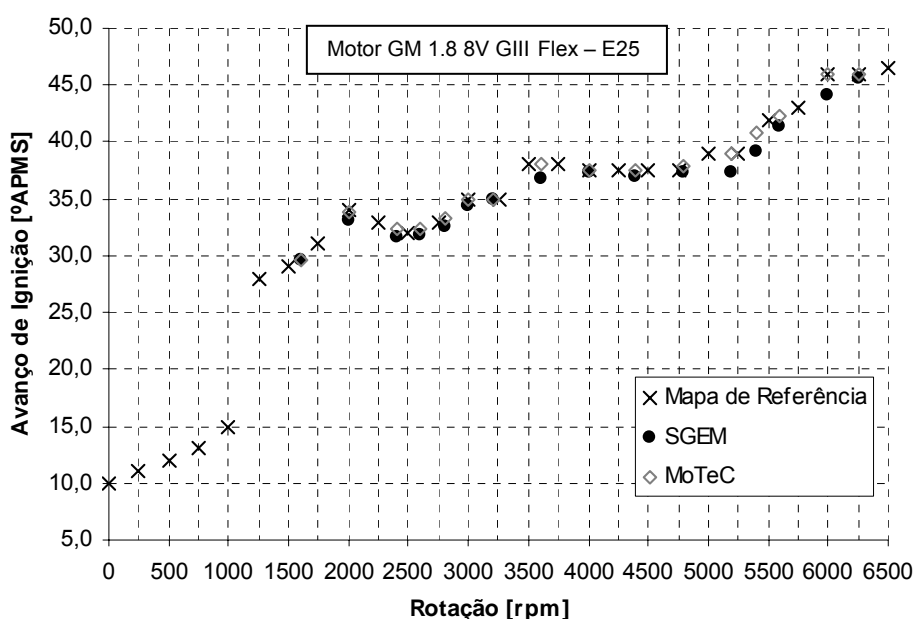


Figura 5.11 – Curva de avanço de ignição a plena carga. Calibração 5x250.

A Figura 5.11 apresenta os valores de avanço de ignição medidos durante o ensaio em ambos os sistemas, permitindo visualizar a ocorrência de valores maiores na MoTeC, em relação ao SGEM implementado. Esse aumento está associado a uma tentativa de minimizar as diferenças mostradas nas Figuras 5.9 e 5.10. Como a temperatura do catalisador está diretamente ligada à relação ar/combustível e ao avanço de ignição (plena carga), seu valor é um dos fatores limitantes ao processo de ajuste, por exigir que seu valor seja mantido abaixo de 950 °C. Em condições de LDI, o enriquecimento de Lambda permite reduzir a temperatura do catalisador.

A Figura 5.12 apresenta as curvas comparativas de temperatura do catalisador (Curva A), de consumo específico de combustível (SFC) (Curva B) e a variação do fator Lambda (Curva C) medidas em função da rotação do motor na condição de plena carga, onde é possível observar uma relação direta entre elas. O Anexo A apresenta as incertezas máximas associadas a cada grandeza de medição.

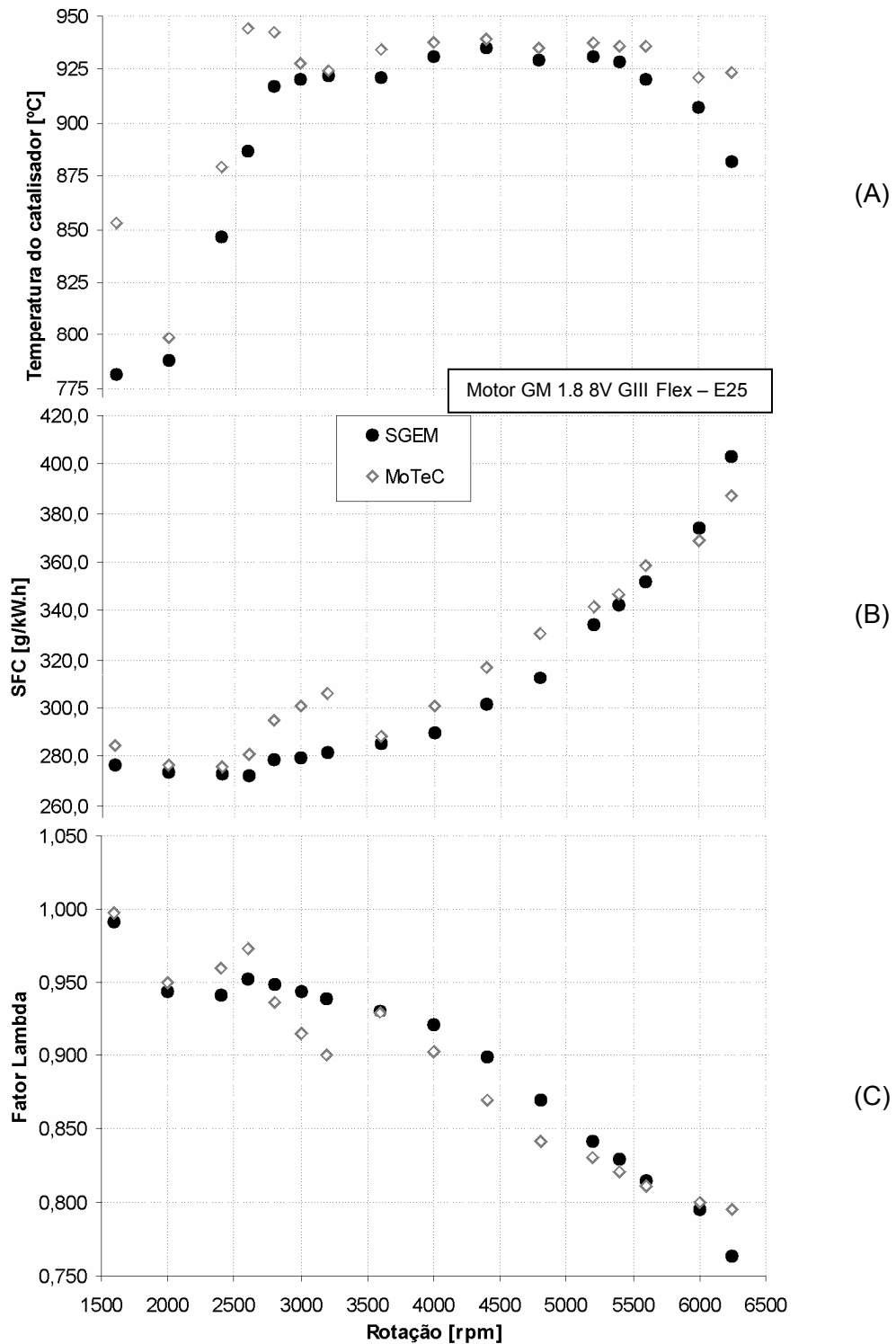


Figura 5.12 – (A) Temperatura do catalisador, (B) Consumo Específico de Combustível e (C) Fator Lambda em função da rotação a plena carga. Calibração 5x250.

De acordo com a Figura 5.12, a temperatura do catalisador (Curva A) foi mantida abaixo do limite estipulado de 950 °C ao longo de todo o teste. Percebe-se uma tendência ao aumento da temperatura quando o motor está sendo controlado pela MoTeC, em relação à curva apresentada pelo SGEM implementado. Esse aumento impossibilitou a manutenção do mesmo ajuste de tempo base de injeção em ambos os sistemas de gerenciamento. Foram necessários enriquecimentos pontuais de até 4% (3200 RPM - Curva C) no fator Lambda para manter o limite de temperatura dentro da condição aceitável de operação. Ainda na Curva C, observa-se uma tendência ao enriquecimento da mistura em toda a faixa de rotação, realizado em função do aumento da temperatura do catalisador (Curva A), com o sistema MoTeC M4.

Esse ajuste refletiu em um aumento ao longo da curva de consumo específico de combustível (Curva B), obtida com o sistema MoTeC M4, principalmente na faixa de rotação de 2600 a 3400 RPM. Esse aumento decorre não só do enriquecimento da mistura, mas também da queda dos valores de Potência Corrigida, apresentados na Figura 5.9. A necessidade de enriquecimento da mistura em função do aumento da temperatura do catalisador pode estar associada à impossibilidade de alteração do ângulo de injeção do sistema MoTeC M4 em condição de operação semi-sequencial. Esse ângulo, medido com o osciloscópio, mostra que o instante final de injeção ocorre no início da falha da roda dentada. No motor utilizado, a falha encontra-se alinhada com o sensor de rotação a 135 graus do ponto morto superior dos cilindros 1 e 4 (135° APMS). Nessa condição o cilindro recebe o combustível nos tempos de admissão e de expansão (semi-sequencial), ambas finalizadas na posição de 45 graus após o PMS (45° DPMS). Porém, a posição de 156° DPMS garante que todo o combustível do tempo de admissão seja injetado com a válvula de admissão aberta. Como o ângulo de injeção influi diretamente na formação da mistura, esse valor foi definido experimentalmente ao longo do ensaio, sendo o critério utilizado para indicar a melhor atomização da mistura o menor fator Lambda obtido para um mesmo tempo de injeção.

Existe ainda um ponto a ser discutido em relação aos sistemas testados. Na Figura 5.12, a única condição de operação próxima à estequiométrica ocorre a 1600RPM (Curva C). Na mesma condição, a temperatura do catalisador apresenta com o sistema MoTeC M4 um aumento superior a 70°C ($\approx 9,0\%$), em relação ao SGEM implementado. Como as condições iniciais são mantidas constantes (Lambda, avanço, carga e rotação) esse aumento pode estar associado ao ângulo de injeção, como discutido anteriormente, ou ao sistema de ignição que, na MoTeC M4, necessita de um *driver* externo para acionamento das bobinas.

Problemas no sistema de ignição levam à combustão incompleta da mistura no interior da câmara, sendo a mesma queimada ao entrar em contato com o catalisador a alta temperatura, na presença de oxigênio para tal ($\lambda \rightarrow 1,00$). Com o objetivo de esclarecer essa questão, foram realizados novos testes em cargas parciais, devido à possibilidade de manter o Lambda próximo da condição estequiométrica por uma faixa maior de rotação. Esses testes possibilitam ainda uma avaliação comparativa do controlador de mistura ar/combustível em malha fechada.

5.4.1.2 Resultados dos testes em cargas parciais

A partir dos valores obtidos à plena carga, foram estabelecidos valores de Torque correspondente a 50% do valor máximo obtido em cada condição. A bancada dinamométrica foi programada para atingir esses valores através de variação na posição da borboleta. Novamente foram mantidos os mesmos ajustes descritos nos mapas de avanço de ignição, tempo base de injeção e dos parâmetros iniciais para ambos os sistemas de gerenciamento testados. A Figura 5.13 apresenta as curvas de Torque e Potência utilizadas como referência para os ensaios em cargas parciais. Apesar deste tipo de ensaio não ser normalizado, os valores de referência também foram corrigidos segundo a Norma NBR ISO 1585/1996.

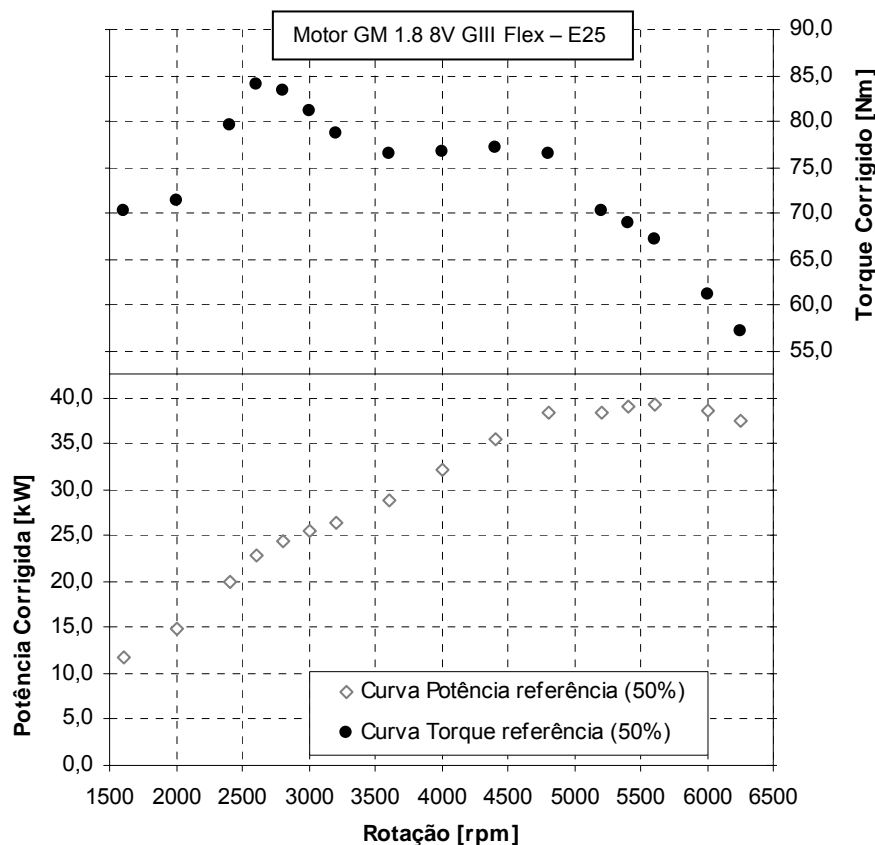


Figura 5.13 – Curvas de referência a 50% de carga. Calibração 5x250.

A Figura 5.14 apresenta as curvas comparativas de temperatura do catalisador (Curva A), de consumo específico de combustível (SFC) (Curva B) e a variação do fator Lambda (Curva C) medidas em função da rotação do motor na condição de 50% de carga.

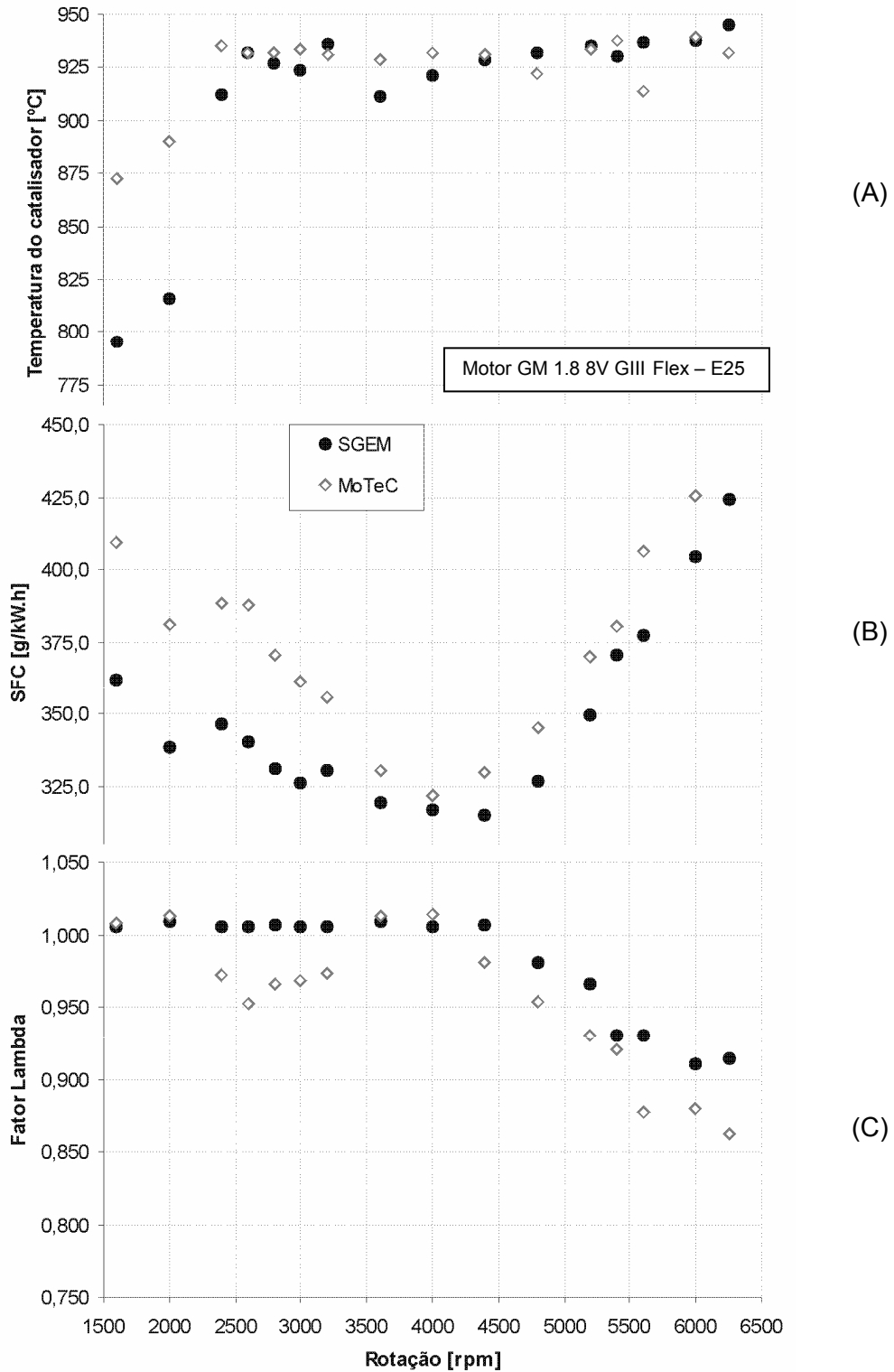


Figura 5.14 – (A) Temperatura do catalisador, (B) Consumo Específico de Combustível e (C) Fator Lambda em função da rotação a 50% carga. Calibração 5x250.

De acordo com a Figura 5.14, a temperatura do catalisador (Curva A) foi mantida abaixo do limite estipulado (950 °C) durante o teste. Com o motor controlado pela MoTeC, existe uma tendência ao aumento dessa temperatura até 3500 RPM sendo que, a partir de 2400 RPM, a temperatura do catalisador só foi mantida com o enriquecimento da mistura (Curva C), através da desabilitação do controle em malha fechada ($f_{0/1}=0$). Essa ação impossibilitou a manutenção da tabela que define a ação desse controlador, bem como o mapa de tempo base de injeção, em ambos os sistemas. Com o controle realizado pela MoTeC, foram necessários enriquecimentos pontuais de até 5% de 2400 a 3200 RPM (Curva C) no fator Lambda para manter a temperatura dentro da condição limite de operação. Já com o SGEM implementado, somente ocorreu a necessidade de desabilitar o controle em malha fechada a partir de 4400 RPM ($f_{0/1}=0$), o que favoreceu a redução do consumo específico de combustível (Curva B). O mapa de avanço de ignição (Figura 5.15) também sofreu alterações em seu ajuste visando corrigir os efeitos apresentados. Porém, devido ao método de ajuste utilizado, essa alteração não apresentou reduções significativas na temperatura do catalisador e no consumo específico de combustível, devido à limitação do avanço de ignição (LDI).

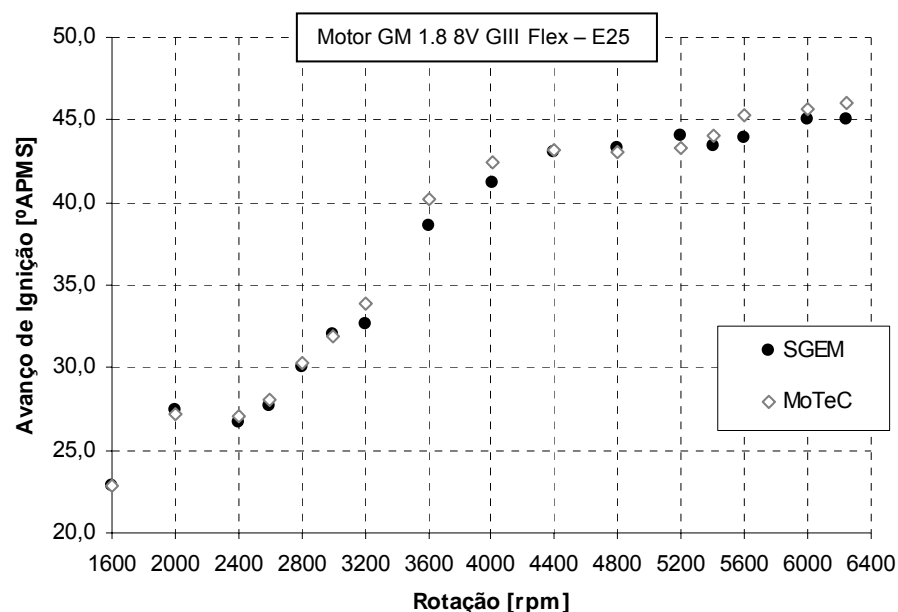


Figura 5.15 – Diferenças de avanço de ignição a 50% de carga. Calibração 5x250.

Na tentativa de detectar a existência de problemas com o sistema de ignição, aumentou-se o tempo de permanência (*Dwell time*) para 3,8 ms. Essa mudança foi influente, visto que 3,5 ms são suficientes para carregar a bobina de ignição, conforme medição realizada. As tensões nos circuitos primário e secundário não foram medidas devido à indisponibilidade de equipamento. Como o aumento do *Dwell time* não influenciou a temperatura do catalisador, pode-se atribuir o aumento do consumo específico de combustível à diferença no ângulo de injeção, discutida anteriormente.

5.4.2 Testes com o método de interpolação implementado

Os resultados apresentados a seguir dizem respeito ao método de interpolação implementado, apresentado no item 4.3.5. Esse método é baseado em um modelo de aproximação de funções não-lineares (Sugeno, 2002) que descreve a utilização de uma função de pertinência (peso), associada a cada valor lingüístico que, nesse caso, são os pontos de rotação e carga pré-estabelecidos no mapa de referência do motor. A forma geral do modelo de interpolação é descrita por:

$$T_{i,j} = (D)(A) \cdot T_{(C+i_{carga}),(n+i_{rot})} + (D)(B) \cdot T_{(C+i_{carga}),n} + (E)(A) \cdot T_{C,(n+i_{rot})} + (E)(B) \cdot T_{C,n} \quad (5.1)$$

Como a MoTeC utiliza estratégias de interpolação linear a partir de quatro pontos de referência circunvizinhos ao ponto desejado, foram atribuídos os mesmos pesos ao modelo utilizado, fazendo com que realize a mesma interpolação linear. O SGEM utiliza a Equação 5.1 e os pontos de referência para determinar o parâmetro de controle $T_{i,j}$ em cada condição de carga C_i e rotação R_j , compreendidos entre os pontos C_c e $C_{(c+i_{carga})}$ e R_n e $R_{(n+i_{rot})}$. Para avaliar a resposta desse método foram criadas 02 (duas) calibrações distintas, derivadas das calibrações com incremento de rotação de 250 RPM e de posição da borboleta de 5% (Calibração 5x250). A diferença entre elas está no incremento da posição da borboleta (i_{carga}) e da rotação (i_{rot}) utilizados. A Tabela V.7 apresenta essas diferenças e a respectiva identificação adotada durante os testes.

Tabela V.7 – Características individuais das calibrações testadas.

$i_{carga} [\%]$	$i_{rot} [RPM]$	Identificação	Nº de Pontos
5	250	5x250	567
10	500	10x500	154
20	1000	20x1000	48

O objetivo desse ensaio é avaliar o comportamento dos sistemas em teste e do método de interpolação com a aplicação do mesmo mapa de referência com número reduzido de pontos em relação aos testes apresentados no item 5.4.1.1. Essa redução (Tabela V.7) pode influir significativamente no tempo total de desenvolvimento de um motor em bancada dinamométrica, bem como os custos diretos e indiretos associados. Foram realizados ensaios em bancada dinamométrica utilizando o SGEM implementado e a MoTeC M4, sendo cada um realizado com as calibrações descritas na Tabela V.7 que, devido ao elevado número de pontos, são apresentadas em Tabelas e Gráficos no Anexo B.

5.4.2.1 Resultados obtidos com a calibração 10x500

O primeiro mapa de referência testado foi definido por um incremento de 500 RPM na rotação e de 10% na posição da borboleta (10x500). As características do motor utilizado, bem como a configurações iniciais dos sistemas de gerenciamento eletrônico e as mudanças físicas realizadas no motor estão apresentadas no item 5.4.1. A Figura 5.16 apresenta os valores de avanço de ignição e de tempo base de injeção, obtidos durante o ensaio com o mapa de referência 10x500 para ambos os sistemas. Apresenta ainda os pontos de referência definidos no ajuste inicial para as mesmas variáveis.

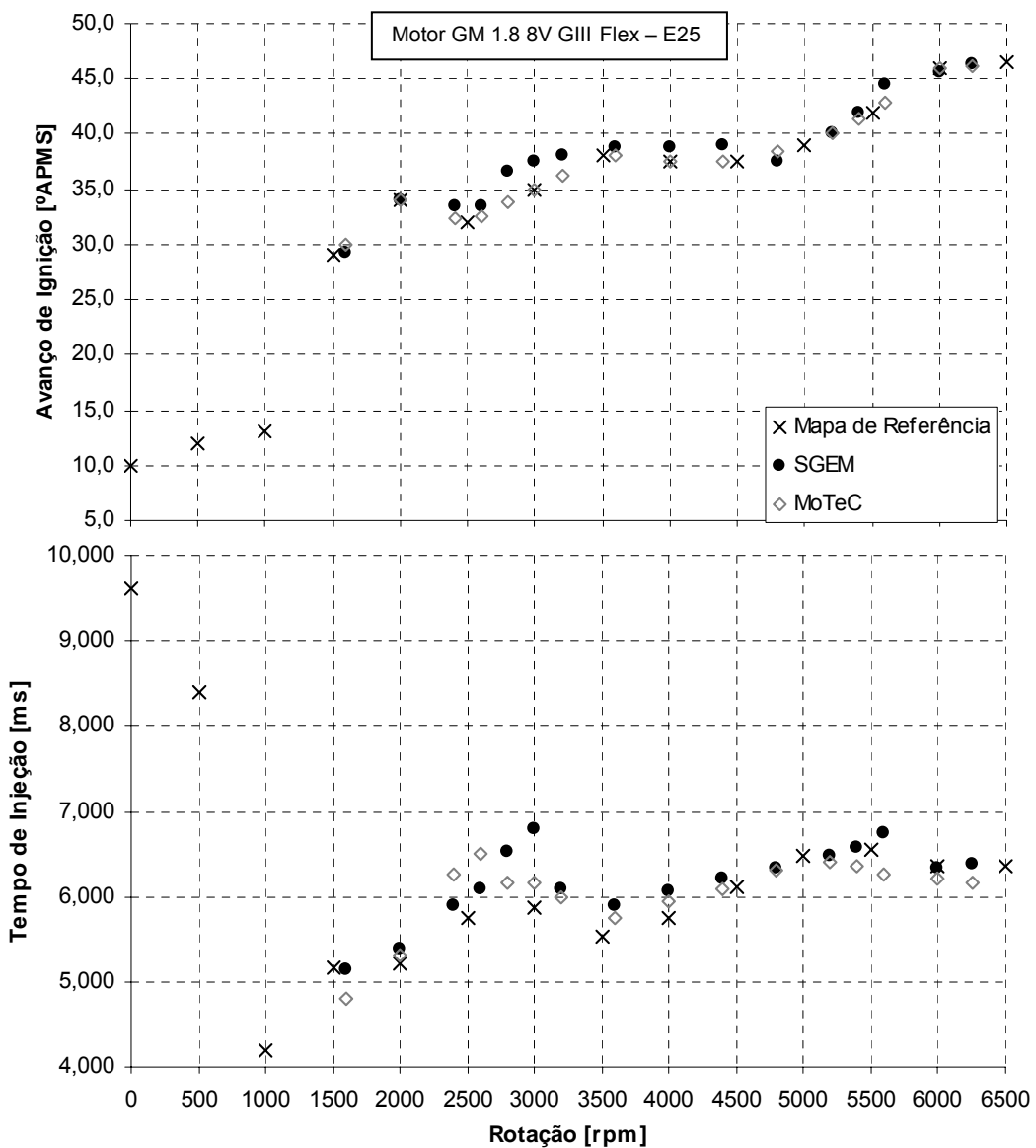


Figura 5.16 – Curva de avanço e tempo de Injeção a plena carga. Calibração 10x500.

A Figura 5.16 mostra uma discrepância entre o valor definido no mapa de referência e os aplicados ao motor. A calibração 10x500, aplicada inicialmente em ambos os sistemas de gerenciamento, necessitou da realização de algumas correções de tempo base de injeção, avanço e na tabela de referência do controlador de mistura ($f_{0/1}=0$). Outro fator que pode ter influenciado nessa discrepância é o valor lido na tela dos softwares de ajuste utilizados. Estes são apresentados sob a forma de média, fazendo com que as oscilações do motor alterem o valor apresentado. Como essa análise não seria conclusiva, adotou-se como critério de avaliação da interpolação as curvas características do motor em teste, obtidas com ambos os sistemas partindo do mesmo mapa de referência inicial. A Figura 5.17 apresenta os gráficos comparativos de Torque Corrigido e Potência Corrigida (NBR 1585), obtidos com a MoTeC (M4) e com o SGEM implementado, ambos na condição de calibração 10x500.

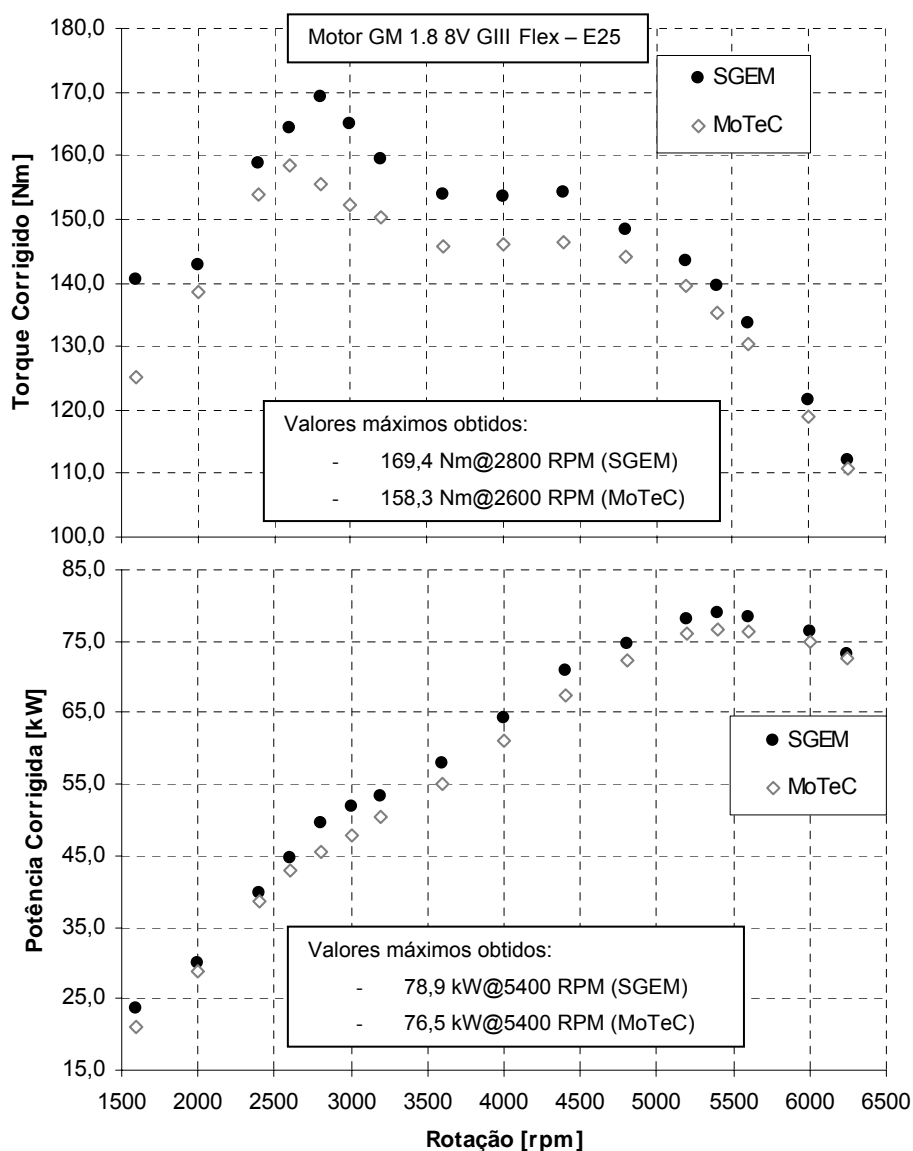


Figura 5.17 – Curvas de Torque e Potência Corrigidos (NBR 1585). Calibração 10x500.

A Figura 5.17 apresenta um aumento do Torque corrigido, obtido com SGEM implementado, ao longo da faixa de rotação ($\approx 11,0\%$ a 1600RPM até $\approx 2,0\%$ a 6000 RPM). Destaca-se o aumento de $4,2\%$ a 2400 RPM em relação ao Torque Máximo obtido com a MoTeC, e o deslocamento do ponto desse ponto para 2600 RPM com o SGEM (aumento de $\approx 8,0\%$). Como a 6250 RPM o aumento foi de $\approx 1,0\%$ e a incerteza combinada da sala dinamométrica utilizada é $\pm 1,0\%$, pode-se associar essa variação à incerteza do sistema de medição, apesar da tendência ao aumento ao longo de toda a curva de torque. O aumento na Potência, reflexo do aumento de Torque, é de $\approx 3,0\%$ a 5400 RPM, utilizando o SGEM implementado. A adoção da calibração 10x500 permitiu aumentar os valores de Torque e Potência obtidos com este sistema, sendo que esse aumento pode estar associado ao ângulo de injeção e ao ajuste utilizado neste sistema.

A Figura 5.18 apresenta as curvas de temperatura do catalisador (Curva A), de consumo específico de combustível (SFC) (Curva B) e a variação do fator Lambda (Curva C) medidas em função da rotação do motor na condição de plena carga e com a calibração 10x500. Observa-se que, em comparação à calibração obtida 5x250 (Figura 5.11), ocorre uma inversão dos valores de Lambda, sendo que na calibração 10x500 o SGEM trabalha mais rico na maioria dos pontos medidos. Esse enriquecimento é causado pelo reajuste dos pontos de referência, visando preservar o limite de temperatura do catalisador (Curva A). Esse fato pode ser visto, por exemplo, no enriquecimento a 3000 RPM para manutenção da temperatura a 3200 RPM. Esses reajustes provocaram um aumento do consumo específico de combustível (Curva B) reduzindo o ganho obtido com a calibração 5x250. Porém, devido aos ganhos de Torque e Potência obtidos, os valores que descrevem a curva de consumo específico de combustível ainda são menores do que os obtidos com a MoTeC M4. Os ajustes realizados para adequação da calibração 10x500 em cada sistema de gerenciamento testado apresentaram grandes variações nos parâmetros medidos durante o ensaio dinamométrico.

Os resultados mostram que o método de interpolação descrito, da forma como foi configurado, apresenta uma boa aproximação aos valores de referência, apesar da descontinuidade nos parâmetros interpolados apresentada no mapa. Pode-se afirmar que mesmo com a redução dos pontos dos mapas de referência, o SGEM implementado apresentou um desempenho satisfatório, apesar da descontinuidade em 3000 RPM que pode estar associada a um erro durante o ajuste do SGEM com motor no dinamômetro.

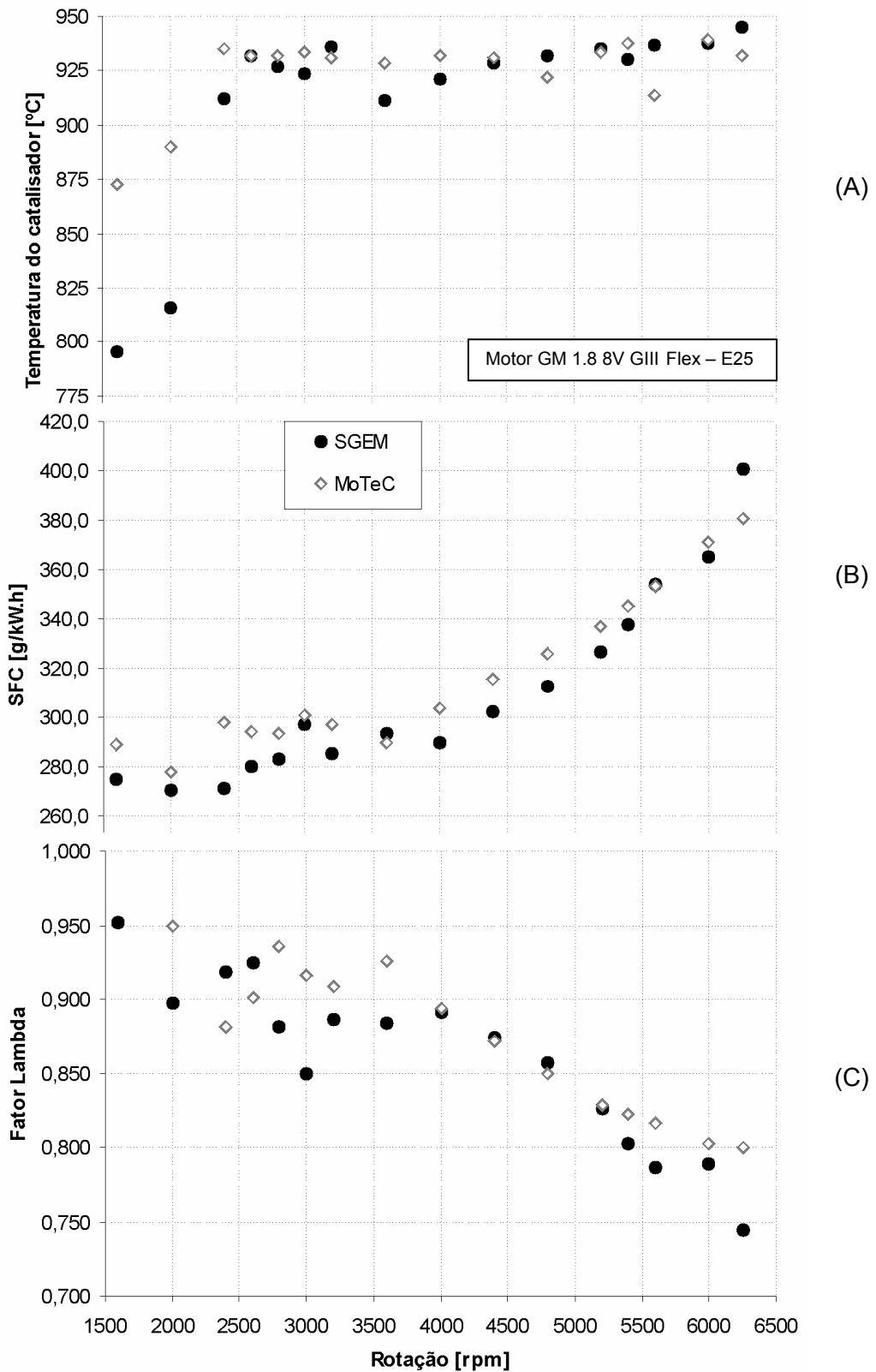


Figura 5.18 – (A) Temperatura do catalisador, (B) Consumo Específico de Combustível e (C) Fator Lambda em função da rotação a plena carga. Calibração 10x500.

5.4.2.2 Resultados com a Calibração 20x1000

Com o objetivo de levar os dois sistemas de gerenciamento eletrônico a uma condição de menor referência para operação foram realizados testes com os mapas de referência definidos por um incremento de 1000 RPM na rotação e de 20% na posição da borboleta (20x1000). Os testes foram realizados seguindo os mesmos critérios apresentados para a calibração 10x500, corrigindo somente as configurações iniciais dos sistemas de gerenciamento eletrônico. A Figura 5.19 apresenta os valores de avanço de ignição e de tempo base de injeção, obtidos durante o ensaio com a calibração 20x1000 para ambos os sistemas, além dos pontos descritos no mapa inicial de referência. Apesar da diferença entre os valores pontuais, as curvas apresentam a mesma tendência dos pontos de referência.

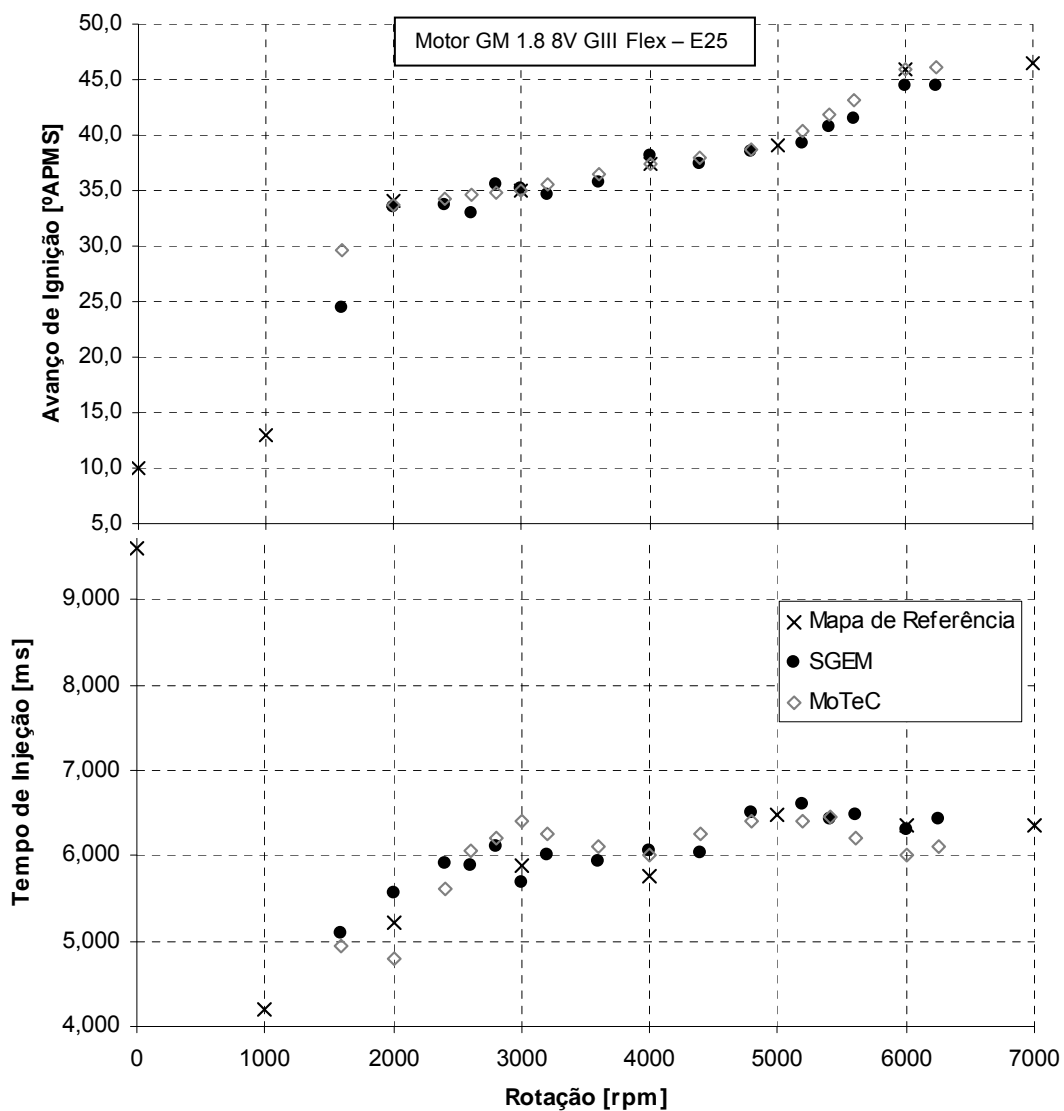


Figura 5.19 – Curva de avanço e tempo de injeção a plena carga. Calibração 20x1000.

A diferença pontual está associada à necessidade de reajustes nos valores de iniciais de referência visando corrigir principalmente os valores de temperatura do catalisador. A tabela de referência do controlador de mistura ($f_{0/1}=0$) também foi modificada, sendo que, para a calibração 20x1000 os valores de início de $f_{0/1}=0$ são encontrados em maior número percentual e antecipados para condições menores de rotação e carga.

Após as devidas correções, foram levantadas as curvas características apresentadas na Figura 5.20, sendo mostrados os gráficos comparativos de Torque Corrigido e Potência Corrigida (NBR 1585), obtidos com a MoTeC (M4) e com o SGEM implementado, ambos na condição de calibração 20x1000.

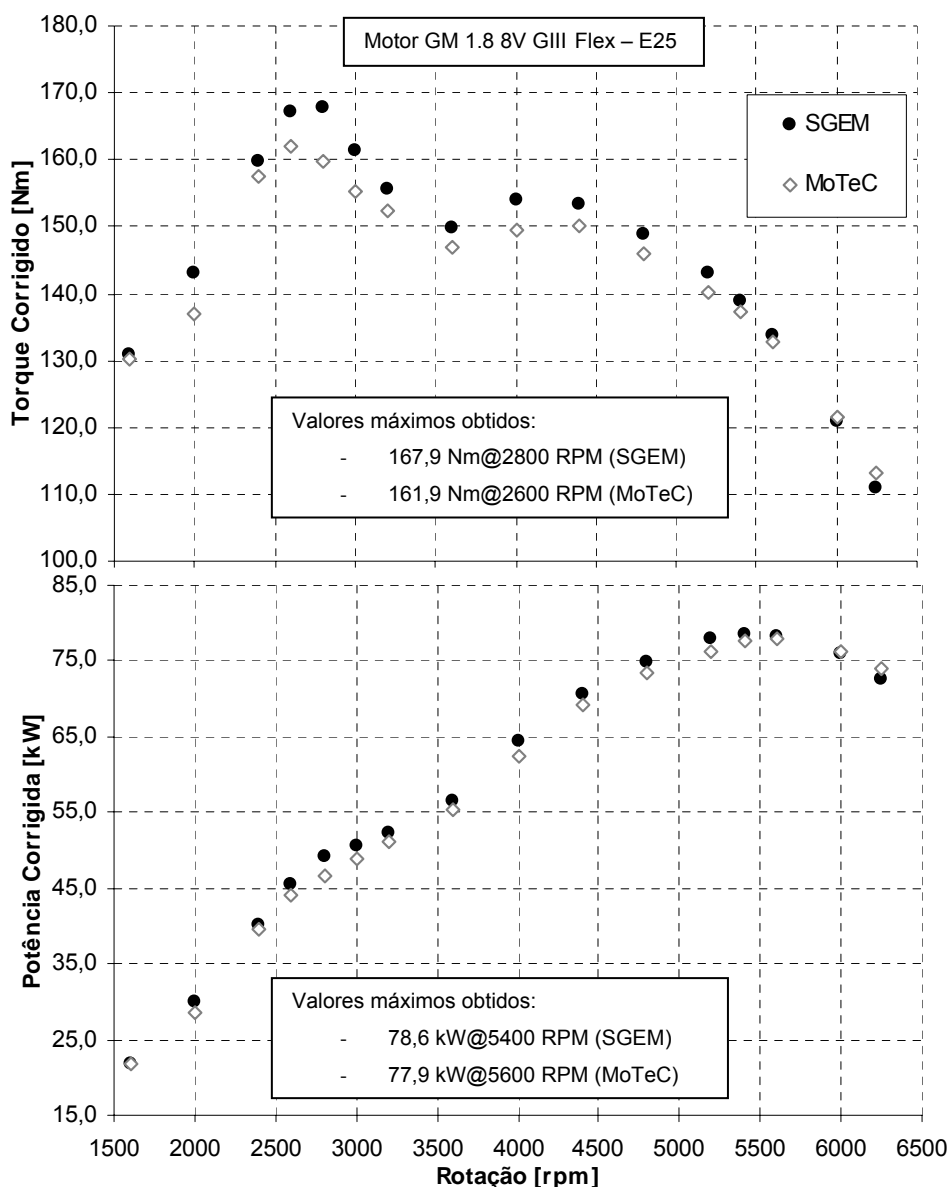


Figura 5.20 – Curvas de Torque e Potência Corrigidos (NBR 1585). Calibração 20x1000.

A Figura 5.20 apresenta um aumento do Torque corrigido, obtido com SGEM implementado, ao longo da faixa de rotação ($\approx 4,0\%$ a 2000 RPM até $\approx 2,0\%$ a 5200 RPM). Destaca-se o aumento de $1,4\%$ a 2400 RPM em relação ao Torque Máximo obtido com a MoTeC, e o deslocamento do ponto desse ponto para 2600 RPM com o SGEM (aumento de $\approx 5,0\%$). O aumento obtido na região de Potência máxima foi de $\approx 1,0\%$ a 5400 RPM e de $0,5\%$ a 5600 RPM, sendo o ponto de máxima deslocando com SGEM implementado. Ocorre a partir de 5600 RPM uma inversão, com redução de até $1,5\%$ no valor de potência máxima. Essas oscilações podem estar associadas à incerteza combinada da sala dinamométrica utilizada.

A Figura 5.21 apresenta as curvas de temperatura do catalisador (A), de consumo específico de combustível (B) e a variação do fator Lambda (C) na condição de plena carga com a calibração 20x1000. A partir da sua análise, percebe-se que o limite de temperatura de 950°C não foi ultrapassado, apesar das oscilações apresentadas (Curva A). Essas variações estão associadas às variações de Lambda (Curva C) causadas pelo reajuste dos pontos de referência, visando preservar o limite de temperatura do catalisador. Como o incremento da rotação é de 1000 RPM no mapa de referência, os valores utilizados proporcionam um fator Lambda que depende do rendimento volumétrico do motor ao longo da faixa delimitada entre dois pontos de referência consecutivos. Apesar das curvas de torque e potência apresentarem um comportamento satisfatório, o consumo específico de combustível apresenta oscilações provocadas pela variação de Lambda ao longo da faixa de rotação. A Curva C mostra ainda a abertura antecipada da malha de controle de mistura (2000 RPM) em relação à calibração 10x500 que ocorreu a 4000 RPM nas mesmas condições de posição de borboleta. Com o SGEM implementado, os valores de mistura chegam a atingir até 15% de enriquecimento (5400 RPM), sendo que, a partir de 5600 RPM passam a apresentar a mesma encontrada nos valores de Lambda obtidos com a MoTeC M4. Essas oscilações reduzem a temperatura do catalisador (Curva A) e provocam uma inversão no consumo específico de combustível, tornando-o maior na faixa de 5000 a 5400 RPM (Curva B).

Os resultados apresentados na Figura 5.21 mostram descontinuidades em ambos os sistemas, com destaque para as rotações de 2000 e 6250 RPM, onde o SGEM apresenta picos de mistura rica, associados a erros de ajuste durante os testes. Apesar dessas descontinuidade não refletir negativamente nas curvas de Torque e Potência Corrigidas do motor, apresentam grande influência no consumo específico de combustível, chegando a promover inversões em rotações elevadas em relação aos valores obtidos com o sistema MoTeC M4.

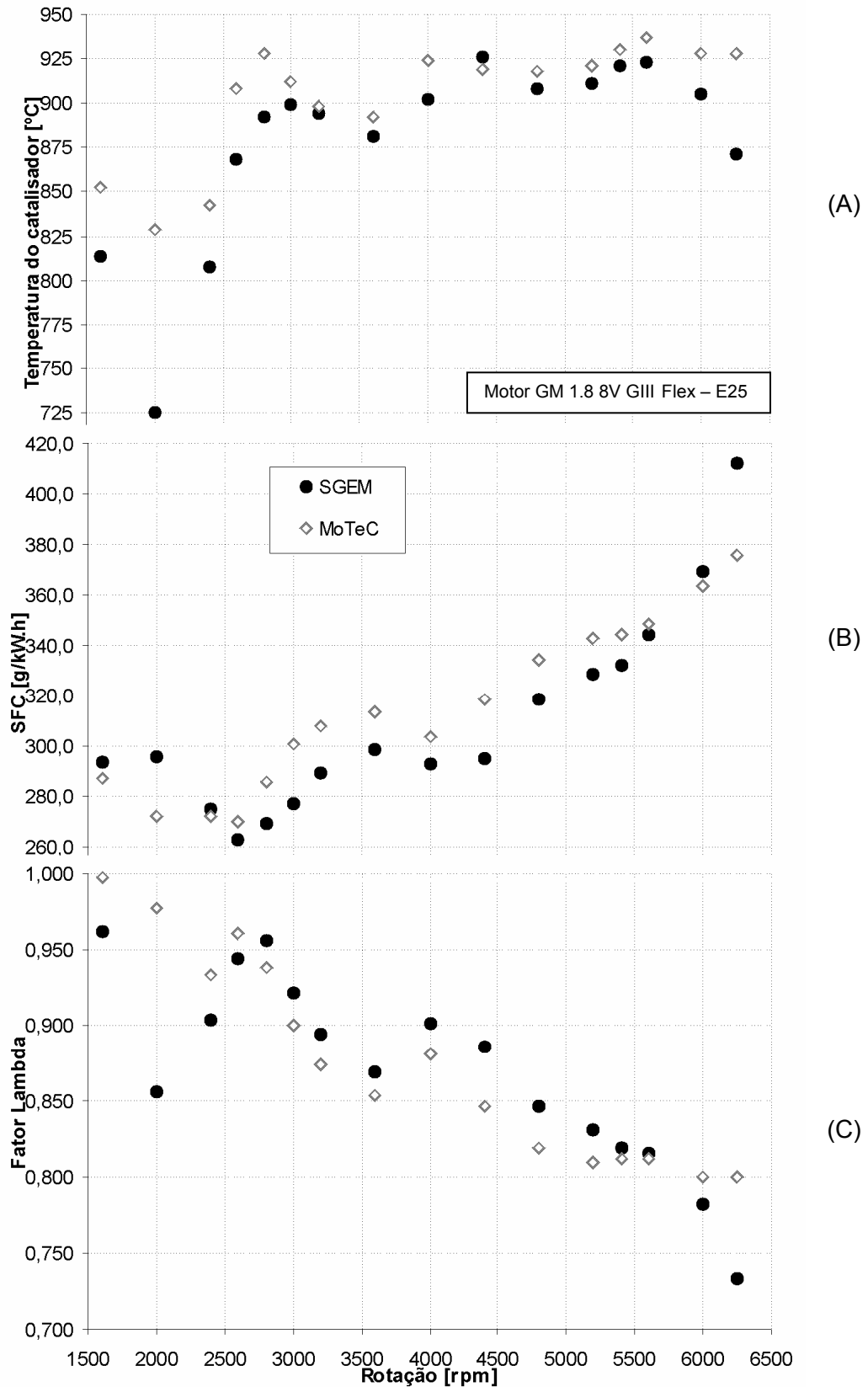


Figura 5.21 – (A) Temperatura do catalisador, (B) Consumo Específico de Combustível e (C) Fator Lambda a plena carga. Calibração 20x1000.

5.5 Considerações Finais

Os resultados apresentados anteriormente mostram que o sistema de gerenciamento eletrônico desenvolvido apresenta um comportamento similar ao de um sistema comercial, com a vantagem de proporcionar condições de acesso à elaboração de novas estratégias de controle, permitindo refinar ainda mais a pesquisa em motores de combustão interna. Os ganhos apresentados nas curvas características dos motores testados representam à capacidade do SGEM implementado em realizar o gerenciamento eletrônico de motores de combustão interna.

Como análise subjetiva do SGEM implementado, destaca-se a robustez do sistema, no que diz respeito ao módulo de controle eletrônico (ECU), e a facilidade de operação da Interface Homem-Máquina desenvolvida. Apesar da bateria reduzida de testes, no que diz respeito à confiabilidade de um sistema eletrônico, não foram registradas ocorrências de problemas associados aos sistemas de controle desenvolvidos (*software+hardware*) ou até mesmo falhas de comunicação, que pudessem comprometer o funcionamento e a vida útil dos motores testados.

Ainda que seja uma análise preliminar, os resultados obtidos até o presente momento são de grande importância para a o desenvolvimento tecnológico do Brasil e, principalmente para as pessoas envolvidas, direta ou indiretamente, nesse desenvolvimento. Os resultados aqui apresentados possibilitam a abertura de novas frentes de pesquisa, indicam a necessidade de inclusão de novas competências, possibilitando a proposição e viabilizando a realização de novos trabalhos de pesquisa associados à Engenharia da Mobilidade.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O sistema desenvolvido é capaz de controlar os principais parâmetros de funcionamento do motor, identificando sua condição de operação através dos sensores e comandando os atuadores de acordo com os mapas e valores de referência, inseridos através da Interface Homem-Máquina. O protocolo de comunicação entre ECU e IHM garante a integridade dos dados enviados e recebidos, bem como a visualização das variáveis de funcionamento do motor. Sua arquitetura possibilita a implementação de novas estratégias de controle e a parametrização de motores de ignição por centelha, através do acesso às matrizes de ajuste e ao *software* de controle.

O sistema é capaz de realizar o controle de mistura ar/combustível e de marcha lenta em malha fechada, com a possibilidade de ajuste dos controladores implementados para diferentes tipos de motor. Além disso, possibilita a aquisição de todos os dados monitorados durante o funcionamento do motor, necessários para obtenção dos modelos e do livre acesso ao *software* para elaboração de novas estratégias de controle.

A metodologia descreve os pontos de relevância do sistema de gerenciamento eletrônico desenvolvido e apresenta as características principais dos SGEM, sendo sugerida como uma referência para adequação do sistema implementado a outras aplicações veiculares e aos próximos projetos.

Apesar da grande possibilidade de aplicação do sistema desenvolvido, existe ainda uma limitação física do *hardware* quanto ao número máximo de sensores e atuadores que podem ser associados ao SGEM implementado. Porém, a disponibilidade do protocolo de comunicação *CAN* nesse sistema permite, através de novos trabalhos, a expansão do SGEM em módulos independentes para executar funções dedicadas como, por exemplo, a estratégia de detecção do fenômeno da detonação. A exploração do potencial do protocolo *CAN* é uma das sugestões para continuidade do trabalho.

O sistema de ignição pode ser conectado a motores que utilizam bobinas de ignição convencionais, estáticas ou individuais. Contudo, sua aplicação é limitada pelo número de bobinas independentes, pela corrente máxima de alimentação das bobinas e por velas de ignição do tipo resistivas, independente do grau térmico utilizado. Outra limitação é a realização do controle de ignição em malha aberta, sendo possível apenas à aplicação de correções em função da temperatura do ar admitido e do motor.

Já o sistema de formação e controle da mistura ar/combustível pode ser conectado a eletroinjetores de alta e baixa impedância, sendo sua aplicação limitada pelo número de componentes independentes e pela corrente máxima admissível no circuito de alimentação desses componentes. Possibilita também correções para partidas a frio e aquecimento do motor, aceleração rápida e corte de combustível, além da mistura em malha fechada. O controlador de injeção de combustível é capaz de perceber perturbações causadas pela variação da vazão mássica de ar no coletor, absorvendo as influências do sistema de controle de marcha lenta associadas, por exemplo, a inserção de cargas externas.

Os testes realizados em bancada dinamométrica permitem concluir que a correta utilização do SGEM implementado, através da otimização dos mapas de referência, pode superar os valores de Torque e Potência corrigidos obtidos por sistemas normais de produção e sistemas comerciais. Esses testes mostram também que o sistema de gerenciamento eletrônico implementado é robusto e pouco susceptível às condições impostas por esse tipo de ensaio.

Os controladores desenvolvidos são capazes de controlar a rotação do motor em torno da condição de marcha lenta mantendo, simultaneamente, a mistura ar/combustível na condição estequiométrica. Essa capacidade se estende ainda à manutenção do motor em funcionamento, mesmo com a aplicação de carga no eixo do motor.

O método de interpolação implementado, da forma como foi configurado, apresenta uma boa aproximação aos valores de referência. Mesmo com a redução do número de pontos da calibração, o SGEM apresenta um desempenho satisfatório, nas calibrações de 10x500 e 20x1000, a plena carga. Porém, os testes apresentados neste trabalho mostram a necessidade de ensaios em cargas parciais com a adoção de novas configurações do método de interpolação descrito.

O trabalho desenvolvido é uma ferramenta que possibilita o desenvolvimento de pesquisas associadas à Engenharia da Mobilidade, seja através de novas tecnologias e conceitos aplicados aos motores de combustão interna, ou no desenvolvimento de novos modelos e estratégias de controle.

Sugere-se um estudo aprofundado de compatibilidade eletromagnética no SGEM desenvolvido, visando melhorar, a cada dia, essa ferramenta de pesquisa aplicada aos motores de combustão interna.

Outra sugestão para continuidade de estudos é o desenvolvimento de um módulo de controle da posição da borboleta, através de acionamento por motor elétrico (*drive-by-wire*), capaz de se comunicar com o SGEM via protocolo CAN. Esse trabalho visa continuar a pesquisa associada à auto-calibração do sistema (*self tuning*), cujo objetivo principal é a redução das horas associadas aos ensaios dinamométricos.

CAPÍTULO 7

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5484: Motores alternativos de combustão interna de ignição por compressão (Diesel) ou ignição por centelha (Otto) de velocidade angular variável. Rio de Janeiro, Brasil, 1985, 8p.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISO 1585: Veículos rodoviários – Código de ensaio de motores – Potência líquida efetiva. Rio de Janeiro, Brasil, 1996, 26p.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5725: Guia para Expressão da Incerteza de Medição. 3ª Edição, Rio de Janeiro, Brasil, 2003.

ADLER, U. Automotive Electric/Electronic Systems. Robert Bosch GmbH. Postfach, 50 D-7000 Stuttgart 1. Automotive Equipment Product Group. 1988.

ADLER, U.; BAUER, H.; RÖDER, J. Automotive Handbook. Robert Bosch GmbH. Postfach, 30 02 20, D-70442 Stuttgart. 3rd Edition. Automotive Equipment Business Sector, Department for Technical Information (KH/VDT). 1993.

AMORIM, R. J., BAETA, J. G. C., VALLE, R. M., BARROS, J. E. M., CARVALHO, R. D. B. Comparison of performance curves of the gas fuelled 1.3 8V engine with compression ratio of 11:1 and 15:1. In: FUELS & LUBRICANTS MEETING AND EXPOSITION 2005, 11 a 13 de maio de 2005, Rio de Janeiro, R.J.. *SAE Technical Paper Series*. Paper nº 2005-01-2188. 6p.

AMORIM, R. J., BAETA, J. G. C., VALLE, R. M., BARROS, J. E. M., CARVALHO, R. B. Experimental Analysis of Flexible Fuel Systems in Spark Ignition Engine. In: FUELS & LUBRICANTS MEETING AND EXPOSITION 2005, 11 a 13 de maio de 2005, Rio de Janeiro, R.J. *SAE Technical Paper Series*. Paper nº 2005-01-2183. 7p.

ÅSTRÖM, K. J., HÄGGLUND, T. PID controllers - theory, design and tuning. 2nd edition, Instrument Society of America, International Society for Measurement and Control, Research Triangle Park Inc, NC, 1995.

- ÅSTRÖM, K. J., HÄGGLUND, T. PID controllers. Lund Institute of Technology, Lund, Sweden, CRC Press, Inc, 1996, 11p.
- AUSLANDER, D. M., RIDGELY, J. R., JONES, J. C. Real-Time Software for Implementation of Feedback Control. University of California, Berkley, CA. CRC Press, Inc, 1995, 21p.
- BAETA, J. G. C. Metodologia experimental para maximização do desempenho de um motor multicomcombustível turboalimentado sem prejuízo à eficiência energética global. Tese de Doutorado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica - UFMG. Belo Horizonte - MG. 2006, 202p.
- BAETA, J. G. C., VALLE, R. M., CARVALHO, R. D. B., BARROS, J. E. M. Mapping procedure applied to general engine management system for spark plug engines. In: CONGRESSO SAE BRASIL 2004, novembro de 2004, São Paulo, SP. *SAE Technical Paper Series*. Paper nº 2004-01-3435. 2004, 10p.
- BAETA, J. G. C., VALLE, R. M., BARROS, J. E. M. Multifuel Spark Ignition Engine – Optimization Performance Analysis. In: CONGRESSO SAE BRASIL 2005, novembro de 2005, São Paulo, SP. *SAE Technical Paper Series*. Paper nº 2005-01-4145. 2005, 11p.
- BAPTISTA, B. S. Desenvolvimento de um sistema de ignição por lanças-chamas para motor do ciclo otto. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica - UFMG. Belo Horizonte - MG. 2007, 146p.
- BARROS, J. E. M. Estudo de motores de combustão interna aplicando análise orientada a objetos. Tese de Doutorado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica - UFMG. Belo Horizonte - MG. 2003, 148p.
- BARROS, J.E.M.; VALLE, R.M.; RODRIGUES, V.F. Static and Quasi-static Test Procedures of Piston Engines. In: 9º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciências Térmicas, Proceedings of the ENCIT 2002, Caxambú - MG, Brazil - Paper SAE 2002-306, 2002, 10p.
- BAUER, H. ME-Motronic engine management Robert Bosch GmbH. Postfach, 30 02 20 D-70442 Stuttgart. Automotive Equipment Business Sector. 1999.
- BRAGA, G. T. Desenvolvimento e implementação de um sistema de identificação de detonação em motores de combustão interna de ignição por centelha. Monografia. Engenharia de Controle e Automação da UFMG. Belo Horizonte - MG. 2004, 83p.
- BRAGA, G. T. Uma Contribuição ao Controle de Motores de Combustão Interna de Ignição por Centelha na Condição de Marcha Lenta. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica - UFMG. Belo Horizonte - MG. 2007, 130p.

- CARVALHO, T. O. C. Definição da arquitetura de central eletrônica para controle da ignição e da injeção de combustível em motores de combustão interna. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica - UFMG. Belo Horizonte - MG. 2005, 148p.
- CETESB. PROCONVE. Disponível em <http://www.cetesb.sp.gov.br>. Acessado em Junho/2006.
- CHANG, C. F., FEKETE, N. P., AMSTUTZ, A. POWELL, J. D. Air-Fuel ratio control in spark ignition engines using estimation theory. In: *IEEE Control Systems Technology*, Vol. 3, March 1995.
- COOK, J. A., GRIZZLE, J. W., SUN, J. Engine Control. Ford Motor Company Research Laboratory, Control Systems Department, Dearborn, MI. CRC Press, Inc, 1998, 14p.
- DENTON, T. Automobile electrical and electronic systems. 3rd Edition. McGraw-Hill Publishing Co., New York, 2000.
- DOEBELIN, E. O. Measurement Systems: application and design. 5th Edition. McGraw-Hill Publishing Co., New York, 2004.
- DORF, R. C., BISHOP, R. H. Sistemas de controle modernos. Tradução: Bernardo Severo da Silva Filho, LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., Rio de Janeiro, RJ, 8^a Edição, 1998.
- FERGUSON, Colin R. Internal combustion engines – Applied Thermosciences. New York John Wiley & Sons, Inc., 1986, 546p.
- GERHARDT, J., HÖNNINGER, H.; BISCHOF, H. A New Approach to Functional and Software Structure for Engine Management Systems – BOSCH ME7. SAE 980801, 1998.
- GIACOSA, D. Motores Endotérmicos, capítulos: II, III, IV, VII, X, XVI. Editorial Dossat S.A. Madrid, 1979. 3^a edição.
- GOMES, J. R. C. Projeto e adaptação de um sistema de ignição por lança-chamas a um motor térmico do ciclo Otto. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica - UFMG. Belo Horizonte - MG. 2005, 158p.
- GOMES, J. R. C., VALLE, R. M., PUJATTI, F. J. P. Torch Ignition system analysis in an spark ignition engine. In: CONGRESSO SAE BRASIL 2005, novembro de 2005, São Paulo, SP. *SAE Technical Paper Series*. Paper nº 2005-01-4149. 2005, 8p.
- GONÇALVES JR., Armando Albertazzi. Metrologia: parte 1. Santa Catarina: LABMETRO. 2001. 117p.

GRIZZLE, J. W., COOK, J. A., MILAM, W. P. Improved cylinder air charge estimation for transient air fuel ratio control, in Proc. Am. Control Conf., Baltimore, MD, June 1994, 1568-1573, 1994.

HANRIOT, S. M. Estudo dos fenômenos pulsantes do escoamento de ar nos condutores de admissão em motores de combustão interna. Tese de Doutorado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica - UFMG. Belo Horizonte - MG. 2001, 177p.

HEYWOOD, J. B. Internal Combustion Engine Fundamentals, 1 ed. New York McGraw-Hill, Inc., 1995. 930p.

INMETRO. Vocabulário Internacional de Termos Fundamentais e Gerais de Metrologia - VIM. Duque de Caxias: Portaria INMETRO 029, 1995. 52p.

IVES, A. P. The Electronic Engine – The Mechanical Engineer's Dream, SP1356, 1997, páginas 159 a 170.

JANG, J. R., SUN, C., MIZUTANI, E. Neuro-Fuzzy and Soft Computing - A Computational Approach to Learning and Machine Intelligence. ISBN: 0132610663. Prentice Hall, 1997.

JENNISCHE, M. Closed-loop control of start of combustion in a homogeneous charge compression Ignition engine. In: INTERNATIONAL CONGRESS AND EXPOSITION, 1 a 5 de março de 1997, Detroit, Michigan. SAE Technical Paper Series. Paper nº 970387. 1997, 12p.

KAMPELMUHLER, T. F.; PAULITSCH, R.; GSCHWEITI, K. Automatic ECU Calibration - An Alternative to Conventional Methods. In: INTERNATIONAL CONGRESS AND EXPOSITION, 1 a 5 de março de 1993, Detroit, Michigan. SAE Technical Paper Series. Paper nº 930395. 1993, 12p.

KONZELMANN, U., HECTH, H. Breakthrough in Reverse Flow Detection – A new mass air flow meter using micro silicon technology. SAE 950433, 1995.

KRAUSE, W. SPIES, K. H. Dynamic control of the coolant temperature for a reduction of fuel consumption and hydrocarbon emission. SAE 960271, 1996.

LENZ, U., SCHROEDER, D., Transient Air-fuel control using artificial intelligence. SAE 970618, 1997.

LEONE, D. M., DODGE, L. G., SHOUSE, K. R., GROGAN, J., Model-Based control and Cylinder-Event-Based logic for an Ultra-Low Emissions Vehicle. SAE 970531, 1997.

LIUBAKKA, M. K., RHODE, D. S., WINKELMAN, J. R. Adaptive Automotive Speed Control. IEEE Transactions on Automatic Control; Volume 38, Number 7, Pages 1011 – 1020; July 1993.

- MARCIC, M. 2000. A new method for measuring fuel-injection rate. Flow Measuring and Instrumentation Congress. University of Maribor, Slovenia. 7p.
- MENDES, M. A. S., BRAGA, G. T., PUJATTI, F. J. P., CARVALHO, T. C. O., VALLE, R. M. Desenvolvimento de uma central eletrônica para motores de combustão interna. In: Seminário de Tecnologia de Motores, Combustíveis e Emissões 2004, dezembro de 2004, Belo Horizonte, MG. 8p.
- MENDES, M. A. S., BRAGA, G. T., PUJATTI, F. J. P., CARVALHO, T. C. O., VALLE, R. M. Implementation and tests of a variable control system of spark time ignition and injection time, using Digital Signal Processor - DSP. In: 18th International Congress of Mechanical Engineering, novembro de 2005, Ouro Preto, MG. 7p.
- MIANZOT, L., PENG, H., HASKARAT, I. Transient Air-Fuel ratio H_{∞} preview control of a drive-by-wire internal combustion engine. Proceedings of the American Control Conference. Arlington, VA. June, 2001.
- MoTeC M4/M48 & M8 User's Manual, Junho 2003. Disponível em http://www.motec.com/m4_tech.htm. Acessado em Junho/2004.
- MoTeC. Motec M4 Pro specifications. Disponível em http://www.motec.com/m4_tech.htm. Acessado em Junho/2004.
- OBERT, E. F. Motores de combustão interna. Porto Alegre. Ed. Globo. 1971, 618p.
- OGATA, K. Engenharia do controle moderno, 2^a ed. São Paulo: Prentice Hall do Brasil, 1993.
- OZKUL, T. Data acquisition and process control using personal computers. Library of Congress Cataloging-in-Publication Data. New York, 1996.
- PASSARINI, L. C. Projeto e análise de válvulas eletromagnéticas injetoras de combustível: uma nova proposta. Tese de Doutorado – Escola de Engenharia de São Carlos - USP. São Carlos. 388p. 1993.
- PEREIRA, M. L. Análise de Gases: Apostila técnica. Centro de Desenvolvimento de Tecnologia Mecânica – CDTM. Belo Horizonte/MG. Treinamento Técnico Automotivo. 2001, 18p.
- PINTO, M. A. S. Estudo e implementação de um sistema para testes de estratégias de injeção de combustíveis em motores de combustão interna com ignição por centelha. Belo Horizonte: Dissertação de Mestrado em Tecnologia. CEFET-MG, 2001. 155p.
- PLINT, M.; MARTY, A. Engine Testing Theory and Practice, 2^a edition, Warrendale, USA: SAE International, 1999, 363p.

- PUJATTI, F. J. P., MENDES, M. A. S., VALLE, R. M., CARVALHO, T. C. O. Implementation and tests of a variable control system of spark time ignition, using Digital Signal Processor - DSP. In: CONGRESSO SAE BRASIL 2004, novembro de 2004, São Paulo, SP. *SAE Technical Paper Series*. Paper nº 2004-01-3441. 2004, 6p.
- RIBBENS, W. B., *Understanding Automotive Electronics*, Fifth Edition, Butterworth-Heinemann Publishing Co., Woburn, 1998.
- SAUER, R. Hot wire mass meter. *SAE Technical Paper Series*. Paper nº 800468, 1980.
- SAUER, R. Hot-film mass air meter – a low-cost approach to intake air measurement. *SAE Technical Paper Series*. Paper nº 880560, 1988.
- SCHIRM, E. Estudo experimental do desempenho do motor com a variação do ângulo de abertura da válvula de admissão. Belo Horizonte: Dissertação de Mestrado, Engenharia Mecânica, UFMG, 2003.
- SCHMITZ, G.; OLIGSCHLAGER, U.; EIFLER, G.; LECHNER, H. Automated System for Optimized Calibration of Engine Management Systems. In: AUTOMOTIVE ENGINEERING CONGRESS, 28 de fevereiro a 3 de março de 1994, Detroit, Michigan. *SAE Technical Paper Series*. Paper nº 940151. 6p.
- SEBORG, D. E.; EDGAR, T. F.; MELLICHAMP, D. A. *Process Dynamics and Control*. John Wiley & Sons Inc, 1989.
- TAYLOR, C. F. *Análise de motores de combustão interna*. São Paulo: Editora Edgard Blücher, 1988. Volumes 1 e 2.
- TEXAS INSTRUMENTS, TMS320LF/LC240xA DSP Controllers Reference Guide – System and Peripherals. Literature Number: SPRU357C. Revised May 2006.
- VISSER, J. H. SOLTIS, R. E. Automotive Exhaust Gas Sensing Systems. *IEEE Transactions on Instrumentations and Measurement*, VOL. 50, December, 2001. 8p.
- VOLKSWAGEN DO BRASIL LTDA, 1996. “Com exatidão – Linha água: 1987 à 1996”. Manual técnico de reparações. São Bernardo do Campo – SP, 328p.
- VOSSOUNGHI, G. R.; REZAZADEH, S. Development of an Integrated Computer Environment for Optimization of Engine Management System Calibration. In: AUTOMOTIVE ENGINEERING CONGRESS, 8 a 11 de março de 2004, Detroit, Michigan. *SAE Technical Paper Series*. Paper nº 2004-01-1158. 6p.
- WYLEN, G. J. V., SONNTAG, R. E., BORGNAKKE, C. 1998. “Fundamentos da Termodinâmica”, 5ª Edição.

ANEXOS

ANEXO A: Incertezas máximas de medição

A incerteza combinada do ensaio foi determinada por Baeta (2006) segundo metodologia descrita por Gonçalves Jr. (2001) em conformidade com o Guia de Expressão da Incerteza da Medição ABNT NBR 5725 (2003). A Tabela A.1 apresenta as incertezas combinadas das grandezas envolvidas no ensaio dinamométrico.

Tabela A.1 – Incertezas máximas associadas (Baeta, 2006).

<i>Parâmetro de controle:</i>	<i>Valor ajustado:</i>
Rotação	± 30 RPM
Torque Observado	$\pm 0,9$ N.m
Torque Corrigido	$\pm 0,9$ N.m
Potência Observada	$\pm 0,1$ kW
Potência Corrigida	$\pm 0,1$ kW
Fator de correção	$\pm 0,00025$

A Tabela A.2 apresenta as incertezas máximas das grandezas envolvidas no ensaio dinamométrico.

Tabela A.2 – Faixa de medição e incertezas dos sistemas (Baeta, 2006).

<i>Grandeza:</i>	<i>Faixa de medição:</i>	<i>Tipo de sensor:</i>	<i>Origem da Incerteza:</i>	<i>Incerteza %VFE:</i>
Temperatura óleo motor	0 a 150 °C	PT-100	PM 500/PM200	$\pm 0,7\%$
Temperatura ar admissão	0 a 150 °C	PT-100	PM 500/PM200	$\pm 0,7\%$
Temperatura bulbo seco	0 a 150 °C	PT-100	PM 500/PM200	$\pm 0,7\%$
Temperatura bulbo úmido	0 a 150 °C	PT-100	PM 500/PM200	$\pm 0,7\%$
Temperatura catalisador	0 a 1200 °C	Termopar K	PM 500/PM200	$\pm 1,25\%$
Torque Dinamômetro	0 a 600 N.m	Célula de carga	Peso-morto	$\pm 0,3\%$
Rotação Dinamômetro	0 a 10.000 RPM	Indutivo	Fabricante	$\pm 0,13\%$
Pressão óleo motor	0 a 600 kPa	Manômetro	Fabricante	$\pm 0,83\%$
Pressão combustível	0 a 600 kPa	Manômetro	Fabricante	$\pm 0,83\%$
Fator Lambda	0,75 a 1,65	ETAS LA2	Fabricante	$\pm 2,5\%$
Balança de combustível	0 a 5,0 kg	AVL 733S	Fabricante	$\pm 0,5\%$
Pressão Barométrica	800 a 1200 mbar	HBM	Fabricante	$\pm 0,1\%$

Calibração 20x1000 – SGEM Implementado

% IJPU	Rotação [RPM]								
	0	1000	2000	3000	4000	5000	6000	7000	
Borboleta [%]	0	70,0	21,0	17,0	18,0	20,0	21,0	20,0	19,0
	20	90,0	37,0	40,0	38,0	35,0	31,5	29,0	28,0
	40	80,0	35,0	40,5	43,5	42,5	45,5	43,0	37,0
	60	80,0	35,0	41,0	47,0	46,0	51,0	49,5	53,0
	80	80,0	35,0	40,0	47,0	46,5	52,5	50,5	53,0
	100	80,0	35,0	43,5	49,0	48,0	54,0	53,0	53,0

Avanço	Rotação [RPM]								
	0	1000	2000	3000	4000	5000	6000	7000	
Borboleta [%]	0	7,0	10,0	15,0	20,0	24,5	32,0	34,0	35,0
	20	7,0	13,0	28,0	34,0	41,0	42,0	46,0	46,0
	40	5,0	9,0	33,0	38,0	39,0	39,0	45,0	46,0
	60	6,0	9,0	30,0	36,0	38,5	37,5	42,5	44,0
	80	7,0	11,0	30,5	36,0	38,0	37,0	42,0	45,5
	100	10,0	13,0	34,0	35,0	37,5	39,0	46,0	46,5

F 0/1	Rotação [RPM]								
	0	1000	2000	3000	4000	5000	6000	7000	
Borboleta [%]	0	1	1	0	0	0	0	0	0
	20	1	1	0	0	0	0	0	0
	40	1	1	1	0	0	0	0	0
	60	1	1	1	0	0	0	0	0
	80	1	1	1	0	0	0	0	0
	100	1	0	0	0	0	0	0	0

Calibração 20x1000 – MoTeC M4

% IJPU	Rotação [RPM]								
	0	1000	2000	3000	4000	5000	6000	7000	
Borboleta [%]	0	70,0	21,0	17,0	18,0	20,0	21,0	20,0	19,0
	20	90,0	37,0	40,0	38,0	35,0	31,5	29,0	28,0
	40	80,0	35,0	40,5	43,5	42,5	45,5	43,0	37,0
	60	80,0	35,0	41,0	47,0	46,0	51,0	49,5	53,0
	80	80,0	35,0	40,0	47,0	46,5	52,5	50,5	53,0
	100	80,0	35,0	43,5	49,0	48,0	54,0	53,0	53,0

Avanço	Rotação [RPM]								
	0	1000	2000	3000	4000	5000	6000	7000	
Borboleta [%]	0	7,0	10,0	15,0	20,0	24,5	32,0	34,0	35,0
	20	7,0	13,0	28,0	34,0	41,0	42,0	46,0	46,0
	40	5,0	9,0	33,0	38,0	39,0	39,0	45,0	46,0
	60	6,0	9,0	30,0	36,0	38,5	37,5	42,5	44,0
	80	7,0	11,0	30,5	36,0	38,0	37,0	42,0	45,5
	100	10,0	13,0	34,0	35,0	37,5	39,0	46,0	46,5

F 0/1	Rotação [RPM]								
	0	1000	2000	3000	4000	5000	6000	7000	
Borboleta [%]	0	1	1	0	0	0	0	0	0
	20	1	1	0	0	0	0	0	0
	40	1	1	1	0	0	0	0	0
	60	1	1	1	0	0	0	0	0
	80	1	1	1	0	0	0	0	0
	100	1	0	0	0	0	0	0	0