

Universidade Federal de Minas Gerais
Centro de Pesquisa e Desenvolvimento em Engenharia Elétrica
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Uma Contribuição ao Controle de Motores de Combustão Interna de Ignição por Centelha na Condição de Marcha Lenta

Gabriel Teixeira Braga

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

ORIENTADOR: Prof. Marcos Antônio Severo Mendes, Dr.

Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil

Julho - 2007

Agradecimentos

A Deus por me iluminar e me dar forças para superar os obstáculos encontrados ao longo da caminhada.

Ao Professor Marcos Antônio Severo Mendes pela orientação, apoio e amizade que foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho.

Aos colegas e amigos Fabrício, Valdênio, Túlio e Bruno pelo apoio e amizade, pelas contribuições técnicas e pelo suporte ao longo de todo o trabalho.

Aos meus familiares, em especial aos meus pais Olavo e Rosarinha, e meus irmãos Natália e Henrique por todo o amor, amizade, companheirismo, suporte e apoio que foram fundamentais em toda a minha caminhada. À minha namorada Geórgia por todo o apoio, amor e paciência.

Aos Professores e colegas do Laboratório de Eletrônica de Potência pelo apoio e companheirismo, e por todas as contribuições prestadas ao desenvolvimento deste trabalho.

Aos colegas e amigos do CETEC por todo o suporte concedido ao longo dos testes com o sistema desenvolvido.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo suporte financeiro que possibilitou o desenvolvimento deste trabalho.

À Texas Instruments e à Avnet pela doação de ferramentas de desenvolvimento e componentes eletrônicos.

Sumário

Lista de Figuras	i
Lista de Tabelas	iv
Lista de Abreviaturas e Siglas	v
Lista de Símbolos	vii
Resumo	ix
Abstract	x
CAPÍTULO 1	1
Introdução	1
1.1 Motivação.....	1
1.2 Objetivos	3
1.3 Organização do texto.....	3
CAPÍTULO 2	4
Revisão Bibliográfica	4
2.1 Introdução.....	4
2.1.1 Mistura ar/combustível.....	5
2.1.2 Avanço de Ignição.....	6
2.1.3 Emissões.....	9
2.1.3.1 Emissão de CO	10
2.1.3.2 Emissão de HC	11
2.1.3.3 Emissão de NO _x	12
2.1.3.4 Conversores Catalíticos	12
2.1.4 Ações de controle sobre o motor.....	14
2.2 Evolução.....	14
2.3 Controle Eletrônico dos MCI-ICE.....	16
2.3.1 Controle de Injeção	17
2.3.1.1 Estimativa do fator λ	18
2.3.1.2 Injeção de combustível	20
2.3.1.3 Modos de controle	20
2.3.1.4 Partida do motor	21
2.3.1.5 Aquecimento do motor	21
2.3.1.6 Controle em malha aberta	21
2.3.1.7 Controle em malha fechada	23

2.3.1.8 Aceleração rápida	26
2.3.1.9 Desaceleração rápida	27
2.3.2 Controle de Ignição	27
2.3.2.1 Energia da centelha	27
2.3.2.2 Avanço de Ignição	28
2.3.2.3 Identificação de detonação	28
2.3.2.4 Estrutura do controlador	30
2.3.3 Controle de Marcha Lenta	31
2.3.3.1 Estrutura do controlador	31
2.3.3.2 Atuadores de marcha lenta	32
2.3.3.3 Perturbações na rotação	33
2.4 Tendências futuras	34
2.5 Conclusões	35

CAPÍTULO 3 **36**

Metodologia **36**

3.1 Visão geral do sistema	36
3.2 Hardware	37
3.2.1 Unidade de Controle Eletrônico – ECU	38
3.2.1.1 Medição das variáveis do sistema	38
3.2.1.2 Comandos de Injeção e Ignição	40
3.2.1.3 Comando para atuador de marcha lenta	40
3.2.1.4 Memória	42
3.2.1.5 Interface RS-232	42
3.2.1.6 Interface CAN	42
3.2.2 Sistema de Identificação de Detonação - SID	43
3.2.2.1 Medição do sinal de detonação	44
3.2.2.2 Interface CAN	44
3.3 Software – Unidade de Controle Eletrônico	44
3.3.1 Módulos de medição das variáveis do sistema	45
3.3.1.1 Módulo de captura	45
3.3.1.2 Módulo do conversor analógico digital	46
3.3.1.3 Objetos Sensores	46
3.3.2 Objetos Mapas e Tabelas	47
3.3.2.1 Mapa de injeção em função da rotação e da carga	47
3.3.2.2 Tabela de correção do tempo de injeção em função da tensão na bateria	48
3.3.2.3 Mapa de avanço de ignição em função da rotação e da carga	48
3.3.2.4 Tabela de correção do tempo de ignição em função da tensão na bateria	48
3.3.3 Módulos de atuação	48
3.3.3.1 Módulos de injeção e ignição	48
3.3.3.2 Módulo do atuador de marcha lenta	49

3.3.4 Módulos de Comunicação.....	50
3.3.4.1 Módulo de comunicação Serial.....	50
3.3.4.2 Módulo de comunicação CAN.....	51
3.3.5 Módulo de Armazenamento de Dados.....	54
3.3.6 Módulo de Controle de Lambda.....	55
3.3.6.1 Ação direta do mapa de injeção.....	55
3.3.6.2 Ação direta de compensação da posição do atuador de marcha lenta.....	56
3.3.6.3 Ação direta de enriquecimento para aceleração.....	56
3.3.6.4 Controlador da malha de realimentação.....	57
3.3.6.5 Obtenção do modelo.....	58
3.3.6.6 Projeto do controlador.....	60
3.3.6.7 Simulação.....	63
3.3.7 Módulo de Controle de Marcha Lenta.....	64
3.3.7.1 Estrutura do Controlador.....	65
3.3.7.2 Discretização.....	66
3.3.7.3 Obtenção do Modelo.....	67
3.3.7.4 Projeto do Controlador.....	72
3.3.7.5 Simulação.....	72
3.3.7.6 Acoplamento entre as malhas de marcha lenta e lambda.....	77
3.3.8 Módulo de Controle do Avanço de Ignição.....	78
3.3.9 Arquitetura do software.....	79
3.4 Software - Sistema de identificação de detonação.....	82
3.5 Interface Homem-Máquina.....	84
3.5.1 Características do software.....	84
3.5.2 Funcionalidades.....	85
3.6 Conclusões.....	88

CAPÍTULO 4 **90**

Resultados **90**

4.1 Condições dos testes.....	90
4.2 Resultados obtidos.....	93
4.2.1 Controle de lambda com sensor EGO em regime permanente.....	93
4.2.2 Teste dinâmico do controle de lambda com sensor EGO.....	96
4.2.3 Controle de lambda com sensor UEGO em regime permanente.....	99
4.2.4 Teste dinâmico do controle de lambda com sensor UEGO.....	100
4.2.5 Controladores de lambda e marcha lenta em malha fechada.....	102
4.2.5.1 Teste com sensor EGO e estratégia de enriquecimento habilitada.....	103
4.2.5.2 Teste com sensor EGO e estratégia de enriquecimento desabilitada.....	107
4.2.5.3 Teste com sensor UEGO e estratégia de enriquecimento habilitada.....	108
4.3 Conclusões.....	110

CAPÍTULO 5	111
Conclusão Final	111
5.1 Propostas de continuidade	112
APÊNDICE A	114
Redes de dados veiculares	114
A.1 Introdução à rede CAN	114
A.2 Camadas física e de enlace de dados	116
A.2.1 Barramento de dados	116
A.2.2 Formato das mensagens	117
A.2.3 Detecção de erros	118
A.2.4 Interface de nível de enlace	119
A.3 Camada de aplicação	120
A.3.1 Introdução ao CANopen	120
A.3.2 Modelo de dispositivo	121
A.3.3 Gerenciamento da rede	122
A.3.4 Perfis de dispositivo	123
Referências Bibliográficas	124

Lista de Figuras

Figura 2-1 – Ciclo de trabalho de um MCI-ICE de ignição por centelha de 4 tempos [21].	4
Figura 2-2 – Variação da potência e do consumo de combustível em função do lambda [2].	6
Figura 2-3 – Comportamento da pressão no cilindro durante os tempos de compressão e expansão [18].	7
Figura 2-4 – Variação do torque e do consumo específico em função do avanço de ignição [6].	8
Figura 2-5 – Ignição espontânea no interior do cilindro [18].	8
Figura 2-6 – Comportamento da pressão no cilindro durante ciclos com e sem detonação [18].	9
Figura 2-7 – Nível de emissões de CO em função do lambda para diferentes valores de avanço de ignição aplicado [20].	10
Figura 2-8 – Nível de emissão de HC em função do lambda para diferentes valores de avanço [20].	11
Figura 2-9 – Nível de emissão de NO _x em função do lambda para diferentes valores de avanço de ignição [20].	12
Figura 2-10 – Eficiência de conversão do TWC em função do lambda [7].	13
Figura 2-11 – Modelo de três estágios para os controladores de uma ECU [2].	17
Figura 2-12 – Sistema de controle de injeção típico [7].	17
Figura 2-13 – Sensor de oxigênio EGO de zircônia [7].	18
Figura 2-14 – Curvas características dos sensores de oxigênio EGO e UEGO e concentração de O ₂ na exaustão [8].	19
Figura 2-15 – Esboço do controle de lambda em malha fechada usando EGO [8].	24
Figura 2-16 – Comportamento de ciclo limite apresentado pelo controle de lambda com sensor EGO e controlador integral [8].	24
Figura 2-17 – Comportamento de ciclo limite apresentado pelo controle de lambda com sensor EGO e controlador proporcional integral [8].	25
Figura 2-18 – Sensor de detonação fixado ao bloco do motor [3].	29
Figura 2-19 – Sinal de vibração estrutural do motor medido com sensor de detonação durante a ocorrência do fenômeno [18].	30
Figura 2-20 – Diagrama de um sistema de controle de ignição típico.	30
Figura 2-21 – Sistema de controle de marcha lenta típico.	32
Figura 2-22 – Atuador de marcha lenta baseado em motor de passo [26].	33
Figura 3-1 – Diagrama geral do sistema.	37
Figura 3-2 – Diagrama de blocos do hardware da ECU, incluindo periféricos do DSP.	38
Figura 3-3 – Diagrama do circuito de acionamento do motor de passo do atuador de marcha lenta.	41
Figura 3-4 – Diagrama do circuito do sistema de identificação de detonação.	43
Figura 3-5 – Diagrama geral do software desenvolvido para a ECU.	45
Figura 3-6 – Fluxograma da rotina de acionamento do motor de passo.	49
Figura 3-7 – Vetor com a seqüência de comandos para movimentação do motor de passo.	50
Figura 3-8 – Conexões lógicas entre os <i>mailboxes</i> do mestre e do escravo na camada de aplicação.	52

Figura 3-9 – Máquina de estados implementada no escravo.	52
Figura 3-10 – Sistema de controle de injeção, incluindo controle de lambda realimentado.	55
Figura 3-11 – Validação do modelo com resposta do lambda ao degrau positivo e negativo de tempo de injeção, com amplitude igual a 0,15 ms.	59
Figura 3-12 - Validação do modelo com resposta do lambda ao degrau positivo e negativo de tempo de injeção, com amplitude igual a 0,30 ms.	59
Figura 3-13 – Modelo da malha de controle de lambda com característica não-linear do EGO na realimentação.	60
Figura 3-14 – Resultado obtido na simulação do modelo da malha de controle de lambda, utilizando os ganhos escolhidos.	63
Figura 3-15 – Estrutura adotada para o controlador PI de marcha lenta.	65
Figura 3-16 – Estrutura do controlador PI com limitação da ação de controle e chave seletora para malha aberta/fechada.	65
Figura 3-17 – Validação do modelo obtido para a dinâmica da rotação em função da variação positiva da posição do motor de passo.	70
Figura 3-18 - Validação do modelo obtido para a dinâmica da rotação em função da variação negativa da posição do motor de passo.	70
Figura 3-19 - Validação do modelo obtido para a dinâmica da rotação em função da variação negativa da posição do motor de passo, com estratégia de enriquecimento habilitada.	71
Figura 3-20 – Diagrama geral do sistema de controle de marcha lenta simulado.	73
Figura 3-21 – Estrutura do controlador PI de marcha lenta implementado.	73
Figura 3-22 – Curva característica do bloco ‘Tolerância’.	74
Figura 3-23 – Resultado obtido com a simulação do modelo completo do sistema de controle de marcha lenta.	76
Figura 3-24 – Representação multivariável simplificada da dinâmica de rotação e lambda de um MCI.	77
Figura 3-25 – Estrutura multimalhas correspondente aos controladores de marcha lenta e lambda.	77
Figura 3-26 – Estrutura do módulo de controle do avanço de ignição.	78
Figura 3-27 – Estratégia de correção do avanço com base na detecção de detonação.	79
Figura 3-28 – Fluxograma simplificado do evento de captura de transição de subida no sinal do sensor indutivo de rotação.	81
Figura 3-29 – Diagrama de blocos do software do SID.	82
Figura 3-30 – Tela principal da IHM com arquivo de calibração aberto.	85
Figura 3-31 – Janela com os parâmetros de injeção e ignição.	86
Figura 3-32 – Janela com os parâmetros do controlador de marcha lenta.	87
Figura 3-33 – Janela com os parâmetros do controlador de lambda.	87
Figura 3-34 – Janela com os parâmetros da estratégia de correção do avanço.	88
Figura 3-35 – Janela com os parâmetros de comunicação da rede CAN.	88
Figura 4-1 – Controle de lambda em malha fechada com realimentação através de sensor EGO, com marcha lenta em malha aberta.	94
Figura 4-2 – Controle de lambda com sensor EGO e perturbação gerada pelo motor de passo, devido ao controlador de marcha lenta.	97

Figura 4-3 - Controle de lambda em malha fechada com realimentação através de sensor UEGO, com marcha lenta em malha aberta.	99
Figura 4-4 - Controle de lambda com sensor UEGO e perturbação gerada pelo motor de passo devido ao controlador de marcha lenta.....	101
Figura 4-5 – Controle de marcha lenta e lambda em malha fechada com sensor EGO e estratégia de enriquecimento da mistura habilitada.	104
Figura 4-6 – Controle de marcha lenta e lambda em malha fechada com sensor EGO e estratégia de enriquecimento da mistura desabilitada.....	107
Figura 4-7 – Controle de marcha lenta e lambda em malha fechada com sensor UEGO e estratégia de enriquecimento da mistura habilitada.	109
Figura A-1 – Modelo de comunicação OSI de 7 camadas [39].....	115
Figura A-2 – Arquitetura típica de uma rede CAN embarcada.	116
Figura A-3 – Níveis de tensão no barramento CAN e sua relação com os níveis lógicos.	117
Figura A-4 – Estrutura da mensagem estendida (a) e normal (b) na rede CAN [38].....	118
Figura A-5 – Máquina de estados de erro da rede CAN.....	119
Figura A-6 – Modelo de dispositivo da rede CANopen [42].....	121
Figura A-7 – Exemplo de entradas padronizadas do dicionário de objetos [43].	121
Figura A-8 – Estrutura do identificador da mensagem no protocolo CANopen.....	122
Figura A-9 – Máquina de estados de comunicação dos escravos em uma rede CANopen.	123

Lista de Tabelas

Tabela 3-1 – Sinais medidos pela ECU e os respectivos sensores a serem usados.	39
Tabela 3-2 – Seqüência de comandos para movimentação da válvula de marcha lenta.	41
Tabela 3-3 – Variáveis medidas pelo ADC e suas respectivas características estáticas.	46
Tabela 3-4 - Comparação das características básicas do CANopen e do protocolo implementado.	54
Tabela 3-5 – Resultados dos testes de resposta do lambda ao degrau de tempo de injeção. Obtenção dos parâmetros de um modelo de 1ª ordem com tempo morto.	58
Tabela 3-6 – Resultados de simulações com ganho K_p variando.	62
Tabela 3-7 - Resultados de simulações com ganho K_i variando.	62
Tabela 3-8 – Resultados obtidos em testes de resposta da rotação ao degrau positivo na posição do motor de passo.	69
Tabela 3-9 – Entradas no OD definidas para o SID.	83
Tabela 3-10 – Parâmetros do controlador de marcha lenta.	87
Tabela 3-11 – Parâmetros de comunicação da rede CAN.	88
Tabela 4-1 – Região do mapa de injeção correspondente à condição de marcha lenta, com os valores ajustados através da medição do sensor UEGO.	92
Tabela 4-2 – Parâmetros básicos definidos para o sistema.	92
Tabela 4-3 – Dados técnicos do motor utilizado nos testes.	92
Tabela 4-4 – Parâmetros relevantes para o teste de controle em malha fechada de lambda usando EGO e marcha lenta em malha aberta.	94
Tabela 4-5 – Parâmetros relevantes ao teste dinâmico do controlador de lambda com EGO.	97
Tabela 4-6 – Parâmetros utilizados no sistema de controle completo com sensor EGO.	104
Tabela A-1 – Padrões ISO para as camadas física e de enlace de dados [36].	115
Tabela A-2 – Relação entre a taxa de transmissão e o comprimento do barramento [35].	117

Lista de Abreviaturas e Siglas

ABS	- <i>Antilock Braking Systems</i> (Sistema de frenagem anti-bloqueio)
ADC	- <i>Analog to Digital Converter</i> (Conversor de Analógico para Digital)
API	- <i>Application Programming Interface</i> (Interface para programação de aplicativos)
CAFE	- <i>Corporate Average Fuel Economy</i> (Consumo de combustível médio corporativo)
CAN	- <i>Controller Area Network</i>
CiA	- <i>CAN in Automation</i>
CRC	- <i>Cyclic Redundancy Code</i> (Código de redundância cíclica)
CSMA/CD	- <i>Carrier Sense Multiple Access / Collision Detection</i> (Múltiplo acesso com detecção de portadora / detecção de colisão)
DBW	- <i>Drive by Wire</i> (Válvula borboleta comandada eletronicamente)
DELT	- Departamento de Engenharia Eletrônica
DEMEC	- Departamento de Engenharia Mecânica
DSP	- <i>Digital Signal Processor</i> (Processador Digital de Sinais)
ECU	- <i>Electronic Control Unit</i> (Unidade de Controle Eletrônico)
EGO	- <i>Exhaust Gas Oxygen</i> (Sensor de oxigênio nos gases de exaustão)
EGR	- <i>Exhaust Gas Recirculation</i> (Recirculação dos gases de exaustão)
EPA	- <i>Environmental Protection Agency</i> (Agência de Proteção Ambiental)
FFT	- <i>Fast Fourier Transform</i> (Transformada Rápida de Fourier)
GDI	- <i>Gasoline Direct Injection</i> (Injeção direta de gasolina)
HEGO	- <i>Heated Exhaust Gas Oxygen</i> (Sensor de oxigênio nos gases de exaustão com aquecimento)
IHM	- Interface Homem-Máquina
ISE	- <i>Integral Square Error</i> (Integral do quadrado do erro)
ISO	- <i>International Standards Organization</i> (Organização Internacional para Padronização)
LDI	- Limite de Detonação Inferior
MBT	- <i>Minimum advance for Best Torque</i> (Menor avanço que proporcione o maior torque)
MCI-ICE	- Motor de Combustão Interna com Ignição por Centelha
MIMO	- <i>Multiple Input - Multiple Output</i> (Múltiplas Entradas – Múltiplas Saídas)
MIPS	- Milhões de Instruções Por Segundo

NDA	- <i>Non-Destructive Arbitration</i> (Arbitragem não destrutiva)
NMT	- <i>Network Management</i> (Gerenciamento da Rede)
OD	- <i>Object Dictionary</i> (Dicionário de Objetos)
OSI	- <i>Open Systems Interconnection</i> (Interconexão de Sistemas Abertos)
PDO	- <i>Process Data Object</i> (Objeto com dados do processo)
PMI	- Ponto Morto Inferior
PMS	- Ponto Morto Superior
PWM	- <i>Pulse Width Modulation</i> (Modulação em Largura de Pulso)
RAD	- <i>Rapid Application Development</i> (Desenvolvimento Rápido de Aplicação)
REC	- <i>Receive Error Counter</i> (Contador de erros de recepção)
SAE	- <i>Society of Automotive Engineers</i> (Sociedade dos Engenheiros da Mobilidade)
SCI	- <i>Serial Communications Interface</i> (Interface de Comunicação Serial)
SDO	- <i>Service Data Object</i> (Objeto com dados de serviço)
SID	- Sistema de Identificação de Detonação
SISO	- <i>Single Input - Single Output</i> (Uma Entrada – Uma Saída)
SOC	- <i>Start of Conversion</i> (Início da Conversão)
TEC	- <i>Transmit Error Counter</i> (Contador de erros de transmissão)
TWC	- <i>Three Way Catalyst</i> (Catalisador de três vias)
UEGO	- <i>Universal Exhaust Gas Oxygen</i> (Sensor linear de oxigênio nos gases de exaustão)
UFMG	- Universidade Federal de Minas Gerais
ZEV	- <i>Zero Emission Vehicle</i> (Veículo com Emissão Zero)
ZOH	- <i>Zero Order Hold</i> (Retentor de ordem zero)

Lista de Símbolos

CO_2	- dióxido de carbono
H_2O	- água
λ	- coeficiente de ar
CO	- monóxido de carbono
NO_x	- óxido de nitrogênio
HC	- hidrocarbonetos
NO_2	- dióxido de nitrogênio
NO	- monóxido de nitrogênio
ZrO_2	- dióxido de zircônio
\dot{m}_{comb}	- Vazão mássica de combustível
\dot{m}_{ar}	- Vazão mássica de ar
$(\dot{m}_{ar})_{medida}$	- Vazão mássica de ar medida
A/F	- Razão ar/combustível
\dot{m}_{bico}	- Vazão mássica do bico injetor
\dot{v}_{ar}	- Vazão volumétrica de ar
ρ_{ar}	- Densidade do ar
$V_{cilindrada}$	- Cilindrada total do motor (volume de cada cilindro multiplicado pelo número de cilindros do motor)
m_{ar}	- Massa de ar
$\eta_{Volumétrica}$	- Eficiência volumétrica
$V_{coletor}$	- Volume do coletor de admissão
$pres_{coletor}$	- Pressão no coletor de admissão
$temp_{coletor}$	- Temperatura no coletor de admissão
R	- Constante universal dos gases ideais
f_{CL}	- Frequência de oscilação do lambda com controle em malha fechada
t_{atraso}	- Atraso de tempo do sistema: inclui atraso de transporte dos gases até a exaustão e atraso do tempo de resposta do sensor de oxigênio
K_p	- Ganho da ação proporcional

K_i	- Ganho da ação integral
T_i	- Tempo integral
K	- Ganho da planta
θ	- Tempo morto da planta
τ	- Constante de tempo da planta
τ_c	- Constante de tempo desejada para o sistema em malha fechada
T_s	- Período de amostragem

Resumo

O presente trabalho situa-se no contexto do desenvolvimento de uma Unidade de Controle Eletrônico (*Electronic Control Unit* - ECU) aberta, que tem por objetivo suprir a carência de um sistema de controle flexível que favoreça o desenvolvimento de pesquisas na área de motores. Após a definição da arquitetura de hardware da ECU em trabalhos anteriores, foi definido como objetivo do presente trabalho o desenvolvimento de uma estratégia completa de controle de injeção, ignição e rotação de um motor de combustão interna (MCI) na condição de marcha lenta. Nesta condição o motor não está sendo acelerado, e deste modo a ECU deve mantê-lo na menor rotação possível de forma a minimizar o consumo, mas garantindo o seu funcionamento suave, independente das cargas aplicadas em seu eixo. Apesar da dinâmica complexa e não-linear do motor, a restrição da operação à condição de marcha lenta possibilitou 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. Dentre as estratégias implementadas, o controle da ignição requer a informação de ocorrência do fenômeno da detonação (*knocking*), obtida por um sistema independente desenvolvido em trabalhos anteriores, através da análise espectral do sinal de vibração estrutural do motor. Deste modo, foi desenvolvido também um protocolo de comunicação simplificado, baseado na interface CAN (*Controller Area Network*), através do qual foi possível trocar informações entre a ECU e o sistema de identificação de detonação. Resultados obtidos com motor em bancada mostram que as estratégias desenvolvidas são capazes de manter o funcionamento correto do motor, com baixo nível de emissões e consumo.

Palavras chave: gerenciamento eletrônico de motores, controle de marcha lenta, sistemas embarcados automotivos.

Abstract

The present work is placed in the context of an open Electronic Control Unit (ECU) development, intended to supply the lack of a flexible control system that favors research development in the engine area. After the ECU's hardware architecture definition in a previous work, was defined as objective of the present work the development of a complete strategy of injection, ignition and speed control of an Internal Combustion Engine (ICE) in the idle condition. In this condition the engine is not accelerated, and in this way must be kept by ECU in the lesser possible speed to minimize consumption, but preserving engine's smooth functioning, despite of loads applied in its shaft. Although nonlinear and complex dynamics of the engine, the restriction of the operation to the idle condition made possible the adoption of classic control techniques, based in PI controllers in parallel with feed forward strategies for disturbances rejection and loop decoupling. Amongst the implemented strategies, the ignition control requires the information of knocking phenomenon occurrence, measured by an independent system developed in previous works, through the spectral analysis of the engine's structural vibration signal. In this way, a simplified communication protocol was also developed, based in CAN (Controller Area Network) interface, through which it was possible to change information between ECU and the knocking identification system. Results obtained with engine in a bench show that the developed strategies are capable to keep the correct functioning of the engine, with low level of emissions and consumption.

Keywords: electronic engine management, idle speed control, automotive embedded systems.

Capítulo 1

Introdução

Os motores de combustão interna de ignição por centelha (MCI-ICE) necessitam, por princípio, de algum tipo de controle sobre a formação e a queima da mistura ar/combustível. As soluções inicialmente adotadas, como carburador e platinado, eram puramente mecânicas e proporcionavam baixo desempenho com relação à economia de combustível e controle das emissões de gases poluentes. Neste contexto, o constante crescimento da frota veicular mundial tornou necessária a adoção de ações governamentais com o objetivo de regulamentar o nível de emissões provenientes dos veículos automotivos. Diante destas regulamentações, os sistemas de controle até então utilizados se tornaram ineficientes. Na mesma época, o desenvolvimento de circuitos digitais de baixo custo impulsionou a adoção de sistemas de controle eletrônico por parte da indústria automobilística. Estes novos sistemas eram capazes de atender às regulamentações e possuíam um grande potencial de desenvolvimento. De fato, os automóveis modernos agregam cada vez mais sistemas eletrônicos, que atuam tanto na otimização do MCI quanto nas áreas de conforto, segurança e entretenimento.

O gerenciamento da operação dos MCI modernos é realizado por uma unidade de controle eletrônico (*Electronic Control Unit* - ECU), que é capaz de controlar a formação e a queima da mistura ar/combustível. Estes sistemas recebem sinais de sensores instalados no motor, o que permite determinar sua condição instantânea de funcionamento. As informações obtidas são processadas pelas estratégias de controle de forma a determinar os comandos dos atuadores que garantam o funcionamento otimizado do MCI. As ECUs modernas proporcionam economia de combustível, baixo nível de emissões, alto desempenho e aumento da vida útil do motor.

1.1 Motivação

As estratégias de controle das ECUs requerem ajuste específico para cada tipo de motor. Deste modo, os fabricantes destes sistemas disponibilizam às montadoras unidades dedicadas ao desenvolvimento de motores, chamadas de “centrais abertas”, nas quais é possível configurar os parâmetros de controle. Após a etapa de ajuste do sistema, os parâmetros obtidos são transferidos para as ECUs dedicadas, que equipam os veículos produzidos. O mercado oferece também as centrais abertas comerciais [28], [29], muito utilizadas em centros de pesquisa e em equipes de competição. Estes sistemas apresentam grande flexibilidade, sendo capazes de se adaptar a vários

tipos de motores. Sua utilização em vias públicas não é permitida pela legislação, a não ser que o veículo seja devidamente certificado por órgão competente, procedimento que requer vários ensaios de validação a custos elevados.

A flexibilidade oferecida pelas centrais abertas, com relação às estratégias de controle, consiste basicamente no ajuste de parâmetros, mapas e tabelas de calibração¹. Instituições de ensino superior e de pesquisa necessitam de um maior grau de liberdade sobre o gerenciamento do motor. Além disso, o poder computacional cada vez maior dos processadores permite que técnicas de controle modernas sejam aplicadas aos MCI, que consistem em uma planta não-linear com parâmetros variantes no tempo, ideal para a aplicação de ferramentas de identificação, estratégias de controle adaptativo e técnicas de inteligência artificial, por exemplo.

Neste contexto, formou-se na Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) um grupo de pesquisa com integrantes do Departamento de Engenharia Eletrônica (DELT) e do Departamento de Engenharia Mecânica (DEMEC), com o objetivo de desenvolver uma central eletrônica aberta que favorecesse o desenvolvimento de pesquisas nesta área. Este sistema deve apresentar as mesmas funcionalidades de uma central aberta normal, incluindo a configuração de parâmetros, mapas e tabelas, mas com a liberdade de permitir a reprogramação das estratégias de controle. Com este sistema criam-se inúmeras possibilidades de desenvolvimento de pesquisas, tanto na área da eletrônica quanto na área de motores.

Dentro deste objetivo, o primeiro trabalho desenvolvido foi “*Definição da arquitetura de uma central eletrônica para controle da ignição e da injeção de combustível em motores de combustão interna*” [15]. Neste trabalho foi definida 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 com computador pessoal (*personal computer* - PC). Foram realizados os procedimentos de calibração dos sensores e testes de validação dos circuitos de comando dos atuadores. Além disso, foram desenvolvidos os módulos básicos de software para medição das variáveis e geração dos comandos dos atuadores. Por fim uma estratégia bem simples de controle foi implementada para validar todo o sistema.

Paralelamente foi desenvolvido o trabalho “*Desenvolvimento e implementação de um sistema de identificação de detonação em motores de combustão interna de ignição por centelha*” [17]. Neste trabalho foi criado um sistema capaz de identificar a ocorrência do fenômeno da detonação a partir do sinal de um sensor acelerômetro de banda larga fixado ao bloco do motor. O sistema desenvolvido funciona isolado da ECU, realizando a própria medição de rotação e posição angular do eixo de manivelas. A informação de ocorrência da detonação é mostrada através de um software de interface sendo executado em um PC. Com esta configuração o sistema de identificação de detonação é adequado para o processo de calibração de motores, no qual o

¹ O termo ‘calibração’ não é adequado para denominar o processo de ajuste dos parâmetros de uma ECU. No entanto, será adotado ao longo do texto por ser largamente utilizado na área de motores.

operador pode monitorar a ocorrência do fenômeno através da interface, e corrigir os parâmetros do motor de forma a evitá-lo.

1.2 Objetivos

O objetivo do presente trabalho é dar continuidade aos dois anteriores (referências [15] e [17]), com o desenvolvimento de uma arquitetura de controle de um MCI-ICE na condição de marcha lenta, o que envolve o controle de injeção, rotação e ignição. A ECU deve ser capaz de manter o motor funcionando na região de marcha lenta, com a mistura estequiométrica, independente das cargas aplicadas em seu eixo. Como parte do trabalho deve ser desenvolvida uma interface homem-máquina (IHM) que possibilite visualizar o comportamento do sistema, configurar as estratégias desenvolvidas e fazer aquisição de dados. Para a estratégia de controle da ignição é fundamental a informação de ocorrência do fenômeno da detonação. Neste caso, o presente trabalho deve estabelecer uma comunicação entre o sistema de identificação de detonação desenvolvido em [17] e a ECU.

1.3 Organização do texto

O Capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica sobre o controle básico de um MCI. Primeiramente é realizada uma breve revisão do ciclo de trabalho de um MCI-ICE, apenas para definir termos básicos. Em seguida são abordados conceitos relacionados à mistura ar/combustível e ao avanço de ignição. Apresenta-se a influência destas variáveis no desempenho, consumo e emissões de um MCI-ICE, e conclui-se que através delas é possível otimizar o funcionamento do motor. Mostra-se também a evolução dos sistemas de controle de MCI, de forma sucinta. Em seguida é apresentada a teoria básica de controle de injeção, ignição e marcha lenta. Ao final do capítulo são abordadas as tendências futuras para o controle de MCI.

O Capítulo 3 apresenta a metodologia utilizada no desenvolvimento do trabalho. Inicialmente mostra-se o hardware da ECU e do sistema de identificação de detonação. As partes desenvolvidas nos trabalhos anteriores são vista apenas superficialmente. Em seguida é abordado o software da ECU, com a descrição dos módulos e estratégias de controle desenvolvidas. Apresenta-se também o protocolo desenvolvido para a camada de aplicação da rede CAN. Ao final do capítulo são apresentados os softwares do sistema de identificação de detonação e da interface homem-máquina.

O Capítulo 4 apresenta inicialmente as condições dos testes realizados com o sistema. São explicadas as limitações enfrentadas e as soluções e simplificações utilizadas. Em seguida mostra-se os resultados obtidos com os controladores em malha fechada. Análises detalhadas dos gráficos gerados são realizadas. O Capítulo 5 apresenta as conclusões alcançadas e as propostas de continuidade do trabalho. Para o leitor interessado, o Apêndice A apresenta um resumo sobre redes CAN.

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica

Este capítulo introduz ao leitor os princípios básicos do controle eletrônico de motores de combustão interna do ciclo Otto. Inicialmente mostra-se de forma resumida os princípios de funcionamento de um MCI e alguns aspectos da emissão de poluentes. Em seguida discute-se os principais motivos que levaram à adoção do controle eletrônico e as suas vantagens. Estratégias básicas de controle de injeção, ignição e marcha lenta são mostradas. Ao final do capítulo apresenta-se as tendências para os sistemas de controle futuros.

2.1 Introdução

O ciclo de trabalho de um MCI-ICE do ciclo Otto de 4 tempos corresponde a 2 voltas completas do eixo de manivelas (ou virabrequim). Ao longo do ciclo o pistão se move dentro do cilindro entre o ponto morto superior (PMS) e o ponto morto inferior (PMI). Através de um sistema biela-manivela o movimento alternativo dos pistões é convertido em movimento rotativo do eixo de manivelas [20]. A Figura 2-1 ilustra o ciclo de trabalho de um MCI-ICE de 4 tempos.

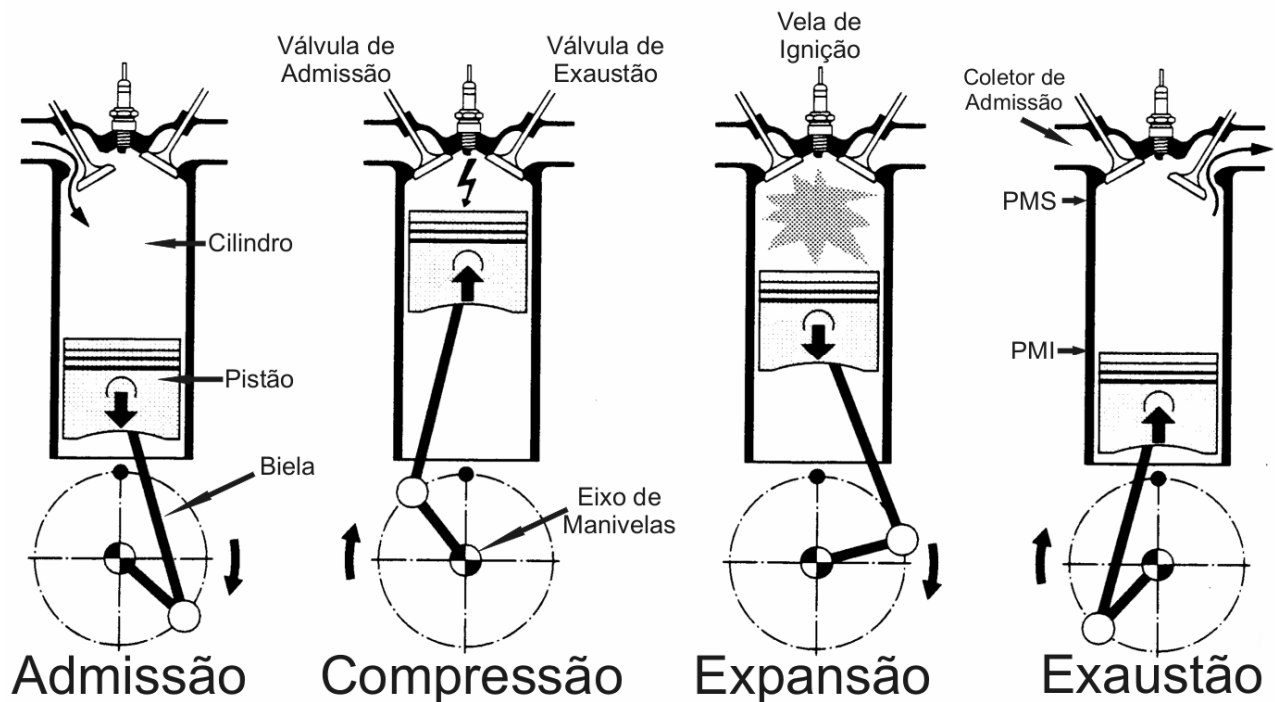


Figura 2-1 – Ciclo de trabalho de um MCI-ICE de ignição por centelha de 4 tempos [20].

Cada cilindro possui no mínimo uma válvula para admissão da mistura ar/combustível e outra para exaustão dos resíduos da combustão. Durante o tempo de admissão o pistão se move do PMS para o PMI enquanto a válvula de admissão permanece aberta e a de exaustão fechada. A mistura ar/combustível entra no cilindro. Após atingir o PMI o pistão inicia o movimento em direção ao PMS, com as válvulas fechadas, comprimindo a mistura admitida, o que corresponde ao tempo de compressão. Com o pistão próximo do PMS aplica-se uma centelha através da vela de ignição, com o objetivo de iniciar a combustão da mistura comprimida. A queima da mistura ar/combustível eleva a pressão no cilindro, fazendo com que o pistão se desloque do PMS para o PMI, o que constitui o tempo de expansão. Quando o pistão atinge o PMI a válvula de exaustão é aberta, iniciando o tempo de exaustão, onde o pistão se move novamente do PMI para o PMS empurrando para fora do cilindro os produtos da combustão. Em seguida o ciclo se repete com um novo tempo de admissão. Observa-se na Figura 2-1 que o ciclo completo de trabalho corresponde a 720° do eixo de manivelas. O leitor pode encontrar mais informações sobre o assunto em [2], [5], [15], [19], [20], [43], [44].

Muitos são os parâmetros que influenciam no funcionamento do motor, permitindo relações de compromisso entre desempenho, custo, consumo e emissões. Como exemplos podem ser citados: taxa de compressão, ângulo de cruzamento de válvulas, cilindrada, formato da câmara de combustão, formato das válvulas, entre outros. Todos estes parâmetros estão fora do escopo deste trabalho, pois são determinados durante o projeto e não podem ser alterados pelo sistema de controle na maioria dos motores atuais. As principais variáveis sobre as quais o sistema de controle pode atuar são a relação ar/combustível e o ângulo de avanço de ignição². As próximas seções mostram como estas variáveis influenciam desempenho, consumo e emissões de um MCI, permitindo ao sistema de controle manter um ponto ótimo de operação.

2.1.1 Mistura ar/combustível

A mistura ar/combustível deve ter uma proporção adequada entre a massa de ar e a massa de combustível, de forma que a reação de combustão seja completa, gerando como produtos apenas gás carbônico (CO₂) e água (H₂O), além dos gases inertes presentes na atmosfera. A mistura que proporciona uma combustão completa é chamada de estequiométrica e deve ter uma razão entre as massas de ar e combustível de 14,7:1 no caso da gasolina pura, 13,2:1 para gasolina comum³ e 9:1 para o etanol [4]. Define-se então o fator lambda (λ), que corresponde à razão entre relação ar/combustível real e a estequiométrica, de acordo com a equação 2.1 [2], [5].

$$\lambda = \frac{(ar/combustível)_{real}}{(ar/combustível)_{estequiometrico}} \quad 2.1$$

² Será abordado na seção 2.1.2.

³ Combustível usado apenas no Brasil. Consiste em uma mistura de 75% a 80% de gasolina e 25% a 20% de etanol.

O fator λ determina a condição instantânea da mistura ar/combustível. Para $\lambda = 1$ a massa de combustível injetada está na proporção correta em relação à massa de ar admitida, e deste modo a combustão será, teoricamente, completa. Para $\lambda < 1$ a mistura está com deficiência de ar, sendo chamada mistura rica. Para $\lambda > 1$ temos excesso de ar e diz-se que a mistura está pobre [5]. O λ é muito importante para o funcionamento do motor, pois influi de forma direta no desempenho, no consumo de combustível e nas emissões de poluentes [2]. A Figura 2-2 mostra a variação da potência e do consumo específico⁴ em função do λ , considerando que o avanço de ignição, a rotação e a posição da válvula borboleta⁵ são mantidos constantes.

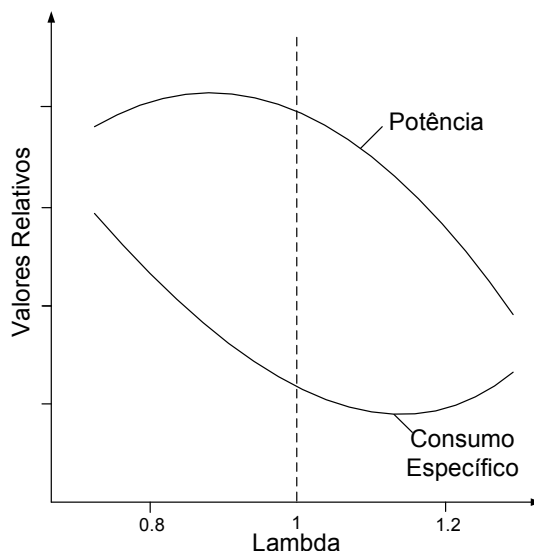


Figura 2-2 – Variação da potência e do consumo de combustível em função do lambda [2].

Observa-se que a máxima potência é obtida com mistura ligeiramente rica, enquanto o menor consumo é obtido com mistura ligeiramente pobre. A condição estequiométrica se situa na região intermediária, proporcionando um bom desempenho com baixo consumo. A seção 2.1.3 mostra a influência do λ nas emissões. Os sistemas modernos controlam o λ em diferentes valores dependendo das condições de operação do motor. Situações como aceleração rápida, desaceleração, partida, baixa carga e plena carga, entre outras, exigem mistura diferente da estequiométrica [5]. Isso mostra que as centrais utilizam o λ para privilegiar ora o desempenho, ora o consumo, ora as emissões. Mais detalhes podem ser obtidos na seção 2.3.1.

2.1.2 Avanço de Ignição

Ao longo do ciclo de trabalho do motor, apresentado na seção 2.1, apenas durante o tempo de expansão é realizado trabalho no eixo do motor, enquanto durante os outros três há somente consumo de energia. Para que sejam atingidos os objetivos de máximo desempenho com menor consumo é importante maximizar a energia fornecida ao eixo do motor durante o ciclo de

⁴ É dado pela razão entre a vazão mássica de combustível consumida e a potência desenvolvida pelo motor.

⁵ Válvula que determina a vazão de ar no coletor de admissão.

expansão, ou seja, aproveitar toda a energia química disponível na mistura ar/combustível admitida, de forma a empurrar o pistão com a maior força possível [17].

A Figura 2-3 mostra o comportamento da pressão no interior do cilindro em função do ângulo do eixo de manivelas. Durante o tempo de compressão o pistão está subindo, o que gera uma diminuição no volume da mistura e conseqüentemente um aumento da pressão. Pouco antes do PMS ocorre a ignição da mistura através da centelha, o que gera uma frente de chama, que cresce rapidamente em direção às paredes do cilindro. O interior da frente de chama contém os produtos quentes da combustão, enquanto à sua frente encontra-se a mistura ainda não queimada [2]. Este processo acarreta em aumento da temperatura, o que contribui para o aumento rápido da pressão. O pico de pressão corresponde ao instante em que a frente de chama atinge as paredes do cilindro, porém nem todo o calor foi liberado ainda. Devido às condições de alta temperatura e pressão no início do ciclo de expansão, alguns componentes químicos no interior do cilindro sofrem dissociação. No entanto, à medida que temperatura e pressão diminuem devido ao movimento de descida do pistão, ocorre o fenômeno de re-associação, que permite prolongar a combustão, de forma que um pouco mais de calor ainda é liberado [2].

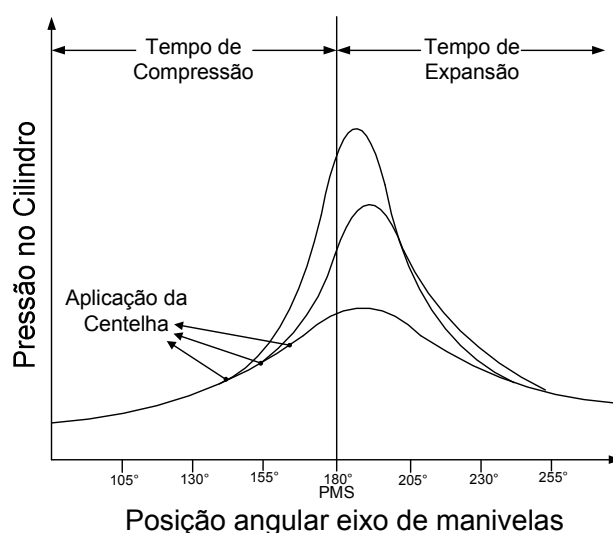


Figura 2-3 – Comportamento da pressão no cilindro durante os tempos de compressão e expansão [17].

Observa-se que o adiantamento da centelha em relação ao PMS possibilita ao motor atingir um pico mais elevado de pressão no cilindro, o que corresponde a uma maior força empurrando o pistão. Ao ângulo no qual ocorre a centelha dá-se o nome de ângulo de avanço de ignição, sendo medido em relação ao PMS. O avanço de ignição deve ser otimizado de forma que o pico de pressão seja o maior possível e ocorra instantes após o PMS [17]. Deste modo garante-se uma maior eficiência no uso da energia química do combustível, além de um torque elevado no eixo do motor.

O avanço de ignição ideal depende de dois fatores principais, a rotação do motor e a carga aplicada. Com o aumento da rotação a velocidade de deslocamento do pistão aumenta, fazendo com que o pico de pressão diminua e ocorra longe do PMS. Neste caso é necessário aumentar o

avanço, para que a pressão comece a subir antes, de modo a compensar o aumento de velocidade do pistão. O ajuste do avanço de ignição em função da carga aplicada é também importante, já que misturas mais pobres, aplicadas em condições de baixa carga, levam um tempo maior para queimar e deste modo um avanço adicional deve ser aplicado. Já em cargas elevadas usa-se mistura rica que queima mais rapidamente e neste caso o avanço pode ser reduzido [2]. De forma geral, em cada condição de operação o motor requer um valor de avanço de ignição ótimo. A Figura 2-4 mostra a variação do torque e do consumo específico do motor em função do avanço, para a mesma condição de rotação, carga e relação ar/combustível. Observa-se que o torque máximo ocorre para um valor específico de avanço, conhecido como MBT (*Minimum advance for Best Torque*) [5]. Aumentando ainda mais o avanço é possível atingir o ponto de menor consumo específico.

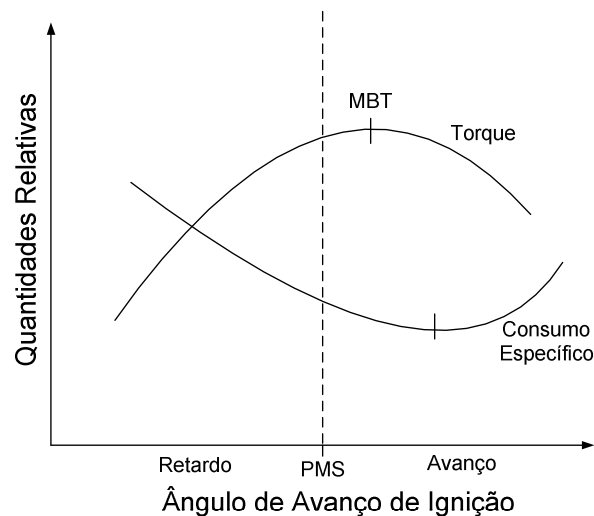


Figura 2-4 – Variação do torque e do consumo específico em função do avanço de ignição [5].

O aumento do avanço em busca do ponto de torque máximo (MBT) é limitado pelo fenômeno da detonação. Como foi visto anteriormente, a aplicação da centelha gera uma frente de chama que se propaga em direção às paredes do cilindro, elevando os valores de temperatura e pressão. A mistura ar/combustível ainda não queimada pode não suportar estas condições e sofrer ignição espontânea, antes da chegada da frente de chama, como mostra a Figura 2-5 [17].

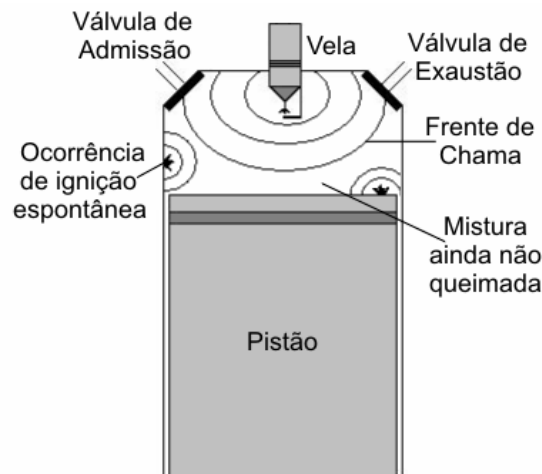


Figura 2-5 – Ignição espontânea no interior do cilindro [17].

A ignição espontânea da mistura produz ondas de choque que se propagam em direção contrária à frente de propagação normal, causando oscilações na pressão devido à interferência entre as ondas, sendo este fenômeno conhecido como detonação (*knocking*) [17],[19],[20],[2],[21]. A ocorrência deste fenômeno pode ser observada através das oscilações da pressão no cilindro, como mostra a Figura 2-6. A frequência destas oscilações depende basicamente do diâmetro do cilindro e da temperatura na câmara de combustão, ficando tipicamente na faixa de 5 a 10KHz [17], [5]. As ondas de pressão se chocam contra a parede do cilindro, causando vibrações que se propagam pela estrutura do motor. Deste modo, a detonação pode ser detectada tanto pela medição direta da pressão no cilindro, quanto pela medição da vibração estrutural do motor [17]. Observa-se também na Figura 2-6 que quanto maior o avanço de ignição aplicado, maior valor de pressão é atingido, e deste modo, maior é a chance de ocorrência da detonação.

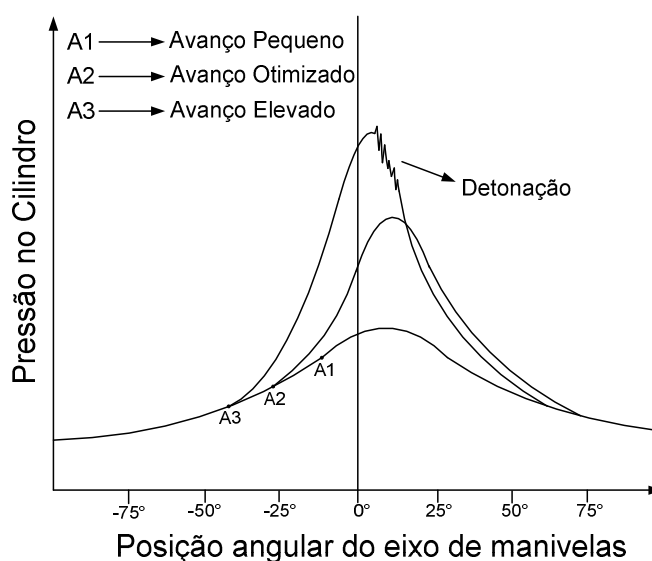


Figura 2-6 – Comportamento da pressão no cilindro durante ciclos com e sem detonação [17].

Durante a ocorrência de detonação parte da energia presente no cilindro é desperdiçada, o que gera perda de potência entregue ao eixo. Além disso, danos progressivos e irreversíveis são causados aos componentes do motor. Deste modo a detonação se torna um fator limitante ao desempenho do sistema, impedindo que o MBT seja alcançado em determinadas condições de operação [17], [18], [21]. Portanto é importante que o sistema de controle mantenha o avanço de ignição o mais próximo possível do MBT, mas sem a ocorrência elevada de detonação. A seção 2.3.2 mostra como as centrais convencionais realizam esta tarefa.

2.1.3 Emissões

Se a combustão da mistura ar/combustível fosse ideal os gases de exaustão seriam formados apenas por CO_2 e H_2O , que não são considerados prejudiciais na atmosfera⁶. Infelizmente a

⁶ No entanto os níveis elevados de emissões de CO_2 contribuem para o aquecimento global.

combustão nos MCI-ICE não é ideal, de forma que os gases de exaustão são constituídos também por monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrogênio (NO_x), hidrocarbonetos (HC), óxidos de enxofre e outros componentes [5]. Por serem nocivos ao meio ambiente o governo controla os níveis de emissões de CO, NO_x e HC⁷.

2.1.3.1 Emissão de CO

O monóxido de carbono é um produto da combustão incompleta e está sempre presente quando há carência de oxigênio (mistura rica) durante a combustão sendo, portanto, diretamente dependente do λ aplicado [6]. A concentração de CO no cilindro é alta durante a combustão, porém durante o tempo de expansão uma porção é oxidada formando CO₂ [3]. Situações com baixa atomização⁸ do combustível podem gerar deficiência de oxigênio em determinadas regiões do cilindro, mesmo com mistura pobre. Nestes casos uma pequena quantidade de CO também será encontrada na exaustão. A emissão de CO pode ser grande também durante os transitórios com mistura rica, por exemplo, nas acelerações e desacelerações, além da partida e do aquecimento do motor [6]. Em relação ao avanço de ignição, pode-se dizer que a influência sobre as emissões de CO é pequena [19]. A Figura 2-7 mostra os níveis de emissões de CO em função do λ para diferentes valores de avanço de ignição.

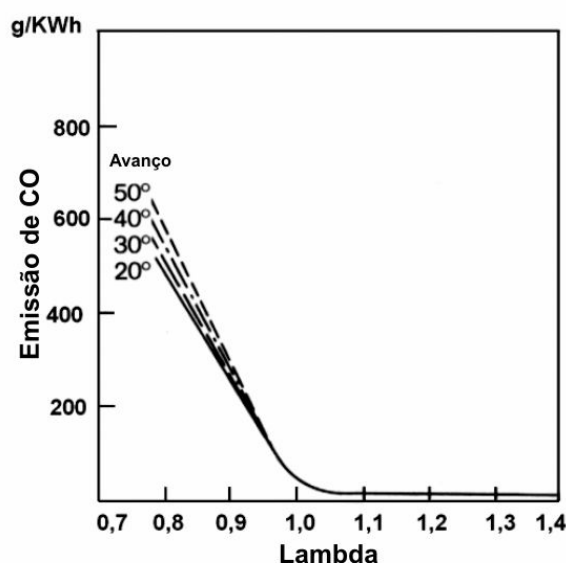


Figura 2-7 – Nível de emissões de CO em função do lambda para diferentes valores de avanço de ignição aplicado [19].

O CO é tóxico, pois tem maior afinidade com a hemoglobina do sangue do que o oxigênio, e deste modo reduz o suprimento de oxigênio ao corpo. Dependendo da quantidade pode causar vertigem, dores de cabeça, ou até mesmo a morte. É um gás incolor e inodoro, o que pode levar a vítima a perceber a sua presença apenas quando já é tarde demais [19], [6].

⁷ O controle do nível de emissões de CO₂ já está sendo implantado pela União Européia.

⁸ Conversão do combustível líquido em spray, ou conjunto de gotículas. Melhora a eficiência da combustão nos MCI.

2.1.3.2 Emissão de HC

Assim como no caso do CO, a carência de oxigênio na mistura ar/combustível leva à emissão de hidrocarbonetos não queimados e parcialmente queimados, conhecidos por HC. Deste modo, a emissão de HC é alta para misturas ricas e cai à medida que o λ se aproxima do valor estequiométrico [3]. Outros fatores podem causar emissão de HC mesmo com misturas pobres, como por exemplo, a deficiência de oxigênio devido à baixa homogeneidade da mistura e a extinção da chama por resfriamento nas regiões próximas às paredes do cilindro [6]. Em situações de mistura muito pobre as emissões de HC se agravam pela combustão lenta e também por falhas na ignição da mistura [3]. Além destes fatores, as emissões evaporativas⁹ e o processo de “*blow-by*”¹⁰ também contribuem para aumentar o nível de HC emitido.

Com relação à ignição, o aumento na emissão de HC é proporcional ao adiantamento desta, já que as reações na fase de expansão e exaustão são desfavorecidas devido à baixa temperatura de exaustão. Esta tendência só é revertida na faixa de mistura muito pobre, onde a velocidade de combustão é tão baixa que, com o atraso da ignição, a combustão não estará completa quando a válvula de exaustão abrir [19]. A Figura 2-8 apresenta o nível de emissões de HC em função do λ para diferentes valores de avanço de ignição.

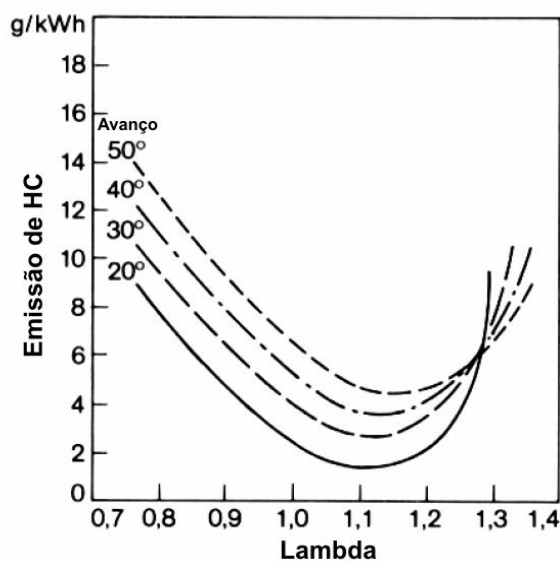


Figura 2-8 – Nível de emissão de HC em função do lambda para diferentes valores de avanço [19].

Os vários tipos de hidrocarbonetos presentes nos gases de exaustão proporcionam níveis diferentes de danos à saúde e ao meio-ambiente. Muitos irritam as mucosas, alguns têm efeito narcótico, enquanto outros são muito tóxicos, como por exemplo o Benzeno. Os HC podem também reagir com o NO_x gerando produtos que são nocivos à camada de ozônio [6].

⁹ Processo no qual combustível evaporado escapa para a atmosfera. Ocorre por exemplo durante abastecimento do veículo, ou devido a falhas no sistema de controle de emissões evaporativas.

¹⁰ Processo no qual gases do cilindro escapam para o cárter através das folgas entre os anéis de vedação do pistão e o cilindro. O sistema de ventilação do cárter tem a função de recircular estes gases de forma a queimá-los.

2.1.3.3 Emissão de NO_x

Durante o processo de combustão, a temperatura muito elevada no interior do cilindro pode favorecer a reação do oxigênio com o nitrogênio, formando NO_x , um produto indesejado da combustão. A quantidade de NO_x produzida depende da temperatura no cilindro e da concentração de oxigênio presente na mistura [6]. Para misturas ricas a concentração de oxigênio na mistura diminui, o que desfavorece a formação de NO_x . Já para misturas pobres ocorre uma queda na temperatura no cilindro, o que diminui a produção de NO_x . Portanto, a maior emissão de NO_x é obtida em torno da região estequiométrica, onde a temperatura é alta e a concentração de oxigênio é intermediária. A influência do avanço de ignição também é importante, já que aumentar o seu valor acarreta maiores temperaturas na câmara de combustão. Deste modo, quanto maior o avanço, maior o NO_x presente na exaustão. A Figura 2-9 mostra o comportamento da emissão de NO_x em função do λ para diferentes valores de avanço de ignição.

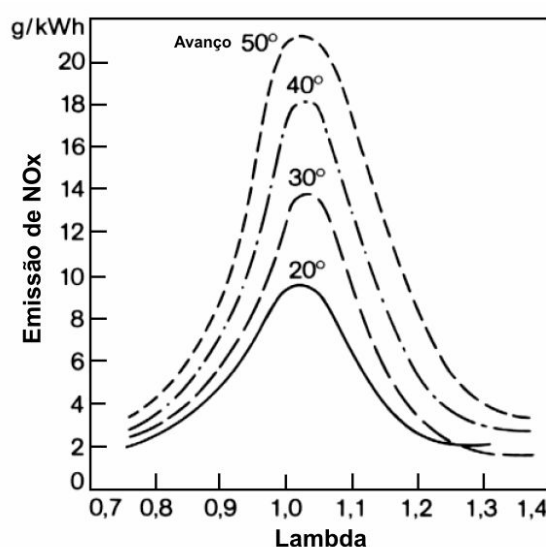


Figura 2-9 – Nível de emissão de NO_x em função do λ para diferentes valores de avanço de ignição [19].

Os principais tipos de NO_x emitidos pelos MCI são o NO e o NO_2 . O NO é um gás inodoro, incolor, e relativamente não tóxico, que na atmosfera é gradualmente transformado em NO_2 . Já o NO_2 é um gás marrom avermelhado, com odor pungente e muito tóxico [19]. Assim como o CO, ele é capaz de reagir com a hemoglobina, interferindo no transporte de oxigênio pelo corpo. Os gases NO_x são também nocivos à camada de ozônio e contribuem para a formação de chuva ácida [3].

2.1.3.4 Conversores Catalíticos

Todos os aspectos apresentados até agora mostram a importância de se controlar a relação ar/combustível e o avanço de ignição nos MCI. Através destes parâmetros é possível estabelecer uma relação de compromisso entre desempenho, emissões e consumo. É importante observar que estes aspectos são conflitantes, de modo que os limites de emissões e consumo acarretam perda de desempenho. Porém, como as leis se referem somente aos gases que saem do cano de descarga, é

possível “tratar” os gases de exaustão do cilindro, de forma que os gases lançados à atmosfera sejam menos nocivos [5]. Para isso, utiliza-se os conversores catalíticos, dispositivos capazes de reduzir as concentrações dos principais gases poluentes em até 90%. Isso significa que os gases expulsos pelos cilindros podem estar até 10 vezes acima dos limites governamentais impostos, o que possibilita calibrar o motor para um melhor desempenho. Esta funcionalidade tornou o conversor catalítico uma peça fundamental nos sistemas de controle de motores.

Os catalisadores desenvolvidos inicialmente foram os oxidantes, também conhecidos como catalisadores de duas vias, por oxidarem CO e HC em CO₂ e H₂O. Como os motores mais antigos, baseados nesta tecnologia, usavam quase sempre mistura rica, era necessária uma fonte de oxigênio, frequentemente suprida por uma bomba de ar conectada ao tubo de exaustão [11]. A eficiência de conversão destes catalisadores sofre grande influência da temperatura. Acima de 300°C aproximadamente 98% de CO e 95% de HC são convertidos. Porém, abaixo desta temperatura a eficiência é muito baixa [5].

Atualmente os catalisadores mais utilizados são os de três vias (*Three Way Catalyst - TWC*), capazes de converter simultaneamente os três principais poluentes. Para que os níveis máximos de eficiência sejam atingidos é necessário que a mistura esteja na região estequiométrica. Além disso, o TWC requer uma temperatura mínima de operação, por volta de 350°C. Abaixo deste valor a eficiência é muito baixa. Diz-se que o catalisador atingiu o *light off* quando a eficiência de conversão de HC alcança 50% [11].

A Figura 2-10 mostra a característica de eficiência de conversão do TWC, para os três gases, em função do λ . Observa-se que quando a mistura é pobre, o excesso de oxigênio favorece a oxidação de CO e de HC, enquanto a redução do NO_x fica prejudicada. Já quando a mistura é rica, a ausência de oxigênio favorece a redução do NO_x e prejudica a oxidação de CO e HC.

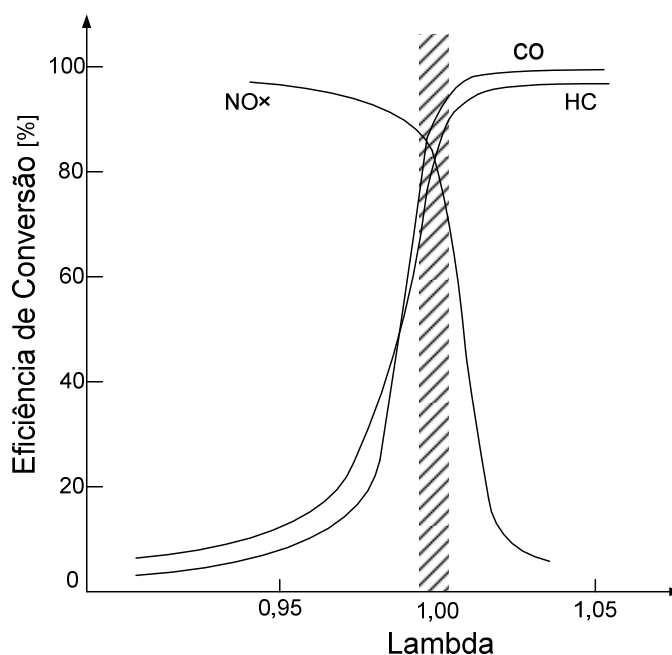


Figura 2-10 – Eficiência de conversão do TWC em função do lambda [6].

Para que níveis elevados de conversão sejam atingidos simultaneamente para os três tipos de poluentes é necessário que a razão ar/combustível seja mantida em uma janela estreita em torno da região estequiométrica [11], [6], [5] e [2]. Como será visto na seção 2.3.1, os controladores de injeção modernos, baseados no controle em malha fechada através do sensor de λ , são capazes de manter a razão ar/combustível em torno do valor estequiométrico, porém com oscilações constantes, que ocorrem devido a limitações do sistema. De acordo com [6], alguns autores consideram as oscilações benéficas para a eficiência do conversor. Porém, seu trabalho mostra que as oscilações melhoram a conversão apenas em temperaturas baixas, diminuindo o tempo de *light off* do conversor. Após o *light off* as oscilações têm, em geral, efeito prejudicial no desempenho do conversor.

No entanto, uma característica dinâmica dos TWC torna o sistema tolerante às oscilações. Esta característica é a capacidade dos conversores de armazenar oxigênio quando há abundância do mesmo (mistura pobre), e de liberá-lo quando há escassez (mistura rica) [6],[11],[10]. Deste modo, a janela de operação ótima fica mais larga, permitindo pequenas oscilações da mistura em torno da região estequiométrica, enquanto se preserva a alta eficiência de conversão [6].

2.1.4 Ações de controle sobre o motor

As seções anteriores permitem concluir que através do fator λ o sistema de controle pode priorizar desempenho, consumo ou emissões. Com mistura ligeiramente rica, na faixa de $0,85 < \lambda < 0,95$, o motor estará próximo da potência máxima. Com 10 a 20% de empobrecimento ($1,1 < \lambda < 1,2$) prioriza-se um menor consumo específico. Se a mistura for empobrecida ainda mais o consumo específico aumenta já que ocorre perda significativa na potência efetiva gerada. Já as emissões de poluentes podem ser minimizadas mantendo o ponto de operação em torno de $\lambda = 1$, condição de máxima eficiência do conversor catalítico. É possível concluir também que o avanço de ignição pode ser aumentado em direção ao ponto de máximo torque (MBT) ou menor consumo específico. Porém, o aumento do avanço acarreta maiores níveis de emissões de HC e NO_x , além de elevar a probabilidade de ocorrência de detonação.

Tanto o fator λ quanto o avanço de ignição são variáveis manipuladas pelo sistema de controle e possibilitam a otimização do funcionamento do motor em cada ponto de operação. Nas seções seguintes serão mostradas estratégias básicas de controle do motor que se baseiam nestas duas variáveis. Mas antes será mostrada de forma sucinta a evolução dos sistemas de controle utilizados em motores de combustão interna.

2.2 Evolução

Os sistemas mecânicos de injeção de combustível começaram a ser desenvolvidos na década de 1950. Em 1954 o veículo esportivo Mercedes-Benz 300 SL foi lançado com um sistema de injeção Bosch, no qual o combustível era injetado em alta pressão diretamente na câmara de

combustão [1]. Em 1957 a General Motors apresentou um sistema de injeção indireta em fluxo contínuo, no qual as válvulas injetoras direcionavam o jato de combustível nas válvulas de admissão de cada cilindro. A massa de combustível injetada era ajustada ao regime de operação do motor. No mesmo ano a Bendix lançou o primeiro sistema eletrônico analógico de injeção de combustível, constituído de um modulador eletrônico e um comutador. De acordo com a condição de operação do motor, o modulador gerava um pulso de comando com uma determinada largura, que acionava a válvula injetora através do comutador, de forma a fornecer a quantidade adequada de combustível. No ano seguinte a Bosch apresentou um sistema mecânico de injeção, no qual a quantidade de combustível que a bomba injetora fornecia para as válvulas injetoras era determinada pela condição de operação do motor. Todos estes novos sistemas apresentaram melhores resultados em relação ao carburador [3].

O controle da emissão dos gases de exaustão começou nos Estados Unidos em 1966, quando as leis no estado da Califórnia entraram em vigor. Desde então, sob a autoridade do EPA¹¹, o governo federal daquele país impôs os limites de emissões a todos os estados e restringiu os padrões progressivamente. Os sistemas de controle tradicionais não eram capazes de respeitar os limites estabelecidos e manter um desempenho satisfatório ao mesmo tempo, o que levou a indústria automobilística a investir em sistemas eletrônicos de controle [5]. Além disso, em 1973 a crise do petróleo levou o governo americano a criar regras para economia de combustível, baseadas na média de consumo dos modelos produzidos por cada montadora. Este requisito ficou conhecido como CAFE¹², e foi mais um motivo para a indústria automobilística adotar os sistemas de controle eletrônicos [5].

Em 1967 a Bosch lançou o D-Jetronic, um sistema eletrônico analógico de injeção de combustível, onde a pressão no coletor de admissão é medida e usada para calcular o tempo de injeção. Em 1973 foi apresentado o K-Jetronic, um sistema mecânico no qual o combustível é continuamente injetado de acordo com a massa de ar admitida pelo motor. Um ano depois foi lançado o L-Jetronic, um sistema de injeção eletrônico analógico que usa um sensor de vazão de ar para calcular o combustível a ser injetado. Este sistema apresenta arquitetura muito mais simples e confiável do que o D-Jetronic, devido ao uso de circuitos integrados. Tanto o K-Jetronic quanto o L-Jetronic disponibilizavam modelos com controle em malha fechada do λ , para atenderem ao mercado norte-americano [20].

Em 1975 iniciou-se o uso de conversores catalíticos para tratar os gases de exaustão dos veículos comerciais, com o objetivo de atingir os limites de emissões. Inicialmente foram usados os catalisadores de duas vias, que oxidavam HC e CO produzindo CO₂ e vapor de água [11]. Quando a legislação passou a regular também o nível de emissões de NO_x, novas pesquisas foram

¹¹ EPA - *Environmental Protection Agency*.

¹² CAFE - *Corporate Average Fuel Economy*.

desenvolvidas e, em 1980, os conversores catalíticos ganharam a habilidade de reduzir NO_x , o que deu origem ao conversor catalítico de três vias (TWC) [10].

Em 1979 a Bosch lançou o Motronic, um sistema digital de gerenciamento do motor que integra os controladores de injeção e ignição em um único módulo. As variáveis medidas são usadas como entradas em mapas que determinam os comandos dos atuadores, o que permite manter o motor funcionando em seu ponto ótimo em todas as condições de operação [2]. A partir deste sistema iniciou-se a era da integração, onde um único módulo, chamado ECU (*Electronic Control Unit*), passou a concentrar as funções de controle de injeção, ignição, marcha lenta, recirculação dos gases de escape, entre outras.

2.3 Controle Eletrônico dos MCI-ICE

A ECU de um MCI-ICE recebe informações dos sensores espalhados pelo motor e calcula os comandos a serem enviados para os atuadores. As principais funções a serem executadas por um sistema de controle deste tipo são:

- Controle de injeção.
- Controle de ignição.
- Controle de marcha lenta.
- Controle da recirculação dos gases de exaustão.
- Controle da pressão de sobre-alimentação.
- Controle da válvula borboleta eletrônica.
- Controle do comando de válvulas variável.
- Controle de tração.

O funcionamento básico de um MCI-ICE requer os controles de injeção, ignição e marcha lenta. O controle de injeção é fundamental, pois garante a quantidade ideal de combustível para manter o motor funcionando em todos os pontos de operação, além de permitir acelerações rápidas e partidas a frio. Já o controle de ignição garante a ocorrência de uma centelha no instante adequado e com energia suficiente para iniciar a combustão da mistura. Por fim o controle de marcha lenta mantém o motor em funcionamento quando a válvula borboleta está totalmente fechada. Os outros controladores são utilizados para ganho de desempenho, melhoria de dirigibilidade e minimização das emissões, sendo empregados em sistemas comerciais e na área de competições automobilísticas. Além destas funções, as ECUs modernas são responsáveis também pelo acionamento de dispositivos como bomba de combustível, ventilador de refrigeração forçada, válvula do canister¹³, entre outros.

¹³ Também conhecida como válvula de ventilação do tanque, permite o reaproveitamento dos vapores de combustível, de forma a respeitar os limites de emissões evaporativas estabelecidos pela legislação.

O escopo deste trabalho envolve o controle básico de um MCI-ICE na condição de marcha lenta, e deste modo apenas os controles de injeção, ignição e rotação de marcha lenta serão abordados. Estes controladores podem ser representados pelo modelo de três estágios apresentado na Figura 2-11 [2]. O enfoque será dado nas estratégias, já que os sensores e atuadores usados foram abordados com detalhes em [15], exceto nos casos onde as características do sensor têm grande influência na malha de controle. No caso do controle de marcha lenta é necessário abordar com detalhes o atuador, pois este não fez parte do trabalho anterior [15].



Figura 2-11 – Modelo de três estágios para os controladores de uma ECU [2].

2.3.1 Controle de Injeção

O objetivo principal do módulo de controle de injeção é manter a relação estequiométrica entre as massas de ar e combustível na mistura admitida pelo cilindro [5]. Como foi visto anteriormente esta condição é necessária para que o TWC tenha máxima eficiência de conversão dos gases de exaustão, o que possibilita atender aos rígidos limites de emissões de poluentes determinados pela legislação [6], [7], [8], [9], [11]. Um diagrama básico deste módulo está apresentado na Figura 2-12.

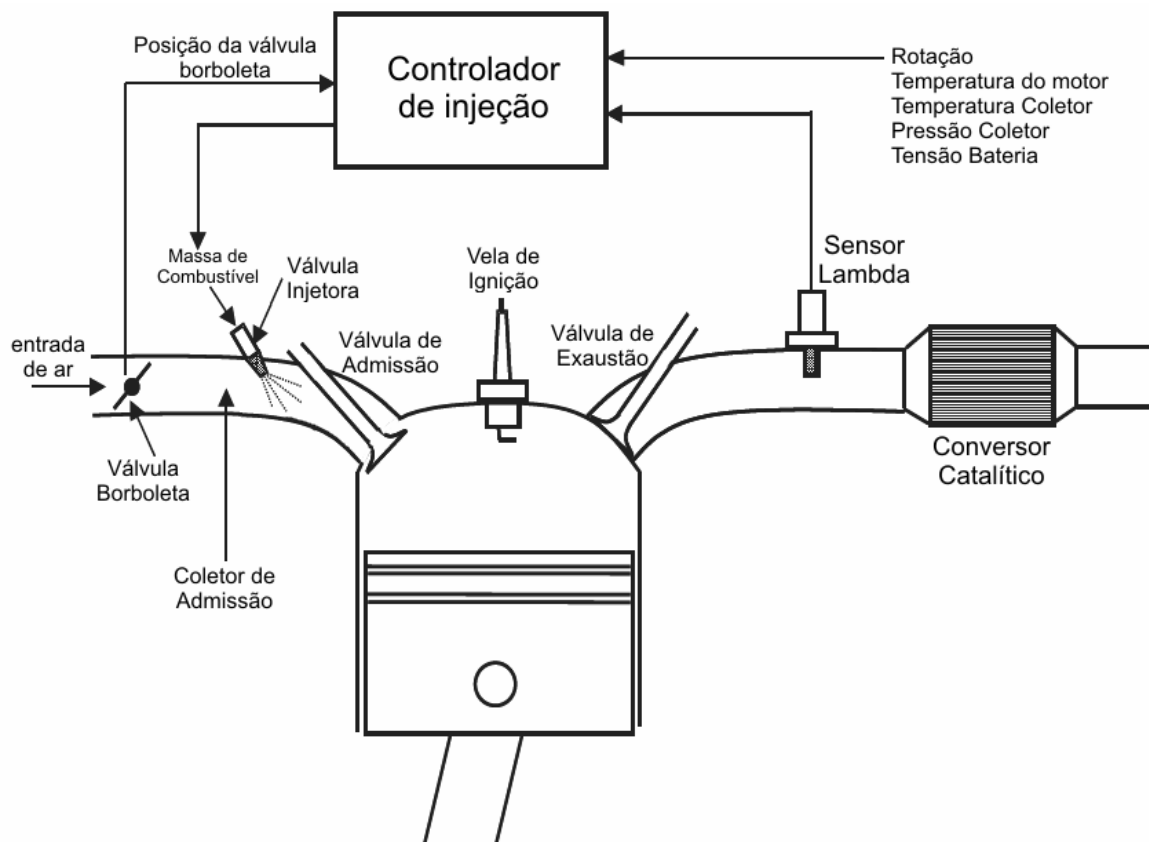


Figura 2-12 – Sistema de controle de injeção típico [6].

O controlador recebe os sinais dos sensores espalhados pelo motor e atua sobre o sistema através da válvula injetora, determinando a massa de combustível injetada. Os sensores informam o ponto de operação do motor, com medidas de rotação e temperatura do motor, pressão e temperatura no coletor de admissão, posição da válvula borboleta e tensão da bateria. Porém, a própria variável controlada não pode ser medida diretamente, o que torna necessária a medição indireta através dos gases de exaustão para obter uma estimativa do valor de λ . Em [2] e [5] encontra-se estratégias de medições para as variáveis citadas além de descrições detalhadas dos sensores. Os sensores e circuitos de condicionamento usados neste projeto não serão abordados, já que são descritos com detalhes em [15]. Porém, devido à sua influência na malha de controle, a estimativa do fator λ será revista.

2.3.1.1 Estimativa do fator λ

O sensor de oxigênio é capaz de medir a concentração de oxigênio nos gases de exaustão, e com base nesta informação é possível estimar o valor real do λ . O sensor mais utilizado atualmente é o EGO (*Exhaust Gas Oxygen*), também conhecido como sonda lambda ou sensor lambda de banda estreita (*Narrow Band Lambda Sensor*), que está apresentado na Figura 2-13. O sensor tem dois eletrodos, um exposto aos gases de exaustão e outro à atmosfera (referência), sendo geralmente feitos de platina, o que lhes conferem propriedades catalíticas. Entre os eletrodos utiliza-se um material cerâmico com capacidade de transferir íons de oxigênio entre eles, geralmente dióxido de zircônio, ZrO_2 [6]. Forma-se uma célula eletroquímica cuja tensão varia com a diferença de pressão parcial de oxigênio entre os dois eletrodos. Como um dos eletrodos fica exposto à referência, a diferença de potencial gerada é uma medida da concentração de oxigênio nos gases de exaustão [10].

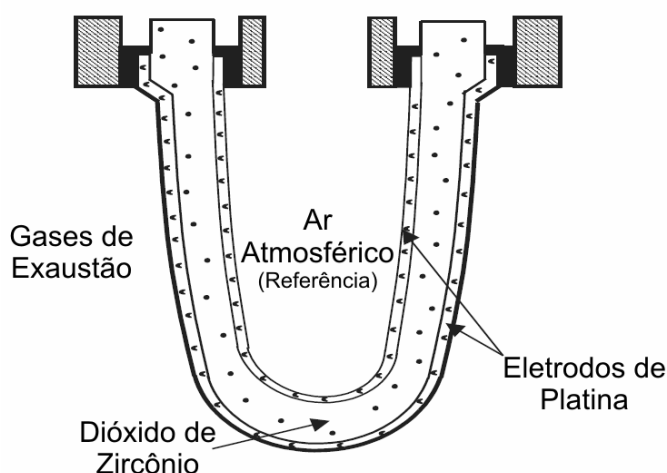


Figura 2-13 – Sensor de oxigênio EGO de zircônia [6].

Quando a mistura ar/combustível está rica ($\lambda < 1$) a concentração de O_2 nos gases de exaustão é baixa e, portanto, a diferença de pressão parcial de oxigênio em relação à atmosfera é alta. Neste caso o EGO gera uma tensão de aproximadamente 900mV em sua saída. Já no caso de

mistura pobre ($\lambda > 1$) a diferença de pressão parcial é menor e deste modo a tensão de saída fica em torno de 100mV [7]. Na condição próxima da estequiométrica ($\lambda = 1$) a tensão de saída é de aproximadamente 450mV mas varia rapidamente quando a mistura se torna rica ou pobre. A curva característica deste sensor está apresentada na Figura 2-14. O sinal gerado pelo EGO é útil apenas para o controle em torno da região estequiométrica, o que é satisfatório para os sistemas convencionais [6].

Outro tipo de sensor de oxigênio é o UEGO (*Universal Exhaust Gas Oxigen*), também chamado de sonda lambda linear ou sensor lambda de banda larga (*Wideband Lambda Sensor*). Este tipo de sensor funciona em malha fechada e por isso requer um controlador eletrônico, que gera uma tensão de saída com a característica apresentada na Figura 2-14. Com este sensor é possível medir o valor exato do λ , o que possibilita o controle da mistura também fora da região estequiométrica. Seu elevado custo ainda limita seu uso em veículos convencionais e torna o EGO o preferido do mercado. Para o leitor interessado, o princípio de funcionamento do UEGO pode ser encontrado em [6].

Ambos os sensores apresentados precisam de uma temperatura de operação acima de 400°C para que sua saída possa ser considerada válida. Deste modo, a maioria dos sensores usados atualmente são pré-aquecidos (HEGO – *Heated Exhaust Gas Oxigen*) para que a temperatura de trabalho seja atingida mais rapidamente e a medição possa ser usada pelo sistema de controle [7].

Os sensores lambda não respondem instantaneamente às alterações na composição da mistura ar/combustível. Além de apresentarem constante de tempo na ordem de 100ms, a Figura 2-12 mostra que um atraso de tempo ocorre entre a injeção do combustível no coletor de admissão e a medição da concentração de O_2 no duto de exaustão [7]. Estas questões serão importantes quando o controle em malha fechada for abordado.

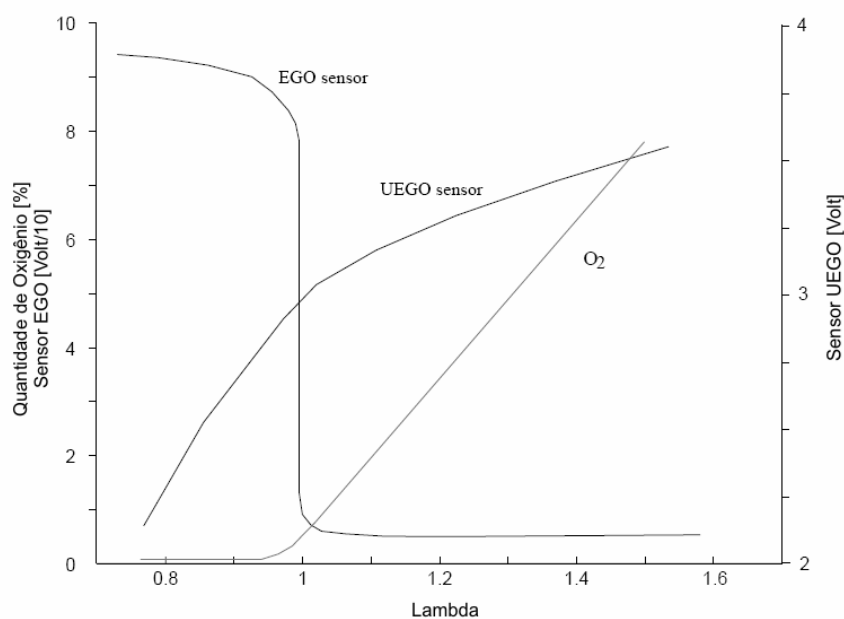


Figura 2-14 – Curvas características dos sensores de oxigênio EGO e UEGO e concentração de O_2 na exaustão [7].

2.3.1.2 Injeção de combustível

O módulo de controle de injeção atua sobre o sistema através da válvula injetora, que permite o controle da massa de combustível injetada no coletor. Como a diferença de pressão entre a linha de combustível e o coletor é mantida constante, a quantidade mássica injetada depende apenas da duração da abertura da válvula [15]. Desta forma, a partir da informação da massa de ar admitida, o módulo de controle é capaz de calcular a largura do pulso de comando dos injetores, que corresponda à injeção da massa de combustível exata para uma mistura estequiométrica. Porém, alguns fatores devem ser levados em conta. A variação da corrente no injetor depende da tensão na bateria, o que pode gerar uma variação no tempo de atraso de abertura da válvula e uma conseqüente alteração na massa injetada para um mesmo tempo de comando gerado pelo módulo. Neste caso, a informação de tensão na bateria é importante para compensar este fator. Além disso, parte do combustível injetado condensa nas paredes do coletor e não entra no cilindro, fato que ocorre principalmente quando o motor está frio. Somente depois o combustível condensado evapora contribuindo para a massa admitida [8], [9], [13]. Outros fatores complexos fazem com que as queimas nunca sejam idênticas, devido à ocorrência de variações na atomização do combustível e na distribuição da mistura na câmara de combustão, além de fenômenos de ignição espontânea, presença de gases residuais na câmara e diferenças entre cilindros, por exemplo. Deste modo, mesmo que o controlador calcule a massa exata de combustível a ser injetada para uma mistura estequiométrica, a combustão pode não ser completa devido a fatores complexos, o que torna ainda mais importante a realimentação através do sensor de λ .

2.3.1.3 Modos de controle

Um sistema de controle de injeção típico, formado por sensor EGO e catalisador TWC, não atua sempre em malha fechada. Situações como partida a frio, aquecimento do motor, aceleração e desaceleração rápidas exigem mistura diferente da estequiométrica e, portanto, o sensor EGO não pode ser usado para controlar a mistura, o que leva a uma atuação em malha aberta [2], [20]. Além disso, quando se deseja um controle na região estequiométrica é necessário que o EGO esteja em sua temperatura de trabalho para fornecer medições corretas, caso contrário adota-se também o controle em malha aberta. Deste modo os sistemas de controle típicos possuem sete modos de atuação [5], que dependem das condições de operação do motor, sendo apresentados a seguir.

- Partida do motor;
- Aquecimento do motor;
- Controle da mistura em malha aberta;
- Controle da mistura em malha fechada;
- Aceleração rápida
- Desaceleração;
- Marcha lenta;

A seguir apresenta-se uma breve descrição sobre estes modos de atuação para um sistema típico com sensor EGO, válvula eletro-injetora e catalisador TWC. O controle de marcha lenta será abordado na seção 2.3.3.

2.3.1.4 Partida do motor

A baixa temperatura do motor durante a partida afeta a capacidade de atomização do combustível e a formação de uma mistura ar/combustível uniforme, o que diminui a eficiência da combustão. Além disso, parte do combustível se condensa nas paredes do coletor e nem mesmo entra no cilindro. Deste modo a combustão durante a partida do motor fica prejudicada o que torna necessária a injeção de uma quantidade maior de combustível [2], [5], [20]. Como estes efeitos se agravam para temperaturas mais baixas, os sistemas em geral usam a medição da temperatura do motor como entrada em uma tabela que fornece a razão ar/combustível adequada para esta condição [2]. Quanto mais frio estiver o motor, maior será a massa de combustível injetada. Através da medição direta ou da estimação da vazão mássica de ar o controlador pode calcular a quantidade de combustível a ser injetada, o que corresponde a uma atuação em malha aberta [5]. As ECUs típicas selecionam este modo de operação sempre que o motor é ligado, permanecendo nele até que uma rotação adequada seja atingida. É importante ressaltar que o principal objetivo de controle neste caso é a garantia de uma partida rápida e confiável, sendo que as emissões e o consumo ficam prejudicados [5].

2.3.1.5 Aquecimento do motor

Após a partida do motor o sistema automaticamente entra no modo de aquecimento, onde uma mistura rica ainda é necessária para compensar os efeitos da baixa temperatura. Assim como no modo de partida, o controlador obtém a razão ar/combustível a partir de uma tabela em função da temperatura do motor. À medida que o motor esquenta, a massa de combustível injetada vai sendo reduzida, e a razão ar/combustível vai se aproximando da estequiométrica [5], [20]. Quando o sistema entra neste modo, o tempo de aquecimento necessário é calculado com base na temperatura do motor. O objetivo de controle neste modo de operação é o aquecimento rápido com funcionamento suave do motor, ficando a economia de combustível e a redução das emissões em segundo plano [5]. Este período é crítico para as emissões de poluentes e por isso deve durar o mínimo possível.

2.3.1.6 Controle em malha aberta

Após a partida e o aquecimento do motor até uma temperatura adequada, o sistema finalmente passa a regular a mistura em torno da região estequiométrica, para minimizar emissões e consumo, além de proporcionar um bom desempenho [2], [20]. Como foi visto anteriormente, o controle em malha fechada pode ser usado somente quando o sensor EGO está com a temperatura adequada de operação, de forma a gerar medições corretas. Caso esta condição não seja satisfeita o sistema atua em malha aberta, sem a correção gerada pela realimentação do sensor EGO. Neste

caso a massa de combustível a ser injetada é calculada a partir da vazão mássica de ar medida e da razão ar/combustível desejada, como mostra a equação 2.2 [2], [5].

$$\dot{m}_{comb} = \frac{(\dot{m}_{ar})_{medida}}{A/F_{desejada}} \quad 2.2$$

A equação 2.2 fornece a vazão mássica de combustível (Kg/s) que deve ser injetada. Dividindo pela rotação medida obtém-se a massa de combustível por ciclo que deve ser injetada. Por fim divide-se pela vazão do bico injetor (Kg/s) para se obter o tempo de injeção que deve ser aplicado, como mostra a equação 2.3.

$$TempoInjeção = \frac{\dot{m}_{comb}}{(Rotação \times \dot{m}_{bico})} \quad 2.3$$

Esta estratégia requer um sensor de vazão mássica de ar. Um método alternativo usa medidas de pressão no coletor, temperatura do ar de admissão e rotação para estimar o valor da vazão mássica de ar. Este método parte do princípio de que a vazão mássica de ar é igual a vazão volumétrica de ar multiplicada pela densidade do ar, como mostra a equação 2.4 [2], [5].

$$\dot{m}_{ar} = \dot{v}_{ar} \times \rho_{ar} \quad 2.4$$

A vazão volumétrica é determinada de maneira aproximada considerando-se que o motor atua como uma bomba ideal de ar durante a admissão. Neste caso, um volume de ar igual à metade da cilindrada total¹⁴ do motor é admitido em cada rotação do eixo. Multiplicando pelo número de voltas por segundo obtém-se a vazão volumétrica de ar ideal. Porém, como o motor não é uma bomba ideal, deve-se considerar sua eficiência volumétrica¹⁵, que mede a eficiência de aspiração do motor. Deste modo, a vazão volumétrica de ar pode ser estimada pela equação 2.5 [2], [5].

$$\dot{v}_{ar} = \frac{Rotação}{60} \times \frac{V_{cilindrada}}{2} \times \eta_{Volumétrica} \quad 2.5$$

A eficiência volumétrica de um motor varia com a rotação e com a pressão no coletor para cada ponto de operação. Os sistemas baseados nesta estratégia geralmente possuem um mapa que gera o valor de eficiência volumétrica em função da rotação e da pressão no coletor [5]. Por fim é necessário determinar a densidade do ar, o que é feito através da equação dos gases ideais, a partir das medições de pressão e temperatura no coletor, de acordo com a equação 2.6 [14], onde R corresponde à constante universal dos gases ideais.

$$\rho_{ar} = \frac{m_{ar}}{V_{coletor}} = \frac{pres_{coletor}}{(R \times temp_{coletor})} \quad 2.6$$

Deste modo, com base nas medições de pressão e temperatura no coletor é possível estimar a vazão mássica de ar admitida e calcular o tempo de injeção necessário para a obtenção de uma

¹⁴ É o volume de um cilindro compreendido entre o PMS e o PMI, multiplicado pelo número de cilindros do motor.

¹⁵ É a relação entre a massa de mistura ar/combustível aspirada por um cilindro e a massa de mistura que ocuparia o volume do cilindro nas condições ambientes de pressão e temperatura [44].

mistura estequiométrica. Este método é conhecido como “*speed density*”, pois se baseia na densidade do ar e na vazão volumétrica obtida a partir da rotação [2], [5], [14]. Muitos sistemas comerciais utilizam o “*speed density*” ao invés da medição direta, com o objetivo principal de reduzir custos. É importante observar que na prática os sistemas de controle convencionais usam mapas e tabelas ao invés de calcular diretamente as equações apresentadas [5].

O modo de controle em malha aberta é mantido até que o sensor EGO esteja apto a fornecer medições corretas. Uma das estratégias de verificação desta condição é manter a mistura ligeiramente rica e monitorar a tensão de saída do sensor até que ela supere um valor mínimo, indicando que o sensor detectou a mistura rica. Neste caso o sistema passa a atuar em malha fechada usando as medidas do EGO [5].

A eficiência do controle em malha aberta diminui à medida que os componentes do sistema se desgastam, o que altera os parâmetros considerados inicialmente. Este tipo de estratégia também não é capaz de perceber efeitos complexos, como baixa atomização do combustível e condensação nas paredes do coletor, por exemplo. Somente com as informações geradas pelo EGO é possível verificar se a mistura realmente está na região estequiométrica.

2.3.1.7 Controle em malha fechada

Após o aquecimento do motor e do sensor de lambda, o sistema está apto a atuar em malha fechada. Neste modo a mistura ar/combustível é corrigida com base na medição do EGO, que indica se a mistura está rica ou pobre. Além da realimentação do EGO, os sistemas típicos usam também uma ação direta (*feedforward*) que calcula o tempo de injeção base, sobre o qual se aplica a correção de malha fechada [5], [2], [20]. A ação direta pode ser baseada em um controlador *speed density* ou em mapas de calibração.

Dois fatores principais dificultam o controle em malha fechada da razão ar/combustível. O primeiro deles é o atraso de tempo devido ao transporte dos gases do coletor até o duto de exaustão. Este atraso é inversamente proporcional à rotação [9], [7], [14]. Um atraso adicional é gerado pelo tempo de resposta do sensor EGO, por volta de 100ms [10]. Ambos contribuem com ação instabilizadora na malha de controle [16]. O segundo fator a dificultar o controle é a curva característica do sensor EGO, apresentada na Figura 2-14. Observa-se que o EGO é capaz de informar apenas se a mistura está rica ou pobre, ou seja, não é possível saber o valor do erro em relação à mistura estequiométrica.

Diante destes fatores, a utilização de um controlador clássico, como o proporcional-integral (PI), leva ao controle por ciclo-limite (*limit-cycle controller*), no qual a variável controlada oscila em torno da referência, com uma determinada frequência e amplitude [5], [7]. A Figura 2-15 apresenta um esboço do controle de lambda em malha fechada usando sensor EGO e um controlador apenas integral.

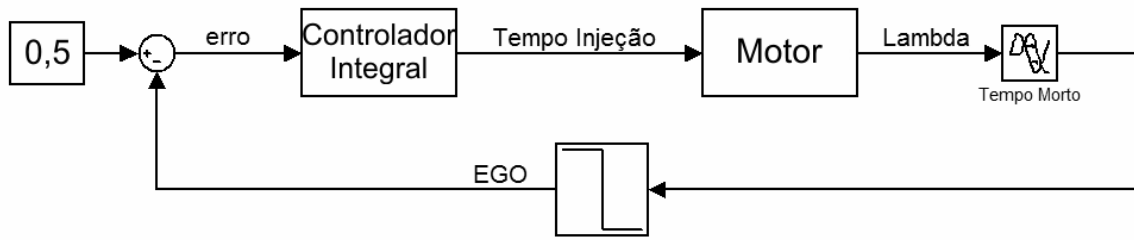


Figura 2-15 – Esboço do controle de lambda em malha fechada usando EGO [7].

Considerando-se o modelo do motor como sendo apenas o atraso de tempo de transporte dos gases com valor fixo de 1 segundo, e o EGO como uma chave binária com saída 0 para mistura pobre e 1 para mistura rica, obtém-se o comportamento apresentado na Figura 2-16. Neste modelo simplificado a referência de mistura estequiométrica corresponde ao valor de 0,5 para a medição do EGO, sendo que a curva característica deste sensor faz com que o erro seja sempre -0,5 se a mistura estiver rica ou 0,5 se estiver pobre. Deste modo, o controlador com ação puramente integral gera sempre uma ação de controle em forma de rampa.

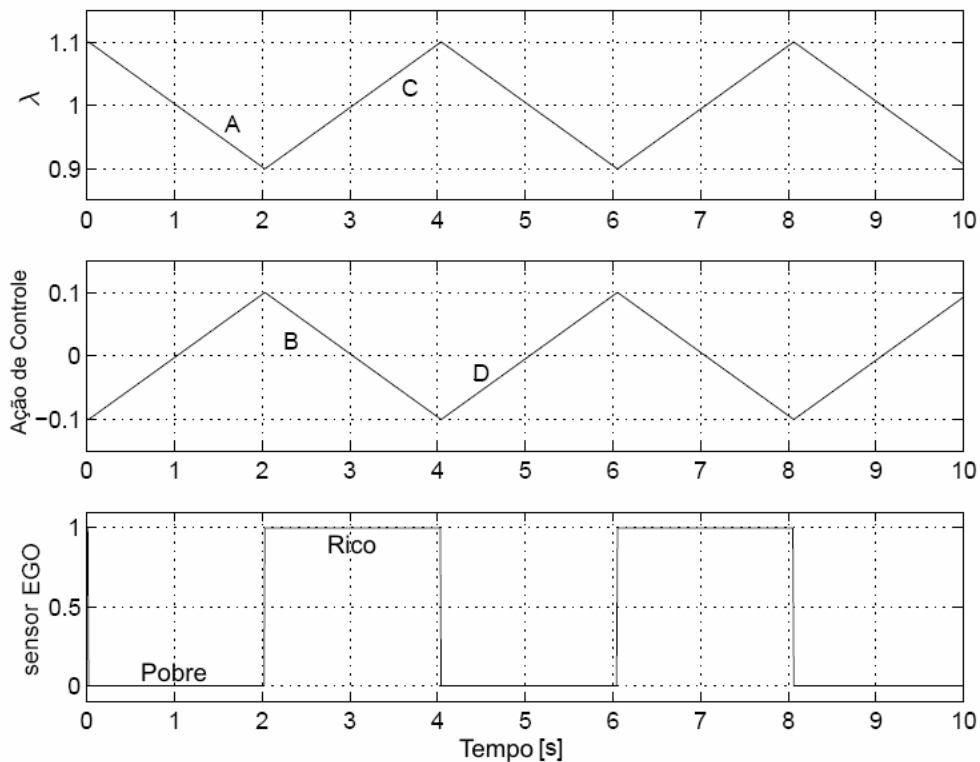


Figura 2-16 – Comportamento de ciclo limite apresentado pelo controle de lambda com sensor EGO e controlador integral [7].

Inicialmente o sensor EGO indica mistura pobre, o que faz o controlador aumentar a ação de controle linearmente. No instante 'A' a mistura já está rica, porém ainda não pode ser medida pelo EGO devido ao atraso de 1 segundo para transporte dos gases, o que faz o controlador continuar enriquecendo a mistura. Somente em 'B' a mistura rica alcança o EGO que faz o controlador iniciar o empobrecimento. Em 'C' a mistura já está pobre, mas sua influência só alcança o EGO em

‘D’, quando o controlador inicia novamente o enriquecimento. Observa-se que o controle apresenta um ciclo com período igual a quatro vezes o atraso de tempo do sistema, e deste modo a frequência de oscilação é dada pela equação 2.7.

$$f_{CL} = \frac{1}{(4 \times t_{atraso})} \quad 2.7$$

Quanto menor o atraso de tempo maior é a frequência do ciclo limite. Como o atraso de tempo é inversamente proporcional à rotação, conclui-se que a frequência de oscilação do lambda é proporcional à rotação. Já a amplitude do ciclo limite é proporcional ao ganho integral do controlador e ao atraso de tempo [5], [7]. Teoricamente, diminuindo o ganho do controlador seria possível manter o lambda mais próximo do estequiométrico, porém, é importante observar que este modelo é apenas uma referência para explicar o comportamento do controlador. Efeitos dinâmicos e perturbações não são considerados e por isso na prática um ganho muito baixo acarretaria em prejuízo para a resposta dinâmica. Deste modo é necessário manter um compromisso entre a amplitude das oscilações e a resposta dinâmica do sistema [7].

Ao invés do controlador apenas com ação integral pode-se usar um PI, que proporciona resposta com maior frequência de oscilação, porém com a mesma amplitude. A idéia consiste em usar uma ação proporcional ao erro para fazer com que a mistura volte mais rapidamente para a região estequiométrica quando a medição do EGO mudar de estado.

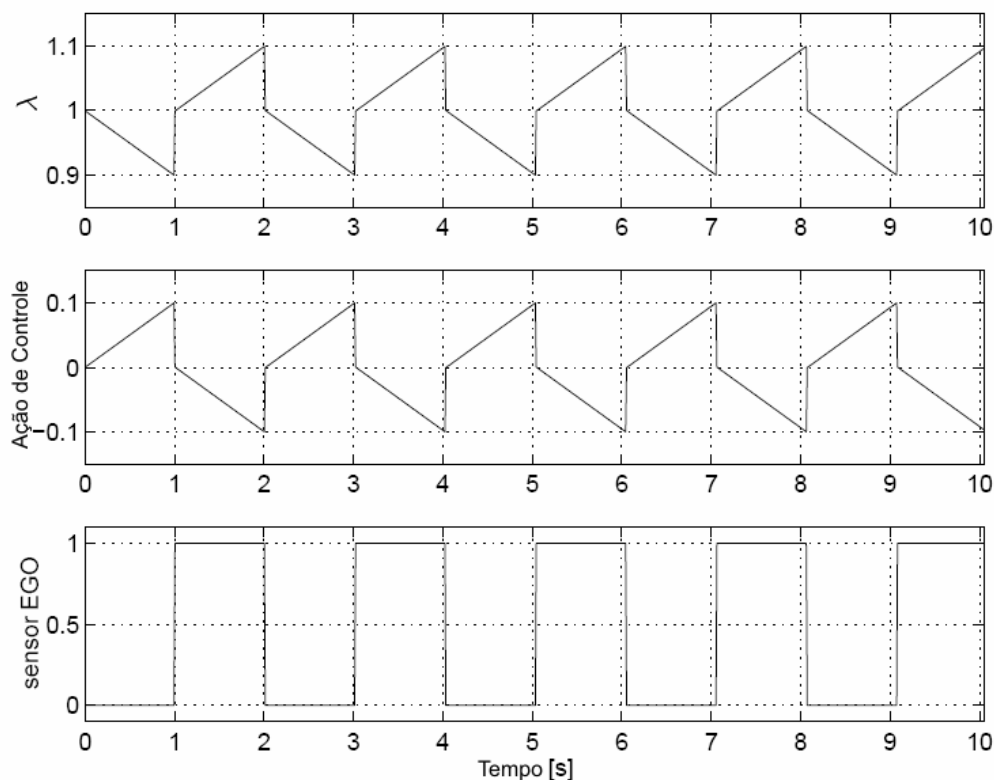


Figura 2-17 – Comportamento de ciclo limite apresentado pelo controle de lambda com sensor EGO e controlador proporcional integral [7].

No caso do modelo simplificado apresentado, é possível selecionar o ganho proporcional de forma que a ação de controle volte para zero sempre que o EGO mudar de estado. Isso é alcançado escolhendo o ganho proporcional igual à amplitude de oscilação [7]. Como o erro é sempre -0,5 ou 0,5 então uma mudança no estado do sensor EGO vai causar uma variação igual à amplitude na ação proporcional, fazendo com que a ação de controle volte para zero. A Figura 2-17 apresenta o comportamento de um sistema com este tipo de estratégia. Observa-se que a amplitude se mantém enquanto a frequência é duas vezes maior. É importante observar que este comportamento corresponde ao modelo simplificado, baseado em um sistema contínuo, portanto na prática resultados diferentes devem ser obtidos, porém sem fugir à idéia principal apresentada aqui.

As características não-lineares do sistema e do sensor, aliadas ao significativo atraso de tempo entre atuação e medição, fazem com que a malha de controle de lambda com PI clássico apresente oscilações constantes. Para manter o lambda dentro de uma região de tolerância em torno do valor estequiométrico é necessário limitar os ganhos do controlador, o que faz cair 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 fica responsável por rejeitar as perturbações constantes de carga e rotação no sistema. Conclui-se que a malha de realimentação de lambda tem como função principal corrigir os erros estacionários, enquanto a ação *feedforward* se encarrega de proporcionar um bom desempenho dinâmico.

O controle em malha fechada é abandonado em condições de carga e rotação elevadas, acelerações e desacelerações rápidas, situações nas quais se deseja mistura fora da região estequiométrica [2], [5], [20]. Nestes casos o sistema passa a atuar em malha aberta apenas.

No caso de 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. Como exemplo, pode-se adotar qualquer valor de enriquecimento em situações de carga e rotação elevadas, de acordo com as condições do motor, bastando alterar a referência da malha fechada. A característica aproximadamente linear do sensor UEGO permite a utilização de ganhos mais elevados para o controlador PI, o que melhora sua resposta dinâmica em relação ao controle baseado no EGO. Porém ainda existe a limitação do tempo morto elevado na malha, de forma que a banda passante permanece limitada e não permite respostas satisfatórias durante variações rápidas do ponto de operação do motor. Deste modo o desempenho dinâmico ainda é garantido pela ação *feedforward*.

2.3.1.8 Aceleração rápida

Durante situações de aceleração rápida ou de carga e rotação elevada, o controle de injeção é ajustado para proporcionar uma mistura rica de forma a priorizar o torque do motor em detrimento à economia de combustível e ao controle de emissões. Esta condição de enriquecimento é permitida pela legislação na medida em que é apenas temporária [5], [20].

O sistema detecta estas condições através da medição de posição da válvula borboleta ou pela pressão no coletor. O controlador responde aumentando a largura do pulso de injeção durante a aceleração. Este enriquecimento possibilita ao motor operar com torque maior do que o permitido quando as emissões e o consumo são controlados [5].

2.3.1.9 Desaceleração rápida

Durante situações de desaceleração rápida ou de baixa carga com alta rotação, é necessária uma mistura pobre para reduzir as emissões de HC e CO. Estas condições são detectadas através da medição do ângulo da válvula borboleta ou pela pressão no coletor, e fazem com que o controlador reduza a largura do pulso de comando de injeção de forma a empobrecer a mistura [20]. Em alguns sistemas adota-se o corte total de combustível, situação conhecida como *cut-off* [5].

2.3.2 Controle de Ignição

O módulo de controle de ignição tem como objetivo principal iniciar a reação de combustão da mistura ar/combustível através da aplicação de uma centelha. É responsabilidade do módulo de ignição aplicar a centelha no cilindro correto, no instante exato e com energia mínima suficiente para iniciar a combustão, em todos os pontos de operação do motor.

2.3.2.1 Energia da centelha

Aproximadamente 0,2mJ de energia são necessários para iniciar a combustão de uma mistura estequiométrica. No caso de misturas ricas ou pobres, com alta turbulência, a energia mínima necessária pode chegar a 4mJ [2],[19]. Caso a centelha aplicada não tenha energia suficiente, a ignição não ocorrerá e a mistura pode não entrar em combustão, o que resulta em falha na queima (*misfiring*). A falha na queima implica em maiores emissões, elevado consumo, perda de potência, além de acarretar danos ao conversor catalítico [19]. Deste modo, os sistemas de controle modernos adotam a estratégia de ignição com energia constante, em detrimento aos antigos sistemas com *duty cycle* constante, de forma a atender os critérios de emissões e desempenho [2].

A energia da centelha está diretamente relacionada à energia magnética armazenada na bobina de ignição, que depende do tempo de carga, também chamado de tempo de permanência (*dwell time*). Portanto, o módulo de ignição deve garantir que o pulso de comando dure o tempo necessário para o armazenamento da energia mínima na bobina. A estratégia usual consiste em aplicar um mesmo tempo base de comando, que garanta a saturação de energia magnética na bobina, em todas as condições de operação do motor. Deste modo, nos sistemas convencionais a largura do pulso de ignição não é usada como variável de otimização do motor, mas apenas como um parâmetro que é configurado de forma a garantir a energia mínima necessária para acarretar o início da combustão. Uma compensação em função da tensão na bateria deve ser feita sobre o pulso base para corrigir eventuais oscilações de tensão, que afetam diretamente o tempo de carga da bobina e, portanto, alteram a energia armazenada.

2.3.2.2 *Avanço de Ignição*

O instante de aplicação da centelha corresponde ao ângulo de avanço de ignição, introduzido na seção 2.1.2. Como foi mostrado, esta variável é de fundamental importância no processo de otimização do motor, pois influencia diretamente o desempenho, o consumo e as emissões. O avanço de ignição ideal varia de forma complexa em função das condições de operação do motor e, deste modo, a estratégia de controle mais usada se baseia em mapas de calibração [2], [5]. O avanço ideal para cada ponto de operação de um motor é obtido através de ensaio dinamométrico, no qual são medidos torque, consumo e emissões. Como foi mostrado na seção 2.1.2 o avanço de ignição pode ser elevado até o ponto de torque máximo (MBT). Aumentando-se ainda mais o avanço obtém-se o menor consumo específico. Porém, na seção 2.1.3 foi visto que o aumento do avanço acarreta em maiores emissões de NO_x e HC. Considerando-se motores equipados com conversor catalítico de três vias (TWC) e controle eletrônico de injeção, é possível calibrar o avanço para máximo torque ou menor consumo, sem exceder os limites de emissões [5]. A estratégia usual consiste em calibrar o avanço para o máximo torque.

No entanto, o aumento do avanço de ignição em busca do ponto de máximo torque é limitado pelo fenômeno da detonação. Como foi visto na seção 2.1.2, este fenômeno ocorre quando a mistura ainda não queimada não suporta as condições de elevada temperatura e pressão no interior do cilindro e entra em combustão espontânea. Vários fatores acarretam condições severas de temperatura e pressão no interior do cilindro, e de forma indireta favorecem a ocorrência de detonação, como por exemplo, elevada taxa de compressão, baixa capacidade de dissipação de calor do sistema de arrefecimento, avanço de ignição elevado, etc. [3], [21]. Outros fatores importantes são a baixa octanagem¹⁶ do combustível, e a carbonização da câmara de combustão, que pode ao longo do tempo elevar a taxa de compressão do motor, além de criar zonas de acúmulo de calor [21], [17]. A variação na concentração espacial da mistura no cilindro, e os efeitos da turbulência no movimento dos gases também influenciam na ocorrência da detonação [22], o que torna complexa a tarefa de prever a ocorrência deste fenômeno.

A estratégia de controle em malha aberta, através da adoção de margens de segurança nos mapas de calibração de avanço, acarreta elevado consumo de combustível e baixo desempenho. Isso ocorre por que a complexidade do fenômeno requer margens de segurança elevadas, o que implica em valores de avanço de ignição muito abaixo do ponto de MBT [20]. Assim o controle em malha fechada é a estratégia mais difundida.

2.3.2.3 *Identificação de detonação*

O controle em malha fechada da ignição requer alguma estratégia de identificação de detonação. Os métodos usados se baseiam na detecção das oscilações de pressão em frequências características geradas pelo fenômeno, como foi abordado na seção 2.1.2. A medição direta da

¹⁶ É um índice que mede a capacidade dos combustíveis de resistir à detonação [44].

pressão no interior da câmara de combustão proporciona o melhor sinal para análise e detecção de detonação, com alta relação sinal/ruído. Porém, esta estratégia requer um sensor de pressão para cada cilindro, sendo que cada sensor possui custo elevado, já que deve resistir a condições severas de funcionamento, com picos de até 50 bar e 3000°C durante a compressão [20]. O custo elevado faz com que este tipo de medição seja mais usado em centros de pesquisa e desenvolvimento. As oscilações de pressão podem ser medidas também de forma indireta através das vibrações estruturais do motor. Esta estratégia geralmente requer apenas um sensor do tipo acelerômetro piezoelétrico¹⁷ instalado no bloco do motor, como mostra a Figura 2-18. A utilização desta estratégia proporciona baixo custo e maior flexibilidade, porém requer um processamento mais rigoroso do sinal, devido à sua contaminação por outras fontes de vibração, como válvulas e eixos, principalmente em altas rotações, onde a relação sinal/ruído diminui [17], [22].

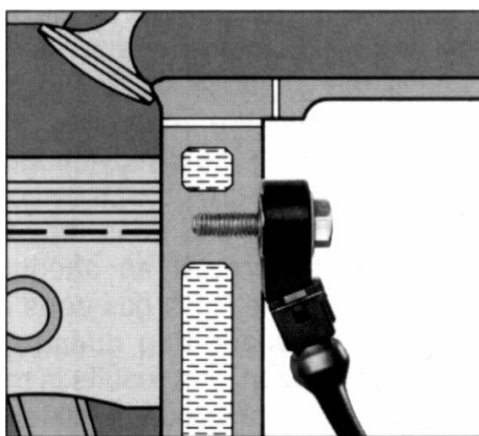


Figura 2-18 – Sensor de detonação fixado ao bloco do motor [3].

Dois tipos de sensores de vibração são usados atualmente, os ressonantes e os de banda larga. Os sensores ressonantes são capazes de, mecanicamente ou eletronicamente, amplificar vibrações em uma faixa limitada de frequências, que deve corresponder à faixa excitada pela detonação. Este método é limitado, já que cada tipo de motor vai exigir um sensor com faixa de passagem diferente. Os sensores de banda larga não possuem faixa limitada de operação, e deste modo trabalham 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 característica seja detectada no sinal [17]. A Figura 2-19 mostra um sinal de vibração estrutural do motor obtido com um sensor de detonação durante a ocorrência do fenômeno.

Os sistemas de identificação de detonação devem executar algum tipo de condicionamento do sinal antes da estratégia de identificação. Deve ser extraída a informação sobre a potência espectral do sinal na frequência excitada pela detonação. Métodos de filtragem analógica são os mais usados atualmente, porém, a adoção de técnicas digitais baseadas na Transformada Rápida de

¹⁷ Transdutor que gera uma tensão elétrica em sua saída ao sofrer deformações. Muito usado para medição de vibrações [50].

Fourier (*Fast Fourier Transform* - FFT) tem ganhado espaço à medida que o custo dos processadores vem caindo [17]. A estratégia final de identificação compara a informação gerada pelo estágio de condicionamento com uma referência de forma a determinar a ocorrência ou não do fenômeno. O limiar de detonação pode ser corrigido por uma estratégia adaptativa, de forma a compensar a queda na relação sinal/ruído, que ocorre com o aumento da rotação. O leitor interessado pode obter mais informações sobre a identificação de detonação em [17].

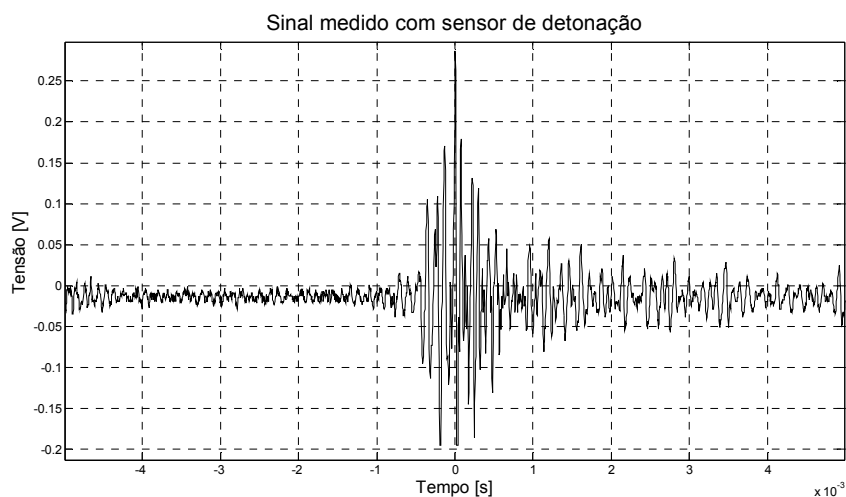


Figura 2-19 – Sinal de vibração estrutural do motor medido com sensor de detonação durante a ocorrência do fenômeno [17].

2.3.2.4 Estrutura do controlador

O módulo de controle de ignição dos sistemas convencionais apresenta basicamente a arquitetura mostrada na Figura 2-20. Seu objetivo final consiste em manter a energia da centelha constante e adequada para garantir a queima da mistura, e controlar o avanço de ignição próximo do ponto de maior torque, mantendo o nível de detonação pequeno, condição conhecida como LDI¹⁸.

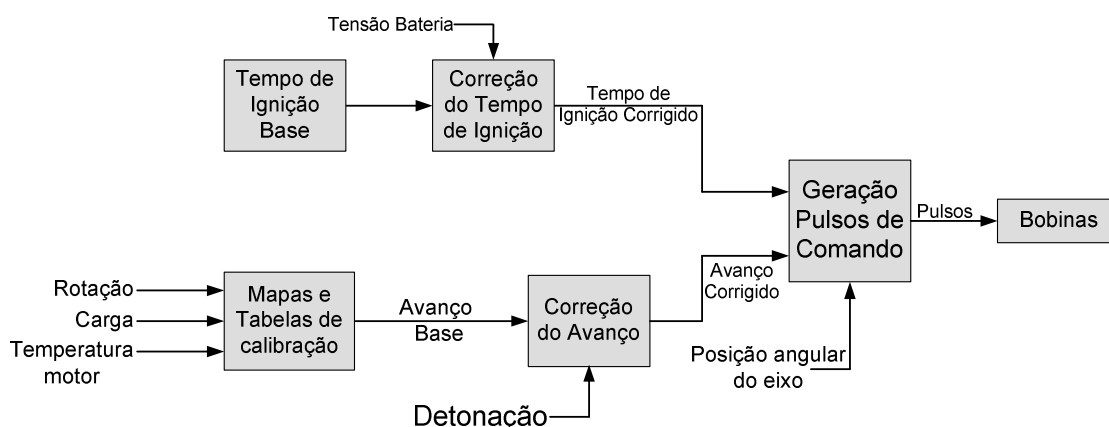


Figura 2-20 – Diagrama de um sistema de controle de ignição típico.

¹⁸ Limite de Detonação Inferior (LDI): condição de operação do motor na qual um nível relativamente pequeno de detonação é aceitável e benéfico para o desempenho do sistema.

O controle da energia da centelha é feito a partir de um valor base de duração do pulso de ignição, que é corrigido em função da tensão medida na bateria, o que permite ao módulo calcular a duração correta do pulso de comando para que a energia seja sempre igual. O controle do avanço consiste em uma ação *feedforward*, baseada em mapas de calibração, e uma realimentação através da informação de ocorrência de detonação. A ação *feedforward* utiliza as medições de rotação, carga e temperatura do motor para, através de mapas e tabelas, gerar um avanço base de ignição [2], [5]. Este avanço base obtido dos mapas é calibrado de forma que o motor esteja no LDI, ou seja, com o torque máximo possível antes da ocorrência elevada de detonação.

O estágio de correção do avanço recebe a informação do estágio de identificação de detonação 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 o fenômeno pára de ocorrer, o avanço é aumentado em pequenos passos até retornar ao valor do mapa [20], [19], [2], [5]. Como a detonação varia entre os cilindros, o controle individual permite limitar o avanço apenas nos cilindros onde o fenômeno está ocorrendo, permitindo que os outros operem em seu ponto ótimo. Deste modo obtém-se o melhor desempenho do motor e o menor consumo [20],[19]. Não é objetivo do presente trabalho abordar todo o processo de ignição, apenas os aspectos importantes para o sistema de controle. Mais detalhes sobre o sistema de ignição podem ser obtidos em [2], [5], [15], [19], [20].

2.3.3 Controle de Marcha Lenta

A condição de operação em marcha lenta ocorre quando o motor se encontra em baixa rotação e a válvula borboleta está fechada, sendo necessário proporcionar uma passagem de ar para o coletor de admissão de forma a manter o motor funcionando. Esta condição de funcionamento tem grande importância, pois é responsável por até 30% do consumo total de combustível do veículo quando este opera em tráfego urbano [20]. Deste modo, para reduzir o consumo é necessário manter a mais baixa rotação de marcha lenta possível, que proporcione o funcionamento suave do motor e a capacidade de suportar os transitórios de carga aplicados em seu eixo [5], [20]. Para alcançar estes objetivos utiliza-se o controle da rotação em malha fechada.

2.3.3.1 Estrutura do controlador

O módulo de controle de marcha lenta manipula a vazão de ar no coletor de admissão e o avanço de ignição para regular a rotação. A malha de vazão de ar depende da dinâmica relativamente lenta de enchimento do coletor de admissão, o que acarreta em um atraso entre a variação na vazão de ar e a geração de torque. Deste modo a banda passante desta malha fica limitada. Por outro lado, o avanço de ignição é capaz de gerar variações bem mais rápidas no torque, de forma que a banda passante desta malha pode ser maior. No entanto, a rotação apresenta um acoplamento estático maior com a vazão de ar e, portanto, esta variável é considerada mais importante no controle de marcha lenta, sendo o avanço utilizado apenas para melhorar o

desempenho dinâmico [23], [19], [45]. A Figura 2-21 mostra o diagrama de um módulo de controle de marcha lenta típico, que consiste em um controlador PI atuando sobre a vazão de ar e uma ação derivativa atuando sobre o avanço de ignição [26].

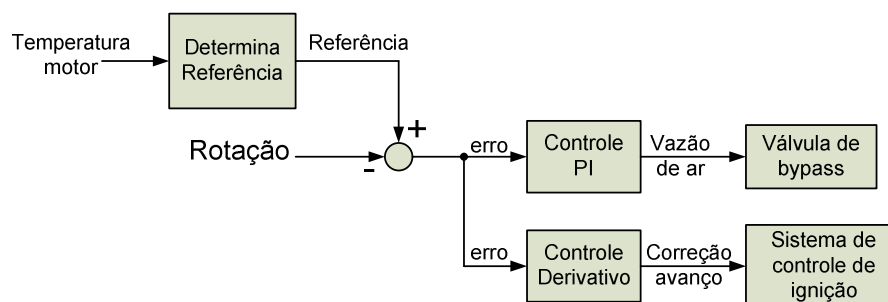


Figura 2-21 – Sistema de controle de marcha lenta típico.

O módulo de controle recebe informações sobre a rotação, a temperatura do motor, e a posição da válvula borboleta. O sistema entra na condição de marcha lenta quando detecta válvula borboleta fechada e rotação abaixo de certo valor. Neste caso o controlador calcula o erro da rotação em relação à referência desejada. A partir do erro obtido o controlador PI aumenta a vazão de ar caso a rotação esteja baixa, ou a diminui caso a rotação esteja alta [5]. Paralelamente, a variação do erro acarreta em ação derivativa sobre o avanço de ignição. A informação de temperatura do motor é utilizada para aumentar a referência de rotação de marcha lenta quando o motor está frio, já que neste caso a combustão fica prejudicada como foi visto na seção 2.3.1. Esta estratégia possibilita o funcionamento suave do motor em marcha lenta, mesmo em baixa temperatura, e ao mesmo tempo traz o benefício de reduzir o tempo de aquecimento do motor [20].

2.3.3.2 Atuadores de marcha lenta

O atuador de marcha lenta se localiza na passagem de ar auxiliar que faz um *bypass* da válvula borboleta. Um tipo comum de atuador consiste em duas bobinas e uma válvula giratória presa à armadura. Sinais de tensão modulados em largura de pulso (*Pulse Width Modulation* - PWM) são aplicados às duas bobinas, gerando forças opostas na armadura. A válvula giratória assume o ângulo de abertura que corresponde à razão das larguras de pulso dos sinais aplicados [19], [20], [24]. A válvula giratória tem excursão máxima de 90° e a sua posição determina a vazão de ar pelo *bypass*. Uma variação deste atuador utiliza apenas uma bobina, e geralmente atua contra a força de uma mola.

Outro tipo de atuador muito utilizado se baseia em um obturador acionado por um motor de passo. O movimento de rotação do motor de passo é convertido em movimento linear do obturador através de um mecanismo de parafuso de rosca interna solidária ao obturador e rosca externa solidária ao eixo do motor de passo. Deste modo, a cada volta completa do motor de passo o obturador desloca a distância equivalente a um passo da rosca [25]. A posição do obturador determina a vazão de ar pelo *bypass* como mostra a Figura 2-22.

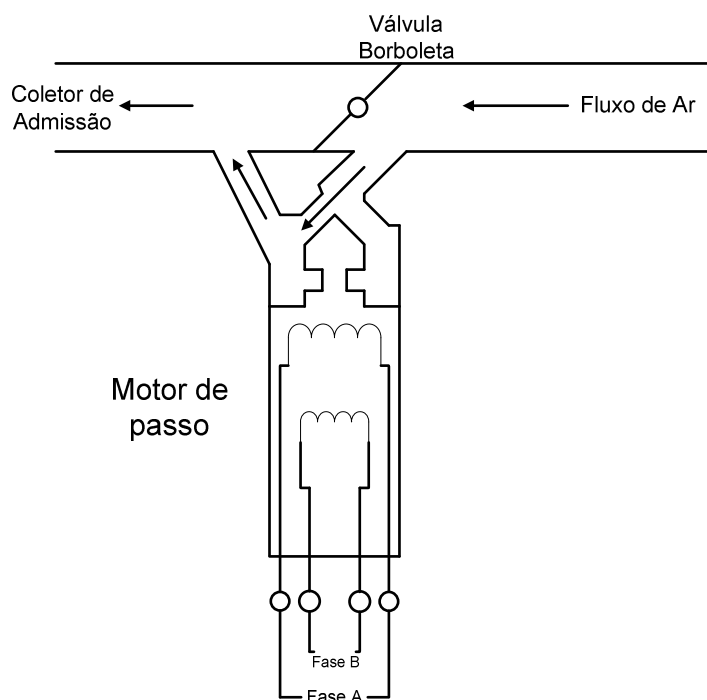


Figura 2-22 – Atuador de marcha lenta baseado em motor de passo [25].

Os atuadores de marcha lenta utilizam geralmente um motor de passo bipolar com rotor a imã permanente e duas bobinas independentes. Energizando as bobinas com seqüência e polaridade corretas, cria-se um campo magnético girante, que força o rotor a girar também. Deste modo o obturador se desloca e varia a vazão de ar através do *bypass*. Os sistemas mais modernos, equipados com módulo de comando eletrônico da válvula borboleta (*Drive by Wire*), realizam o controle de marcha lenta utilizando a própria borboleta.

2.3.3.3 Perturbações na rotação

Vários dispositivos atuam como carga no eixo do motor, consumindo parte da potência gerada. Como exemplo pode-se citar: ar-condicionado, eletro-ventilador, direção hidráulica, transmissão automática, entre outros. O acionamento destes dispositivos gera uma queda abrupta na potência ao freio¹⁹ desenvolvida pelo motor, o que acarreta em queda da rotação. O módulo de controle de marcha lenta deve ser capaz de corrigir de forma eficiente esta perturbação, aumentando a vazão de ar no coletor e o avanço de ignição aplicado. Os sistemas mais modernos monitoram o estado dos dispositivos de forma a realizar uma compensação direta da perturbação através de uma ação *feedforward* [5]. Este tipo de estratégia proporciona ganho de desempenho na rejeição às perturbações, já que o controlador sabe quando a carga vai ser aplicada, e deste modo pode tomar uma ação em paralelo para compensar seu efeito.

¹⁹ Potência ao freio (*Brake Horse Power – BHP*) é a potência fornecida pelo motor ao eixo, descontadas todas as perdas internas, tanto as térmicas quanto as geradas pelo atrito de êmbolos e mancais, incluindo acionamento de bombas e alternadores, entre outros.

Para proporcionar o menor consumo de combustível durante a condição de marcha lenta, é necessário que a ECU mantenha o controle de lambda em malha fechada, de forma a regular a mistura em torno de região estequiométrica. Porém, alguns sistemas utilizam mistura ligeiramente rica para garantir o funcionamento suave do motor e rápidas respostas à perturbação [20], [19].

2.4 Tendências futuras

Observa-se nos últimos anos um aumento na preocupação com as questões ambientais, com atenção especial sobre as emissões de poluentes dos veículos automotores. Os limites máximos de emissões estabelecidos por lei têm sido reduzidos drasticamente e a regulamentação do nível de CO₂ emitido está próxima, o que direciona a indústria automotiva ao objetivo final: veículo com emissão zero (*Zero Emission Vehicle* - ZEV) [8], [19], [10], [2]. O controle convencional abordado nas seções anteriores, baseado em malha fechada de lambda com controlador clássico e conversor catalítico de três vias (TWC), não será capaz de satisfazer as exigências futuras de emissões e, deste modo, novas arquiteturas estão sendo desenvolvidas utilizando técnicas modernas de controle.

A tendência no desenvolvimento de novas estratégias tem sido a utilização de controladores baseados em modelos dinâmicos do motor, sendo estes modelos ajustados de forma *on-line* por ferramentas de identificação e estimação de parâmetros. A estrutura baseada em um modelo do sistema possibilita a adoção de ação preditiva, capaz de minimizar os efeitos do tempo morto intrínseco ao motor. Além disso, a característica adaptativa permite compensar o desgaste natural do sistema, evitando a perda de desempenho do controlador ao longo do tempo. Neste contexto as redes neurais têm sido muito utilizadas [8], [9], [30], [31], [32], [12], devido à sua característica não linear e à sua capacidade adaptativa através de algoritmos de aprendizado.

Grandes esforços têm sido feitos com relação a melhorias no conversor catalítico. O tempo de *light-off* é responsável por boa parte das emissões durante os primeiros momentos de funcionamento do motor [6]. Uma opção são os sistemas catalíticos com aquecimento elétrico [3], que proporcionam tempo de aquecimento reduzido, diminuindo as emissões principalmente de HC. Melhorias na capacidade de armazenamento de oxigênio do catalisador também têm sido obtidas [6]. Com relação aos sensores de realimentação, pode-se citar o sensor de NO_x como uma promessa para aplicações de controle em um futuro próximo [10].

As condições de aceleração e desaceleração rápidas, muito comuns no trânsito urbano, contribuem para elevar os índices de emissões, pois implicam em mistura fora da região estequiométrica. Novas estratégias têm sido desenvolvidas com base no controle eletrônico da borboleta (DBW – *Drive By Wire*) [52], [53], que permite ao sistema de controle proporcionar o torque exigido mantendo a mistura próxima da região estequiométrica. Outra linha de pesquisa busca melhorar o desempenho dos controladores de marcha lenta, de forma que rotações mais baixas possam ser atingidas, mantendo a mistura na região estequiométrica [54], [55], [56].

Uma nova estratégia que proporciona ganhos de desempenho, consumo e emissões é a injeção direta de gasolina na câmara de combustão (GDI – *Gasoline Direct Injection*). Esta estratégia melhora o processo de admissão do motor e possibilita taxas de compressão relativamente mais altas, o que acarreta ganho de desempenho e consumo em relação aos motores convencionais. Além disso, permite a adoção de misturas mais pobres, sem comprometimento da combustão, o que proporciona menores níveis de emissões [2].

2.5 Conclusões

Neste capítulo foram mostrados os princípios básicos do controle eletrônico de motores de combustão interna com ignição por centelha. Foi possível concluir que o fator λ e o avanço de ignição possibilitam à ECU otimizar o funcionamento do motor, priorizando desempenho, consumo ou emissões de acordo com a condição de operação do sistema.

Foi mostrado que o desempenho de um sistema de controle de injeção típico é limitado pela característica não-linear do sensor EGO usado na realimentação do λ e pelo tempo morto elevado na malha. Neste caso, a adoção de um controlador PI leva a um comportamento por ciclo limite, com oscilação do lambda em torno do valor estequiométrico. Foi visto também que o sistema de controle de ignição regula o avanço de forma a manter o motor na condição de MBT ou no LDI caso não seja possível atingir o MBT. A detecção de um nível elevado de detonação faz com que o avanço seja automaticamente reduzido. Com relação ao controle de marcha lenta foi visto que a manipulação da vazão de ar no coletor possibilita o controle adequado da rotação. Paralelamente, o avanço de ignição pode ser usado para melhorar o desempenho dinâmico da malha.

Capítulo 3

Metodologia

Este capítulo mostra a metodologia utilizada no desenvolvimento da arquitetura de controle de um MCI-ICE na condição de marcha lenta. Inicialmente mostra-se uma visão geral do sistema, que engloba módulos desenvolvidos em trabalhos anteriores. Em seguida apresenta-se o hardware do sistema, mas com descrição detalhada apenas dos módulos desenvolvidos no presente trabalho. O mesmo ocorre com a descrição do software, que inclui os controladores de injeção, ignição e marcha lenta, além do módulo de comunicação CAN. Aborda-se também o software do sistema de identificação de detonação e a interface homem-máquina.

3.1 Visão geral do sistema

O sistema completo desenvolvido até o momento se baseia em três módulos: a unidade de controle eletrônico central, ECU; o sistema de identificação de detonação, referido por SID; e a interface homem-máquina, referida por IHM. A ECU realiza o controle do MCI, sendo que suas estratégias podem ser visualizadas e configuradas através da IHM. O SID é responsável apenas por identificar a ocorrência de detonação no motor e informar à ECU. A Figura 3-1 apresenta um diagrama geral do sistema, mostrando as estruturas utilizadas e suas interfaces.

A ECU apresenta um DSP (*Digital Signal Processor*) TMS320LF2407 da Texas Instruments como componente principal do módulo. Consiste em um DSP de ponto fixo, 16 bits, com poder de processamento de 40 MIPS e que agrega diversos periféricos [37]. O DSP recebe as informações dos sensores e as utiliza para calcular os comandos dos atuadores. A informação de ocorrência de detonação é obtida do SID através do barramento CAN. Paralelamente a ECU mantém uma contínua troca de dados com a IHM através da interface RS-232. O SID também se baseia em um DSP, que recebe o sinal condicionado do sensor de detonação, executa o algoritmo de identificação e envia a informação obtida para a ECU através do barramento CAN.

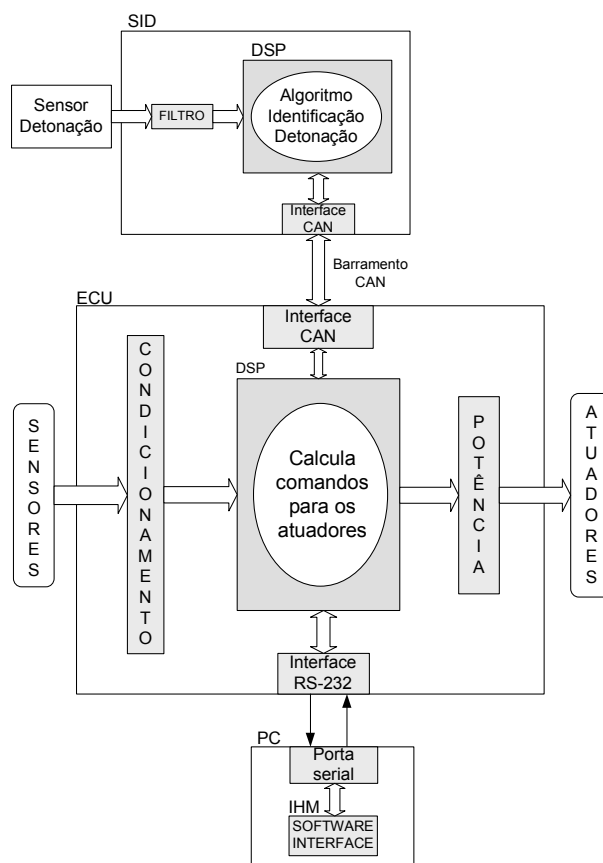


Figura 3-1 – Diagrama geral do sistema.

Nas seções seguintes este sistema será abordado em detalhes, tanto o hardware quanto o software. No entanto, por ser este trabalho uma continuação de outros dois anteriores, parte do hardware e software deste sistema foi desenvolvida anteriormente. Neste caso, os módulos já desenvolvidos serão vistos apenas superficialmente, ficando o leitor convidado a consultar as referências [15] e [17].

3.2 Hardware

O hardware desenvolvido é constituído de dois módulos, ECU e SID. Grande parte do desenvolvimento do hardware da ECU foi realizada em [15], com os circuitos de condicionamento dos sinais, interface de comunicação RS-232 e circuitos de potência. No presente trabalho desenvolveu-se apenas parte do circuito de potência e a interface CAN. No caso do SID, grande parte do hardware foi desenvolvida em [17], no entanto foram necessárias modificações para adequação ao presente trabalho. É importante ressaltar que o objetivo deste trabalho com relação ao hardware foi apenas adequar o que havia sido implementado anteriormente às necessidades da arquitetura de controle desenvolvida. Porém, a descrição completa dos dois módulos é importante para a compreensão da estrutura do software. A seguir apresenta-se a descrição destes módulos.

3.2.1 Unidade de Controle Eletrônico – ECU

O hardware da ECU se baseia em circuitos para condicionamento dos sinais dos sensores, circuitos de potência para acionamento dos atuadores, componentes de interface para comunicação entre módulos, além de circuitos de alimentação e da memória RAM externa. A adoção do DSP TMS320LF2407 como controlador digital possibilitou uma simplificação no desenvolvimento do hardware, já que várias funcionalidades são implementadas por periféricos internos do DSP. A Figura 3-2 apresenta um diagrama de blocos do hardware da ECU, mostrando também os periféricos do DSP utilizados. Nas subseções seguintes este diagrama será detalhado por partes.

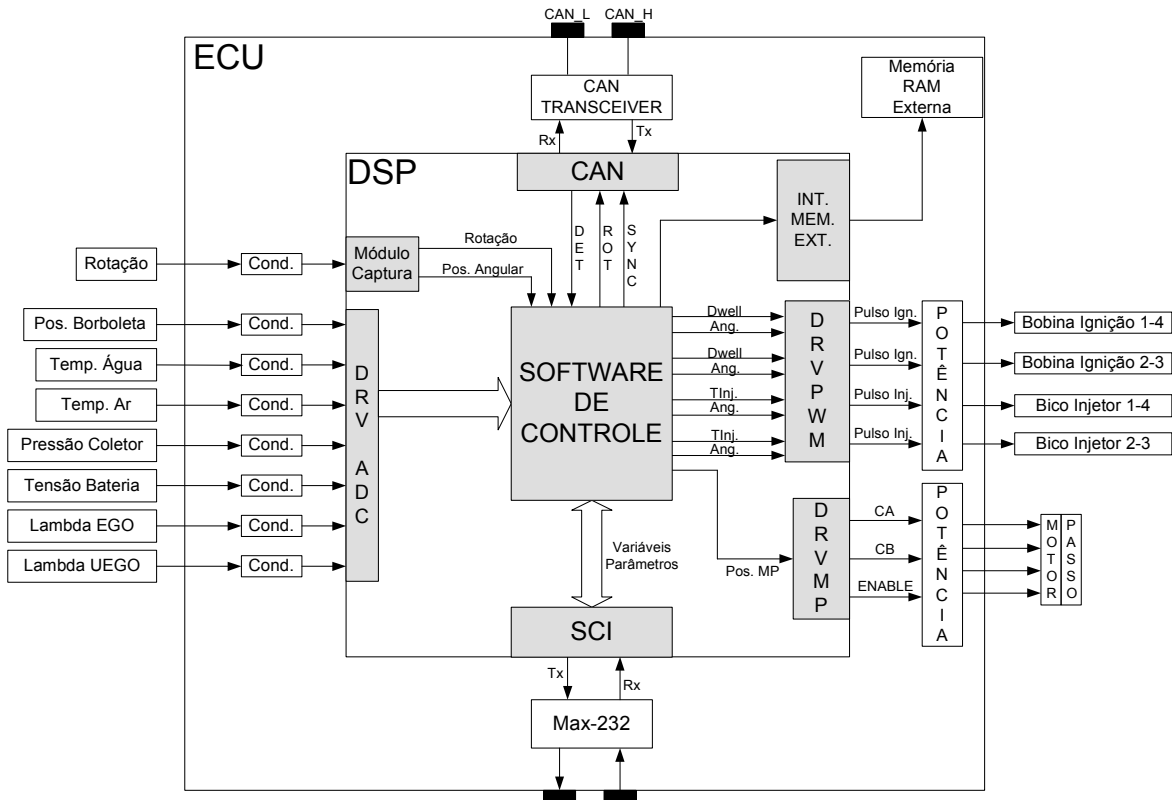


Figura 3-2 – Diagrama de blocos do hardware da ECU, incluindo periféricos do DSP.

3.2.1.1 Medição das variáveis do sistema

A ECU foi projetada para medir os seguintes sinais: rotação, posição angular do eixo de manivelas, posição da válvula borboleta, temperatura do líquido de arrefecimento, temperatura do ar no coletor de admissão, pressão no coletor, tensão na bateria e lambda não linear (EGO). A medição destas variáveis, com exceção das duas primeiras, é feita através do conversor analógico digital (ADC) do DSP, que possui tempo de conversão de 500ns e resolução de 10 bits. O DSP disponibiliza até 16 canais multiplexados, configurados para a leitura de sinais na faixa de 0 até 3,3V. Os circuitos condicionadores têm a função de adequar os sinais obtidos dos sensores à faixa de tensão adequada para a medição. Para a medição da rotação e da posição angular do eixo de manivelas utiliza-se um sinal alternado, gerado por um sensor de indução. Neste caso a informação está na frequência e não no nível do sinal e, portanto, utiliza-se o módulo de captura do DSP, que é capaz de medir o período de um sinal.

Além dos sinais citados a ECU disponibiliza ainda mais dois canais do ADC do DSP para propósito geral, que permitem a medição de qualquer sinal que esteja na faixa de 0 a 3,3V, já que o condicionamento neste caso consiste apenas em um circuito seguidor de tensão com ganho unitário para proteção das portas do DSP. A Tabela 3-1 mostra os sinais que podem ser medidos pela ECU e os respectivos sensores que devem ser usados.

Tabela 3-1 – Sinais medidos pela ECU e os respectivos sensores a serem usados.

Medição	Sensor
Rotação e posição angular do eixo de manivelas	Sensor indutivo
Posição da borboleta	Potenciômetro Linear
Temperatura do líquido de arrefecimento	Termistor (NTC)
Temperatura do ar no coletor de admissão	Termistor (NTC)
Pressão do ar no coletor de admissão	Sensor de pressão diferencial
Tensão na bateria	Medição direta com divisor de tensão
Lambda não linear (EGO)	Sensor EGO
Propósito geral 1	-
Propósito geral 2	-

Um dos canais de propósito geral foi utilizado para a medição do sinal do sensor linear de lambda, já que o projeto original do hardware não previa a utilização deste sensor. Foi utilizado o sensor de oxigênio LSM 11 da Bosch, que consiste basicamente em um HEGO (ver seção 2.3.1.1) de precisão. Este sensor apresenta aproximadamente a mesma curva característica de um EGO, porém possui um sinal mais estável e com baixa sensibilidade a interferências como a temperatura, por exemplo. O analisador de lambda LA2 da ETAS é capaz de processar o sinal de saída do LSM 11 e gerar uma medida linear do lambda, que é mostrada em um *display*. O LA2 também disponibiliza um sinal analógico de tensão com a informação do valor de lambda medido. Este sistema de medição usado não se baseia em um sensor UEGO, mas é capaz de realizar a mesma função fornecendo uma medida linear do lambda e deste modo o termo UEGO será utilizado para denominá-lo ao longo do texto. O sinal de tensão gerado pelo LA2 tem correspondência direta com o lambda medido, ou seja, lambda igual a 1 gera tensão de 1 volt, enquanto lambda igual a 1,01 gera 1,01 volts. Um ganho unitário é aplicado sobre este sinal já que um canal de propósito geral é usado. Neste caso, a resolução da medição desta variável fica comprometida, por que 1% de desvio da condição estequiométrica corresponde a uma diferença de apenas 10mV, valor que já está próximo da resolução do conversor A/D que é de 3,2mV para um conversor de 10 bits e fundo de escala em 3,3V. Além disso, o ruído compromete medições que exijam resolução menor do que 10mV. Deste modo, a medição do lambda linear foi considerada válida somente até a resolução de 1%.

Todo o projeto do hardware de medição dos sinais foi realizado em [15]. O referido trabalho apresenta todos os circuitos de condicionamento em detalhes, explica o funcionamento dos sensores usados e obtém as curvas de calibração das medições. Portanto, para mais informações sobre a medição das variáveis o leitor deve consultar a referência [15].

3.2.1.2 Comandos de Injeção e Ignição

A ECU desenvolvida é capaz de comandar até duas bobinas e dois bicos injetores de forma independente. Os pulsos de comando são gerados através do periférico de modulação em largura de pulso (*Pulse Width Modulation* - PWM) do DSP. A frequência destes pulsos varia de acordo com a rotação, enquanto a duração e a posição angular variam de acordo com as estratégias de controle usadas. Os sinais gerados pelo DSP passam por um estágio de potência que os permite acionar os bicos injetores e as bobinas de ignição. É importante ressaltar que o sistema desenvolvido permite o acionamento direto das bobinas de ignição, sem a necessidade de módulos de ignição externos, estratégia que é adotada pelas centrais abertas comerciais.

A limitação de dois canais para injeção e dois canais para ignição implica na adoção da estratégia semi-sequencial para o acionamento de um motor de quatro cilindros. Nesta estratégia os bicos injetores dos cilindros 1 e 4 são ligados juntos no mesmo canal de injeção, enquanto os bicos 2 e 3 são ligados no outro canal. Da mesma forma, as bobinas 1 e 4 são ligadas juntas no mesmo canal de ignição, enquanto as bobinas 2 e 3 são ligadas no outro canal. Deste modo, durante o ciclo do motor são realizadas duas injeções de combustível para cada cilindro, durante os tempos de admissão e de expansão. Da mesma forma, a centelha é aplicada duas vezes em cada cilindro durante o ciclo do motor, sempre ao final dos tempos de compressão e exaustão. Com esta estratégia a ECU não precisa saber a fase do motor, no entanto agrava-se o efeito de condensação de combustível nas paredes do coletor de admissão, já que a massa injetada no tempo de expansão tem que esperar uma volta completa do eixo para entrar no cilindro. Como foi visto na seção 2.3.1.2 este efeito prejudica o controle da mistura acarretando maior consumo e emissões.

Todo o projeto de acionamento dos atuadores de injeção e ignição foi realizado em [15]. O referido trabalho apresenta toda a estratégia de geração dos pulsos, além do circuito de potência utilizado para comandar os atuadores. Portanto, para mais informações sobre o comando dos atuadores de injeção e ignição o leitor deve consultar [15].

3.2.1.3 Comando para atuador de marcha lenta

A ECU é capaz de comandar um atuador de marcha lenta baseado em motor de passo. Este tipo de atuador foi escolhido por ser o mais utilizado nos motores disponíveis para teste. Como foi visto na seção 2.3.3.2 este atuador consiste em uma válvula cuja posição é determinada por um motor de passo. Para controlar a posição desta válvula, foi necessário desenvolver um circuito de acionamento para um motor de passo bipolar, com rotor a imã permanente e duas bobinas independentes. Para realizar a energização das bobinas nos dois sentidos, pode-se usar uma ponte H, que possibilita a circulação de corrente bidirecional na carga. A Figura 3-3 mostra o circuito de acionamento desenvolvido.

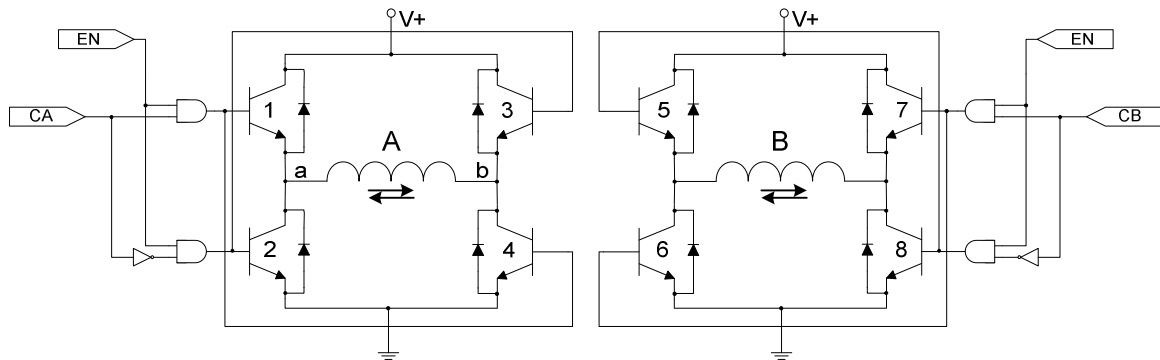


Figura 3-3 – Diagrama do circuito de acionamento do motor de passo do atuador de marcha lenta

De acordo com a Figura 3-3, 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 habilitação (*enable* - EN) permite bloquear todas as chaves, de forma que nenhuma corrente circula pelas bobinas, o que faz o rotor ficar parado na última 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 levar a válvula 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, que faça o rotor girar. A válvula se move um passo a cada mudança no comando aplicado sobre CA e CB. A Tabela 3-2 mostra a seqüência de comandos a serem aplicados para que a válvula se mova nos dois sentidos.

Tabela 3-2 – Seqüência de comandos para movimentação da válvula de marcha lenta.

	Comando CB	Comando CA	
Válvula Abre ↑	1	1	↓ Válvula Fecha
	0	1	
	0	0	
	1	0	

É importante respeitar um tempo mínimo de permanência em cada estado, que garante a energização correta das bobinas e a movimentação adequada da válvula. Caso este tempo mínimo não seja respeitado a válvula pode perder passos durante a sua movimentação. Esta situação é muito prejudicial ao sistema, já que o comando é feito em malha aberta, ou seja, não existe nenhuma realimentação da posição real da válvula. A ECU apenas aplica uma seqüência de pulsos e considera que a válvula se moveu até a posição desejada. Portanto, é muito importante garantir o tempo de permanência mínimo, de forma a sempre manter a consistência entre a posição real da válvula e a posição considerada pela ECU. Por outro lado, o tempo de permanência determina a velocidade de resposta do atuador para se mover até uma posição desejada, 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 da válvula e ao mesmo tempo proporcione uma resposta dinâmica satisfatória.

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 da válvula. Foi determinado também o número máximo de passos do obturador, que é de 220. Deste modo, a válvula leva 1,1 segundos 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.

3.2.1.4 Memória

O DSP utilizado neste trabalho possui memória FLASH interna com capacidade de 32K palavras de 16 bits, usada para armazenar o código do programa, mapas, tabelas e parâmetros iniciais. Possui ainda 2,5K palavras de 16 bits de memória RAM interna, usada para armazenamento das variáveis do programa. Além disso, a ECU possui uma memória RAM externa com capacidade para 32K palavras de 16 bits. Esta memória é usada para armazenamento de dados com altas taxas de amostragem durante a operação do sistema. Posteriormente os dados podem ser copiados para a IHM através da interface RS-232.

3.2.1.5 Interface RS-232

A interface RS-232 baseia-se no módulo *Serial Communications Interface* (SCI) do DSP e um componente para conversão dos níveis de tensão. O módulo SCI é responsável por todas as funções de baixo nível da comunicação, incluindo a temporização, delimitação dos *frames* e integridade dos dados. O transmissor e o receptor do módulo são independentes e podem operar simultaneamente no modo *full-duplex*. Os eventos de transmissão, recepção e ocorrência de erros são sinalizados através de interrupções, que são tratadas pelo programa de aplicação. Esta interface alcança a taxa de transmissão de 115 Kbps.

3.2.1.6 Interface CAN²⁰

A interface com o barramento CAN baseia-se no controlador CAN interno do DSP e um transceptor (*transceiver*) externo. Com esta estrutura, as camadas física e de enlace de dados (ver seção A.2) ficam implementadas em hardware, de modo que o software fica responsável apenas pela camada de aplicação. O controlador CAN do DSP é um periférico de 16 bits totalmente compatível com o protocolo CAN versão 2.0B (ver Tabela A-1). Baseia-se no conceito de *mailbox*, uma estrutura lógica que engloba quatro registradores para armazenamento de até 8 bytes de dados e um identificador de 11 ou 29 bits. Um *mailbox* pode ser de transmissão ou recepção. Caso seja de transmissão, os dados a serem enviados devem ser carregados nos registradores de armazenamento. A mensagem a ser transmitida no barramento será formada por estes dados e pelo identificador do *mailbox*. Caso o *mailbox* seja de recepção, o identificador funciona como um filtro de mensagens.

²⁰ Ao leitor não familiarizado com a rede CAN aconselha-se a leitura do Apêndice A antes da leitura desta seção.

O *mailbox* de recepção fica monitorando o barramento à espera de uma mensagem com o identificador igual ao seu. Quando esta condição é satisfeita os dados da mensagem são carregados nos registradores de armazenamento e disponibilizados para a aplicação. Para que os *mailboxes* de recepção filtrem uma faixa de identificadores ao invés de um único, são disponibilizadas máscaras (*acceptance mask*) que permitem ignorar determinados bits do identificador. Os *mailboxes* do DSP correspondem aos buffers de transmissão e recepção com filtros de mensagens utilizados na camada de enlace (ver seção A.2.4). O DSP utilizado neste trabalho disponibiliza seis *mailboxes*, dois de recepção, dois de transmissão e dois configuráveis.

O controlador CAN do DSP realiza toda a tarefa de detecção de erro, arbitragem do barramento e formatação das mensagens. Implementa também uma estratégia de confinamento de erros (ver seção A.2.4). Possibilita ainda a utilização de mensagens padrão (11 bits) ou estendida (29 bits), e implementa a funcionalidade de retransmissão automática de mensagem em caso de erro ou perda de arbitragem no barramento. A interface entre o controlador CAN e o programa de aplicação é feita através de interrupções. Qualquer evento de transmissão, recepção ou erro pode gerar interrupção no processador do DSP. Deste modo, o programa de aplicação precisa apenas configurar o módulo controlador e tratar as interrupções recebidas de acordo com o protocolo de aplicação implementado.

Por fim é necessário um componente externo ao DSP, o transceptor, que é responsável pela conversão entre os níveis de tensão do barramento e os sinais lógicos do controlador CAN do DSP, de acordo com o padrão ISO 11898.

3.2.2 Sistema de Identificação de Detonação - SID

O hardware do SID consiste em um DSP, um circuito para condicionamento do sinal do sensor de detonação e uma interface CAN para comunicação com a ECU. A Figura 3-4 mostra um diagrama do sistema. Assim como na ECU, a adoção do DSP como processador digital do SID permite a simplificação do hardware, através da utilização dos periféricos internos do DSP. A seguir são apresentados os módulos de medição do sinal de detonação e interface CAN.

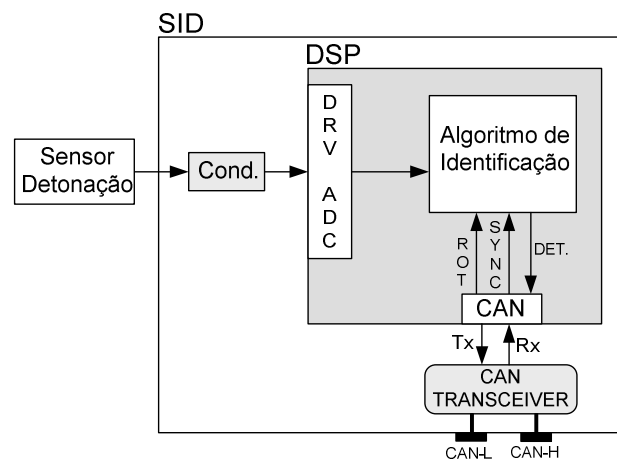


Figura 3-4 – Diagrama do circuito do sistema de identificação de detonação

3.2.2.1 Medição do sinal de detonação

O SID foi projetado para medir o sinal de vibração estrutural do motor através de um sensor acelerômetro piezoelétrico de banda larga fixado ao bloco do motor. O sinal obtido é oscilatório, e o seu espectro de frequências fornece informações sobre a ocorrência do fenômeno da detonação. Para a correta amostragem do sinal através do módulo ADC do DSP, é necessário fazer um condicionamento deste sinal e uma filtragem do mesmo, para evitar a ocorrência de falseamento. Esta estratégia de medição foi desenvolvida e implementada em [17]. O referido trabalho apresenta todo o circuito de condicionamento, incluindo o filtro analógico usado. A frequência de amostragem adotada foi de 60KHz e, deste modo, um filtro Butterworth passa-baixas analógico de sexta ordem, com frequência de corte em 25KHz, foi desenvolvido. O leitor interessado pode encontrar informações completas sobre o hardware de medição do sinal de detonação em [17].

3.2.2.2 Interface CAN

A interface CAN utilizada no SID é igual à interface usada na ECU. A seção 3.2.1.6 apresenta a descrição desta interface.

3.3 Software – Unidade de Controle Eletrônico

O software da ECU contém toda a inteligência do sistema, fazendo a interpretação dos sinais medidos, executando as estratégias de controle e comandando os circuitos de potência para acionar os atuadores. Além disso, mantém uma contínua troca de dados com a interface homem maquina (IHM), que possibilita a visualização dos dados medidos e a alteração de parâmetros da ECU. O software foi desenvolvido no ambiente *Code Composer Studio* da Texas Instruments, que possibilita a programação do DSP em linguagem C. No entanto, por questões de eficiência do código, as funções críticas foram implementadas em código *assembly*, de acordo com o padrão “*C callable*” [37]. A Figura 3-5 apresenta o diagrama geral do software desenvolvido para a ECU.

O software desenvolvido para a ECU pode ser dividido em sete partes que estão delimitadas na Figura 3-5: medição das variáveis, atuação, comunicação, controle de ignição, controle de injeção, controle de marcha lenta e armazenamento de dados (*Data Log*). Os módulos apresentados 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.

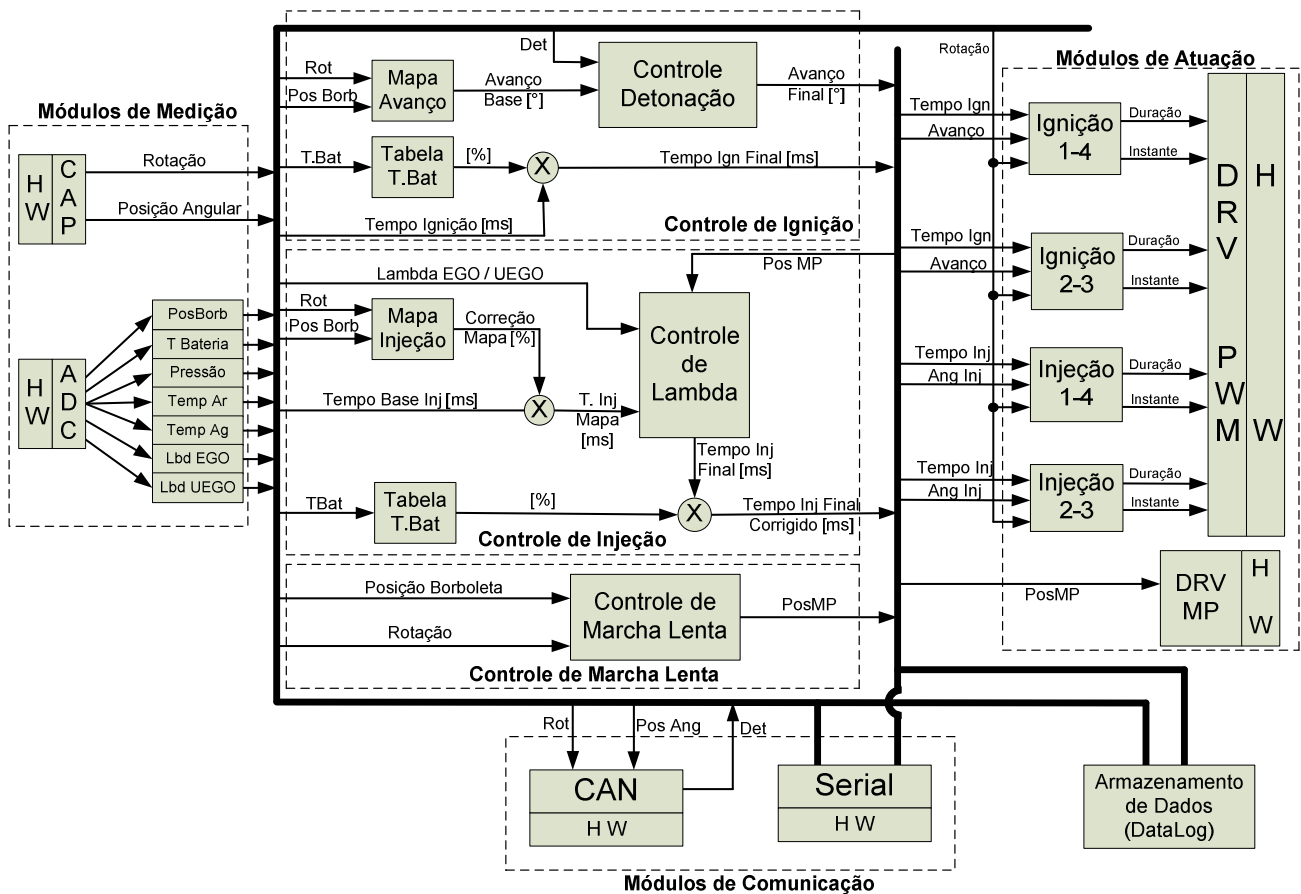


Figura 3-5 – Diagrama geral do software desenvolvido para a ECU.

3.3.1 Módulos de medição das variáveis do sistema

Os módulos de medição são responsáveis por interagir com o hardware do DSP de forma a obter as informações dos sensores e tratar os dados obtidos de forma a gerar valores com sentido físico, que serão usados nas estratégias de controle. A seguir apresenta-se a descrição destes módulos.

3.3.1.1 Módulo de captura

O módulo de captura tem a função de determinar a rotação e a posição angular do motor, a partir do sinal gerado pelo deslocamento de um sensor indutivo em relação a uma roda dentada fixada ao eixo do motor. Para isso utiliza o periférico de captura do DSP, que é capaz de armazenar o valor de um temporizador quando uma transição é detectada no pino de entrada deste periférico. Comparando-se a sequência de valores armazenados e sabendo a frequência de contagem do temporizador é possível determinar a rotação do motor. A posição angular é determinada a partir de uma falha de dois dentes na roda dentada, que indica uma posição de referência. O módulo de captura é responsável por configurar o periférico do DSP durante a inicialização do programa e atualizar os valores de rotação e posição angular sempre que as interrupções são geradas. Este módulo foi desenvolvido em [15], que apresenta toda a estratégia de medição e detecção da falha, incluindo a configuração do periférico.

3.3.1.2 Módulo do conversor analógico digital

O módulo do conversor analógico digital é responsável por configurar o periférico do DSP durante inicialização do programa e atualizar os valores medidos após as conversões. O periférico ADC permite a configuração de uma seqüência de conversão de até 16 canais ou duas seqüências independentes de 8 canais cada. Para cada seqüência pode-se configurar um evento para iniciar a conversão (*Start of Conversion - SOC*), que pode ser, por exemplo, o período de um temporizador, a transição do nível lógico em um determinado pino ou o próprio software de aplicação através da configuração de um bit. Neste trabalho existem duas situações de amostragem das variáveis e, portanto, são usadas duas seqüências independentes. Quando o motor está rodando, a amostragem é feita a cada volta do eixo de manivelas, e deste modo utiliza-se uma seqüência com SOC gerado quando a falha é detectada no sinal de rotação. Porém quando o motor está parado não ocorrem eventos gerados pelo sinal de rotação, e deste modo utiliza-se um temporizador com período de 50 ms para gerar o SOC. Os canais amostrados nas seqüências são iguais, a única diferença é o evento que inicia a conversão. Na inicialização do programa este módulo configura as seqüências de amostragem e os eventos que geram SOC. Após a inicialização do sistema, este módulo fica responsável por atualizar os dados amostrados ao final de cada conversão e disponibilizá-los para os outros módulos do programa.

3.3.1.3 Objetos Sensores

Os “sensores” são objetos responsáveis por tratar os dados obtidos pelo módulo do conversor analógico digital. Sua função é converter os dados medidos em valores com sentido físico e realizar a filtragem das medições. Podem ser lineares ou não-lineares dependendo da característica estática da medição. Dentre os sinais medidos, os de temperatura apresentam relação não linear entre o valor de tensão medido pelo DSP e o valor físico da variável. Neste caso uma curva de calibração deve ser usada para converter os dados obtidos pelo ADC em informação com sentido físico. Os demais sinais podem ser considerados lineares e, portanto, uma reta de calibração já é suficiente. A Tabela 3-3 mostra as variáveis medidas através do ADC e as suas respectivas características estáticas.

Tabela 3-3 – Variáveis medidas pelo ADC e suas respectivas características estáticas.

Índice	Medição	Característica estática
1	Posição da borboleta	Linear
2	Temperatura do líquido de arrefecimento	Não Linear
3	Temperatura do ar no coletor de admissão	Não Linear
4	Pressão do ar no coletor de admissão	Linear
5	Tensão na bateria	Linear
6	Lambda não linear (EGO)	Linear
7	Lambda linear (UEGO)	Linear
8	Propósito geral 2	-

Cada variável medida com característica estática linear possui um objeto “Sensor Linear” associado a ela no programa. Este objeto recebe como entrada o valor entre 0 e 1024 medido pelo módulo ADC. Aplica sobre este valor a reta de calibração do sensor, de forma a obter a informação

final com sentido físico. A reta de calibração é definida pelos coeficientes angular e linear, que podem ser configurados através da IHM. Por fim o objeto aplica um filtro de média móvel de 4 termos sobre o dado final. No caso das variáveis com característica estática não-linear, o objeto associado é o “Sensor Não-Linear”, que realiza as mesmas funções, porém, aplica uma curva de calibração ao invés de uma reta. A curva de calibração consiste em um vetor com 32 posições que contém os valores físicos da variável para determinados valores de tensão medidos. Através de interpolação linear pode-se obter o valor físico para qualquer tensão medida. Os 32 valores podem ser configurados através da IHM. Após a conversão e a filtragem, os dados estão prontos para serem usados pelos outros módulos do sistema.

3.3.2 Objetos Mapas e Tabelas

Como foi visto no Capítulo 2, os mapas e tabelas de calibração são amplamente utilizados nas ECUs. Correspondem a ações diretas de controle nas quais as variáveis medidas geram diretamente correções nos comandos dos atuadores. Permitem ajustar as ações de controle às condições de temperatura, pressão, carga e rotação, por exemplo.

No sistema desenvolvido, os objetos “Mapa” e “Tabela” consistem em um conjunto de pontos e funções de interpolação linear. Recebem como entrada valores de variáveis medidas, que indicam os pontos a serem interpolados de forma a se obter o resultado final. Possuem a mesma estrutura básica, porém os mapas recebem duas variáveis de entrada e, portanto, realizam interpolação em duas dimensões. Já as tabelas recebem apenas uma variável de entrada e executam interpolação em uma dimensão. As estratégias de controle implementadas neste trabalho utilizam 2 mapas e 2 tabelas, que estão descritos nas subseções seguintes. A estrutura modular do programa permite que outras tabelas e mapas sejam facilmente adicionados ao sistema, bastando declarar novos objetos.

3.3.2.1 Mapa de injeção em função da rotação e da carga

Este mapa recebe como entrada a medição de rotação e da posição da válvula borboleta. Gera como saída um valor percentual de correção a ser aplicado sobre o tempo base de injeção, que é um dos parâmetros do sistema, configurável através da IHM. Faz parte do sistema de controle de lambda e tem como função ajustar a mistura ar/combustível ao ponto de operação do motor, através de uma ação direta de controle. Este mapa é geralmente calibrado para mistura estequiométrica, exceto para condições de carga e rotação elevadas, nas quais se utiliza mistura rica. O mapa implementado abrange a faixa de rotação de 0 até 6500 rpm com passo de 250 rpm. Para a posição da válvula borboleta a faixa é de 0 até 100% de abertura com passo de 5%. Ao todo são 27 condições de rotação e 21 de posição da borboleta, totalizando 567 pontos no mapa. A estrutura do programa permite que os mapas sejam modificados de forma a se reduzir o número total de pontos a serem calibrados.

3.3.2.2 Tabela de correção do tempo de injeção em função da tensão na bateria

Esta tabela recebe como entrada a medição de tensão na bateria e gera como saída um valor percentual de correção a ser aplicado sobre o tempo de injeção final. Sua função é compensar variações na tensão da bateria, de modo que o tempo de comando dos injetores tenha relação direta com a massa de combustível injetada. A tabela implementada abrange a faixa de 0 até 15,5 volts com passo de 0,5 volts, totalizando 32 pontos.

3.3.2.3 Mapa de avanço de ignição em função da rotação e da carga

Este mapa recebe como entrada a medição de rotação e da posição da válvula borboleta. Gera como saída o avanço base de ignição a ser aplicado no motor. Este mapa é de importância fundamental para o sistema de controle de avanço de ignição porque contém a única informação de otimização do avanço, já que não é feita nenhuma realimentação de torque. Como será visto na seção 3.3.8, a identificação de detonação tem apenas a função de evitar a ocorrência exagerada do fenômeno, não fornecendo nenhuma informação adicional sobre o ponto de máximo torque (MBT). Deste modo, o mapa de avanço ganha muita importância e deve ser otimizado para que o motor apresente o máximo desempenho. A estrutura do mapa de avanço implementado é exatamente igual ao mapa de injeção apresentado na seção 3.3.2.1.

3.3.2.4 Tabela de correção do tempo de ignição em função da tensão na bateria

Esta tabela recebe como entrada a medição de tensão na bateria e gera como saída um valor percentual de correção a ser aplicado sobre o tempo de permanência de ignição. Sua função é compensar variações na tensão da bateria, de modo que a energia carregada nas bobinas seja sempre a mesma. A estrutura da tabela implementada é exatamente igual à tabela de correção do tempo de injeção, apresentada na seção 3.3.2.2.

3.3.3 Módulos de atuação

Os módulos de atuação são responsáveis por implementar, através do hardware do DSP, os comandos requisitados pelas estratégias de controle. A seguir apresenta-se a descrição destes módulos.

3.3.3.1 Módulos de injeção e ignição

Os módulos de injeção e ignição são responsáveis por transformar as variáveis do sistema em parâmetros usados na geração dos pulsos de comando através do periférico de geração de PWM do DSP. O módulo de ignição recebe o avanço, o tempo de permanência de ignição e a rotação, e a partir destas informações calcula o instante de início do pulso de comando de ignição e a sua duração. No sistema desenvolvido o tempo de permanência de ignição não é uma variável de controle, ou seja, não é otimizado por nenhuma estratégia de controle. Consiste apenas em um parâmetro que pode ser modificado através da IHM. O módulo de injeção utiliza o ângulo e o tempo de injeção, além da rotação, para calcular o instante e a duração do pulso de comando. Assim como o tempo de permanência de ignição, o ângulo de injeção é um parâmetro que pode ser

alterado através da IHM, mas não é otimizado por nenhuma estratégia de controle. Para acionar um MCI de 4 cilindros utiliza-se a estratégia semi-sequencial, como foi visto na seção 3.2.1.2. Neste caso, o software requer dois objetos de injeção e dois de ignição para realizar os comandos dos cilindros: injeção1-4 e injeção2-3; ignição1-4 e ignição2-3. O software pode ser facilmente adaptado aos tipos de motores, bastando instanciar os objetos necessários e configurar seus parâmetros. A maior restrição neste caso fica por conta do hardware disponível. A estratégia de implementação dos pulsos de comando foi desenvolvida em [15], que apresenta os cálculos realizados e as configurações necessárias nos periféricos do DSP.

3.3.3.2 Módulo do atuador de marcha lenta

O módulo do atuador de marcha lenta tem a função de comandar a válvula de marcha lenta até a posição desejada. Como foi visto na seção 3.2.1.3, este trabalho utiliza uma válvula baseada em motor de passo. Foi desenvolvido um circuito para acionamento do motor de passo que está apresentado na Figura 3-3. A movimentação da válvula é feita através da aplicação de uma seqüência de comandos sobre CA e CB, como mostra a Tabela 3-2. O módulo de software deve ser capaz de aplicar esta seqüência de comandos, com o tempo de permanência adequado, de forma que a válvula alcance a posição desejada sem a ocorrência de perda de passos.

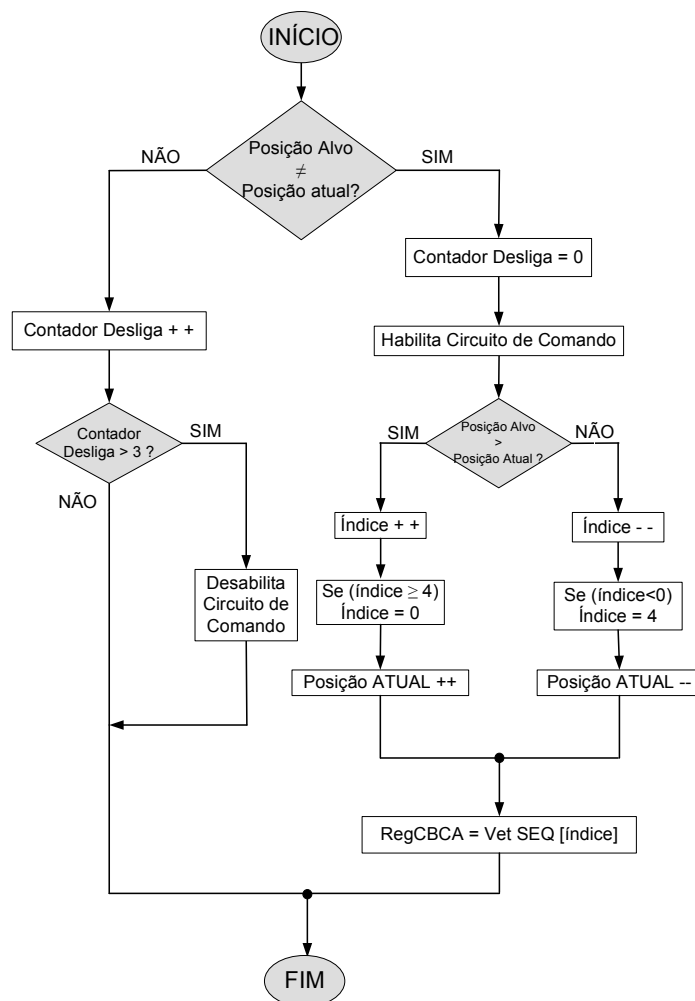


Figura 3-6 – Fluxograma da rotina de acionamento do motor de passo.

O módulo desenvolvido comanda os sinais CA e CB através de pinos de entrada e saída de propósito geral do DSP (*General Purpose Input Output* - GPIO). O estado destes pinos é determinado por um registro referido aqui por RegCBCA, onde o bit de posição 0 corresponde ao sinal CA e o bit 1 corresponde ao CB. O módulo executa uma rotina que modifica o valor de RegCBCA de acordo com a movimentação desejada para a válvula. A Figura 3-6 apresenta o fluxograma da estratégia implementada.

Esta rotina é executada com período de 5 ms, valor que corresponde ao tempo de permanência do comando que garante a ausência de perda de passos, como foi visto na seção 3.2.1.3. Porém este valor pode ser alterado através da IHM. O módulo recebe como entrada apenas a variável 'PosicaoAlvo', que indica a posição desejada para o motor de passo. No início da rotina a posição alvo é comparada com a posição atual. Caso sejam iguais então o motor de passo já está na posição desejada e, deste modo, o circuito de comando pode ser desabilitado. Para evitar o desligamento desnecessário, espera-se 3 períodos antes de desabilitar o circuito. A variável 'ContadorDesliga' é usada para contar os 3 períodos. No caso da posição alvo ser diferente da posição atual, o driver é habilitado e, em seguida, a direção do movimento é verificada. A Figura 3-7 mostra o vetor utilizado com a seqüência de comandos a serem aplicados. O índice do vetor é utilizado para determinar a direção do movimento.

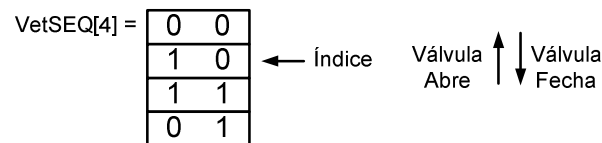


Figura 3-7 – Vetor com a seqüência de comandos para movimentação do motor de passo.

Para fechar a válvula, o que corresponde a aumentar a posição do motor de passo de acordo com a convenção estabelecida na seção 3.2.1.3, basta incrementar o índice do vetor. Para abrir a válvula, ou seja, reduzir a posição, basta decrementar o índice. O valor da variável 'PosiçãoAtual' é atualizado de acordo com o deslocamento desejado. Por fim, o novo comando VetSEQ[índice] é carregado 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.

3.3.4 Módulos de Comunicação

3.3.4.1 Módulo de comunicação Serial

Este módulo é responsável pelas funções de alto nível da comunicação serial entre a ECU e a IHM. Como foi visto na seção 3.2.1.5 todas as funções de baixo nível são realizadas pelo periférico SCI do DSP. O módulo de comunicação serial precisa apenas tratar os eventos de transmissão, recepção e ocorrência de erros, que são sinalizados pelo periférico SCI através de interrupções.

No protocolo desenvolvido, a IHM atua sempre como mestre da comunicação, requisitando serviços ao escravo, no caso o DSP. O protocolo é baseado em blocos de dados, que contém o

código do serviço desejado, além de informações adicionais como o identificador da variável. O módulo de comunicação serial é capaz de delimitar os blocos de dados recebidos, decodificar suas informações e executar os serviços desejados pela IHM. É também capaz de montar blocos de dados com informações codificadas e enviá-los para a IHM de acordo com o serviço requisitado.

O envio do bloco de dados com os valores das variáveis medidas é um serviço periodicamente requisitado pela IHM. Este bloco também contém bits que indicam o estado do sistema, como ocorrência de erros, geração dos pulsos de comando, estado das malhas de controle, entre outros. Outro serviço muito importante é o de alteração de parâmetros. Através dos identificadores, praticamente qualquer parâmetro da ECU pode ser alterado via IHM, incluindo os pontos dos mapas e tabelas.

A ocorrência de erros durante a transmissão de dados faz com que o bloco corrente seja descartado e a sua transmissão seja reiniciada. Este procedimento ocorre de forma transparente e não causa prejuízos ao desempenho da comunicação. Estratégias de “*time-out*²¹” são utilizadas, tanto na ECU quanto na IHM, para garantir que o sistema nunca fique bloqueado devido a erros no intertravamento (*handshake*) da comunicação. Não é objetivo do presente trabalho detalhar o protocolo serial desenvolvido.

3.3.4.2 Módulo de comunicação CAN²²

Para este trabalho foi desenvolvido um protocolo simplificado da camada de aplicação da rede CAN, baseado no CANopen (ver seção A.3). O objetivo foi desenvolver um protocolo simples que atendesse às necessidades do trabalho, mas que pudesse ser utilizado posteriormente. A necessidade do presente trabalho é basicamente trocar dados entre a ECU e o SID, de modo que a informação de ocorrência de detonação possa ser utilizada nas estratégias de controle.

O protocolo desenvolvido possibilita a troca de SDOs e PDOs, além de oferecer funcionalidades de gerenciamento da rede. Possui estrutura mestre escravo fixa, na qual as ligações entre PDOs e SDOs são determinadas pelo próprio código do programa. Dentro desta estrutura apenas o mestre pode fazer requisições SDO para os escravos e os PDOs podem ser trocados apenas entre mestre e escravo, e nunca entre dois escravos diretamente. No contexto do sistema desenvolvido a ECU é sempre o mestre da rede, enquanto o SID atua como um dos escravos.

A implementação do protocolo foi baseada em interrupções com os eventos sendo gerados pelo periférico CAN do DSP, apresentado brevemente na seção 3.2.1.6. Buscou-se evitar ao máximo a ocupação da CPU com a execução do protocolo e, deste modo, as funcionalidades disponibilizadas pelo periférico foram bastante exploradas. Neste contexto, os *mailboxes* são fundamentais por que realizam todo o processo de filtragem e decodificação/codificação das mensagens, sem a necessidade da CPU. No entanto, o DSP utilizado oferece apenas 6 *mailboxes*, o que é adequado para os escravos, porém limita as funções do mestre.

²¹ Tempo limite para o recebimento de uma resposta antes que um erro seja indicado.

²² Ao leitor não familiarizado com a rede CAN aconselha-se a leitura do Apêndice A antes da leitura desta seção.

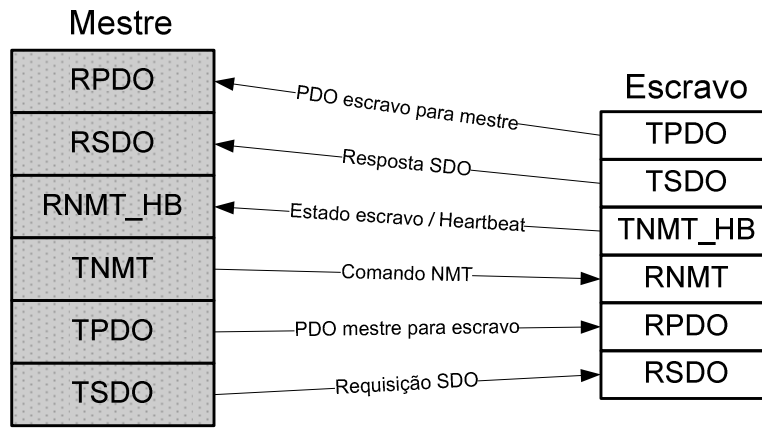


Figura 3-8 – Conexões lógicas entre os *mailboxes* do mestre e do escravo na camada de aplicação.

A Figura 3-8 mostra as conexões lógicas entre os *mailboxes* do mestre e do escravo. Observa-se que mestre e escravos trocam PDOs e SDOs. Os PDOs são os objetos mais usados e carregam dados do processo de alta prioridade em tempo real. Todos os escravos trocam PDOs apenas com o mestre e, deste modo, a troca de dados entre escravos somente pode ser feita através do mestre. O sincronismo dos PDOs é realizado por eventos, de modo que cada dispositivo disponibiliza seus dados no barramento de acordo com um evento próprio. Os SDOs são enviados apenas pelo mestre. Consistem em requisições de acesso ao dicionário de objetos do escravo, que permitem a consulta ou até a alteração de parâmetros do dispositivo. Para isso, o dicionário de objetos tem um padrão fixo que deve ser conhecido pelo mestre, de forma que seja possível indexar corretamente os parâmetros. O escravo envia para o mestre a resposta à requisição SDO, contendo o resultado da operação ou o dado requisitado.

O protocolo proporciona também o gerenciamento simplificado da rede pelo mestre através de objetos NMT. O estado corrente de cada escravo pode ser alterado pelo mestre através de comandos NMT. A Figura 3-9 mostra a máquina de estados implementada nos nodos escravos.

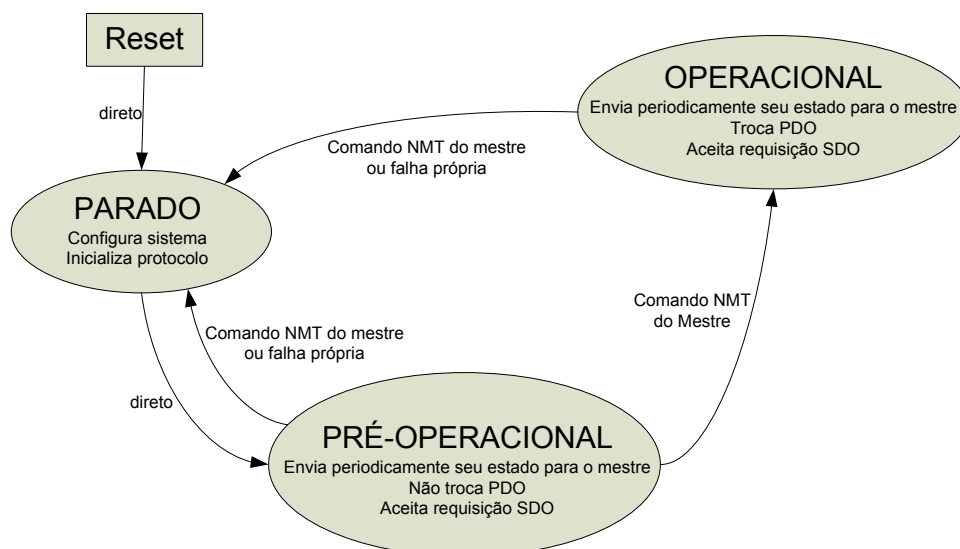


Figura 3-9 – Máquina de estados implementada no escravo.

Após a inicialização (Reset) o escravo entra no modo PARADO no qual configura todo o sistema e inicializa o protocolo CAN. Neste estado o escravo não envia mensagens para o mestre. Em seguida o escravo automaticamente entra no modo PRÉ-OPERACIONAL no qual passa a enviar seu estado periodicamente para o mestre, o que corresponde à estratégia de pulsação (*heartbeat*) para o gerenciamento da rede. Neste modo o escravo não troca PDOs, mas aceita requisições SDO feitas pelo mestre. O dispositivo escravo permanece neste estado até que o mestre envie um objeto NMT com o comando de mudança para o modo OPERACIONAL. No protocolo CANopen completo o estado PRÉ-OPERACIONAL tem a finalidade de permitir que o mestre configure a rede apropriadamente, dentro de uma estrutura dinâmica. Porém, no caso do protocolo implementado a estrutura é fixa e determinada pelo código do programa e, deste modo, o mestre faz com que todo o escravo que esteja no modo PRÉ-OPERACIONAL entre diretamente no modo OPERACIONAL sem nenhuma configuração adicional. Ao entrar no modo OPERACIONAL o escravo passa a trocar mensagens PDO com o mestre de acordo com a estrutura da rede. As requisições SDO são aceitas normalmente e as mensagens com o estado corrente continuam a ser enviadas periodicamente. Este é o modo normal de operação no qual o sistema permanece a maior parte do tempo. Caso o dispositivo escravo entre no modo *BusOff* (ver seção A.2.4) ele automaticamente volta para o modo PARADO, no qual o sistema é reconfigurado e o protocolo é inicializado novamente. Situação análoga ocorre quando o mestre entra em estado de erro passivo (ver seção A.2.4). Neste caso, o próprio mestre reinicializa o seu protocolo e envia para todos os escravos um comando NMT que os faz voltar para o modo PARADO, de forma que todo o sistema é reinicializado. Esta estratégia apresentada possibilita um gerenciamento simplificado da rede CAN.

No protocolo CANopen, o mapeamento das variáveis de processo para os PDOs é feito via OD, o que possibilita o mapeamento dinâmico dos PDOs (ver seção A.3.2). No presente trabalho, como já foi dito, toda a estrutura é fixa, inclusive o mapeamento dos PDOs e, deste modo, não é necessário mapear as variáveis através do OD. Portanto, no protocolo implementado a ligação entre os PDOs e as variáveis do processo é direta, o que evita o *overhead* de consultar as entradas do OD.

No caso do protocolo implementado, os objetos SDO têm a função de possibilitar que o usuário da ECU altere também os parâmetros dos dispositivos escravos. A ECU não altera sozinha os parâmetros dos escravos, isso é feito apenas pelo usuário através da IHM. Como será mostrado na seção 3.5.2, a IHM disponibiliza uma tela na qual o usuário entra os índices que mapeiam o parâmetro desejado no OD do escravo. Através desta tela os parâmetros dos dispositivos escravos podem ser consultados e alterados.

A Tabela 3-4 faz uma comparação final entre as características básicas do CANopen e do protocolo implementado. O código implementado para o mestre faz parte do programa da ECU. Já o código do escravo apresenta estrutura modular e interface simples, podendo ser facilmente

incorporado a outros dispositivos escravos que compartilhem a mesma arquitetura baseada em DSP.

Tabela 3-4 - Comparação das características básicas do CANopen e do protocolo implementado.

	CANopen	Protocolo implementado
CAN <i>baud rates</i>	10K, 20K, 50K, 125K, 250K, 500K, 1M	10K, 20K, 50K, 125K, 250K, 500K, 1M
Num Máx. de Nodos por segmento	127	127
Gerenciamento da Rede	NMT <i>master</i>	NMT <i>master</i> com funcionalidades limitadas
Gerenciamento de <i>status</i> do sistema	<i>Node guarding</i> feito pelo mestre ou <i>heartbeat</i> enviado pelos nodos	Os nodos enviam pacotes de <i>heartbeat</i> .
Configuração dos nodos	Os nodos podem ser configurados pelo mestre através da rede	Os nodos possuem configuração fixa definida no próprio código do programa. Parâmetros podem ser alterados via SDO pela IHM.
<i>Object Dictionary</i> (OD)	Disponível	Disponível mas com número de entradas limitadas.
Acesso do OD via <i>Service Data Objects</i> (SDO)	Disponível	Disponível
Mapeamento dos <i>Process Data Objects</i> (PDO)	Suporta mapeamento dinâmico das variáveis	Mapeamento fixo, pré-configurado, definido pelo código do programa.
Tipo de eventos para envio dos PDOs	Período fixo, mudança de estado da variável (tempo de inibição suportado), sincronismo pelo mestre, ou qualquer combinação destes.	Períodos fixos baseados em eventos de cada dispositivo.

3.3.5 Módulo de Armazenamento de Dados

Um módulo de armazenamento de dados chamado DataLog foi implementado para permitir a aquisição de dados do sistema a uma taxa de amostragem elevada. Com será visto na seção 3.5, a IHM possibilita o armazenamento dos dados recebidos continuamente da ECU, no entanto, a taxa de aquisição é de apenas 2,5Hz, muito baixa para dinâmicas com constante de tempo menor do que 1 segundo. Para contornar esta limitação foi criado o módulo DataLog, que possibilita a aquisição de até 6 variáveis do sistema com taxa de 20Hz. Para a realização desta tarefa são utilizadas 30000 palavras de 16 bits da memória RAM externa mostrada na seção 3.2.1.4. Deste modo, cada buffer de aquisição possui 5000 pontos, o que permite a aquisição dos dados durante 4 minutos e 10 segundos, tempo suficiente para a realização dos testes de controle necessários. Este módulo também permite que a aquisição seja feita a cada ciclo do motor ao invés de um período fixo. Neste caso, a taxa de amostragem depende da rotação. Esta escolha é feita pelo usuário através da IHM.

O módulo DataLog utiliza a mesma estratégia de identificadores do módulo de comunicação serial. Deste modo pode ser realizada a aquisição de qualquer variável ou parâmetro do sistema, sendo a escolha feita pelo usuário através da IHM. O usuário pode escolher também se a aquisição sobrescreve os dados mais antigos quando o buffer é totalmente ocupado, ou se é interrompida. Ao final do processo de aquisição o usuário pode realizar o carregamento dos dados obtidos para um PC, onde podem ser analisados e armazenados em mídia não volátil. Como a aquisição é feita em memória RAM, os dados obtidos são perdidos se a ECU for desligada. Este módulo é uma ferramenta muito útil para o desenvolvimento e a validação das estratégias de controle implementadas.

3.3.6 Módulo de Controle de Lambda

O módulo de controle de lambda tem a função de manter a mistura ar/combustível próxima da região estequiométrica. Como foi visto na seção 2.3.1.7, os sistemas típicos usam uma ação direta de controle (*feedforward*) e uma realimentação. A ação direta calcula o tempo de injeção base, sobre o qual se aplica a correção de malha fechada. A ação direta pode ser baseada em um controlador *speed density* ou através de mapas de calibração. O sistema desenvolvido utiliza uma estrutura semelhante, que está apresentada na Figura 3-10. Observa-se que o controlador de injeção é formado por três ações diretas de controle: mapa de correção do tempo base, compensação da posição do atuador de marcha lenta e enriquecimento para aceleração. Apresenta também um controlador PI de lambda em malha fechada. A seguir estas ações de controle serão descritas em detalhes.

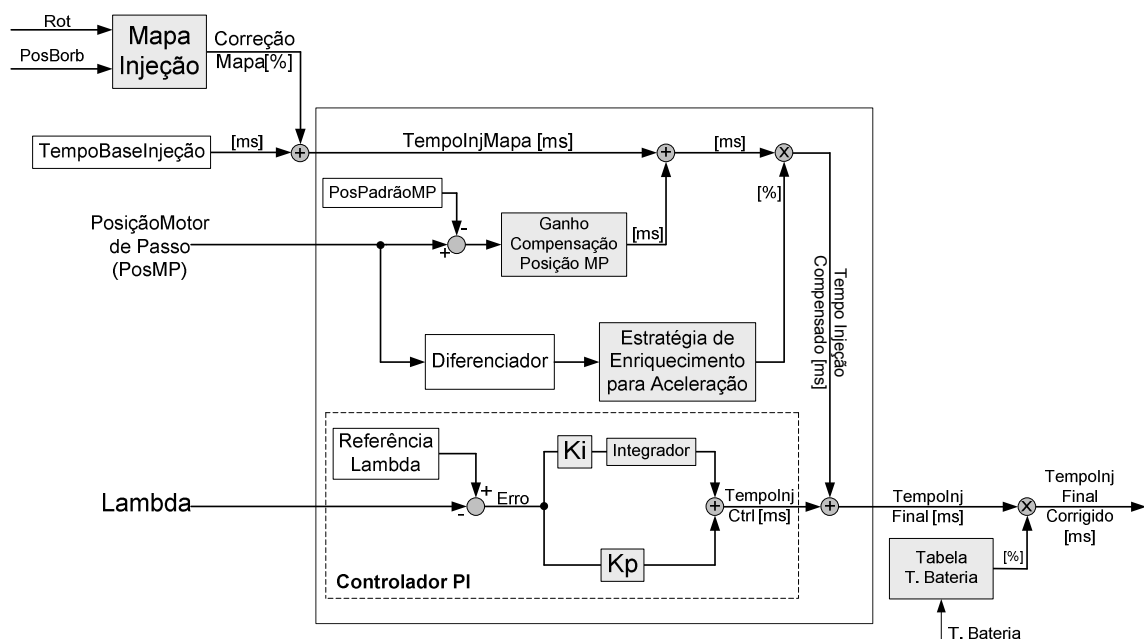


Figura 3-10 – Sistema de controle de injeção, incluindo controle de lambda realimentado.

3.3.6.1 Ação direta do mapa de injeção

O tempo base de injeção é um parâmetro que pode ser alterado via IHM. Sobre ele aplica-se a correção percentual obtida do mapa de injeção em função da rotação e da posição da borboleta, que tem como objetivo ajustar a massa de combustível injetada ao ponto de operação do motor. O mapa de injeção tem grande importância no controle da mistura, por que ajusta o tempo de injeção diretamente, sem esperar 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. Por isso é importante medir as perturbações e atuar assim que elas ocorrerem, mesmo que a mistura não fique exatamente na condição estequiométrica. O controlador PI em malha fechada fica então responsável por corrigir eventuais erros em regime permanente.

3.3.6.2 Ação direta de compensação da posição do atuador de marcha lenta

A principal perturbação na mistura ar/combustível é a vazão mássica de ar no coletor de admissão, que determina a massa de ar que entra no cilindro e deve ser completamente queimada. Uma das maneiras de inferir a vazão mássica de ar no coletor é através da posição da válvula borboleta. No entanto, esta estratégia não considera a vazão de ar que passa através da válvula de marcha lenta, e deste modo, esta perturbação não é percebida pelo sistema. Neste caso 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. Deste modo, foi implementada uma estratégia para compensar diretamente a posição do atuador de marcha lenta. Consiste em considerar uma posição padrão na qual o mapa de injeção deve ser calibrado. 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 quando este se encontra na posição padrão. Verifica-se então qual o desvio gerado no tempo de injeção quando o motor de passo da válvula de marcha lenta é deslocado de uma posição. Com esta informação basta verificar a diferença entre a posição atual do motor de passo e a posição padrão, e adicionar ao tempo de injeção o desvio proporcional a esta diferença. Caso a válvula de marcha lenta esteja mais fechada do que na posição padrão, o desvio adicionado será negativo e o tempo de injeção será 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. Com esta estratégia de compensação direta a mistura não se afasta muito da condição estequiométrica quando o atuador de marcha lenta é deslocado, o que proporciona um melhor desempenho para o controlador de lambda.

3.3.6.3 Ação direta de enriquecimento para aceleração

Outra situação importante ocorre quando o controlador de marcha lenta deseja aplicar uma aceleração rápida no motor, geralmente quando a rotação cai abruptamente devido ao aumento de carga no eixo. Neste caso a válvula de marcha lenta é aberta rapidamente, situação semelhante à aceleração causada pela rápida abertura da válvula borboleta. Como foi visto na seção 2.3.1.8, a aceleração rápida é favorecida pela adoção de mistura rica, que proporciona maior torque em detrimento ao consumo e às emissões. Porém, o aumento súbito da vazão de ar causa um pico de pressão no coletor (será visto em detalhes na seção 3.3.7), que acarreta no empobrecimento da mistura, que por sua vez provoca redução no torque gerado, dificultando a aceleração do motor. Deste modo, foi implementada uma estratégia baseada no enriquecimento para aceleração mostrado na seção 2.3.1.8. Do mesmo modo que a abertura da válvula borboleta deve gerar um enriquecimento da mistura, a abertura rápida do atuador de marcha lenta deve gerar o mesmo efeito. Portanto, a estratégia consiste em verificar a variação da posição do motor de passo e aplicar um ganho percentual no tempo de injeção caso a variação fique acima de um limite mínimo. Em seguida, o ganho aplicado é reduzido a cada ciclo de acordo com uma taxa. A estratégia termina quando o ganho aplicado é reduzido à zero. O ganho percentual, o limite mínimo de variação e a

taxa de redução do ganho são parâmetros do sistema e podem ser configurados através da IHM. Como esta estratégia corresponde a um enriquecimento desejado da mistura, o controlador realimentado deve permanecer em malha aberta durante a sua ocorrência, de forma a não gerar uma ação contrária, tentando corrigir o enriquecimento. Esta estratégia proporciona um melhor desempenho na resposta do motor às acelerações causadas pela abertura da válvula de marcha lenta.

Em algumas ECUs convencionais o mapa de injeção utiliza a pressão no coletor de admissão como medida de carga ao invés da posição da borboleta. Outros sistemas utilizam no cálculo da ação direta de controle o método *speed-density* (ver seção 2.3.1.6), que inclui a medida de pressão no coletor. Nestes sistemas o pico de pressão durante a abertura da válvula de marcha lenta é prontamente compensado e a estratégia de enriquecimento não é necessária. No caso do sistema desenvolvido neste trabalho, é feita uma estimativa da carga a partir da posição da borboleta. No entanto, esta estimativa não é capaz de detectar a alteração na carga causada pela válvula de marcha lenta. Por isso é necessário utilizar a estratégia de enriquecimento para compensar o pico de pressão que o sistema desenvolvido não consegue detectar.

3.3.6.4 Controlador da malha de realimentação

As ações de controle diretas abordadas são capazes de proporcionar boa resposta dinâmica às perturbações de vazão mássica de ar e rotação, compensando seus efeitos. No entanto, o desempenho destas ações de controle depende de calibrações de mapas, tabelas e parâmetros, e tende a se deteriorar com o desgaste do sistema. Além disso, não são capazes de manter a mistura em torno da região estequiométrica com boa precisão, devido a fenômenos complexos da dinâmica do motor que fazem com que o sistema apresente variações entre ciclos mesmo que todos os parâmetros controláveis sejam mantidos constantes. Isso se explica, por exemplo, pelo fato de que as queimas nunca são idênticas, sempre ocorrem variações na atomização do combustível e na distribuição da mistura na câmara de combustão, fenômenos de ignição espontânea, presença de gases residuais na câmara, diferenças entre cilindros, entre outros fatores. Deste modo, o lambda está sempre sofrendo perturbações que não são percebidas pelas ações diretas de controle e, portanto, a realimentação torna-se indispensável para garantir que a mistura permaneça próxima da condição estequiométrica.

Neste trabalho foi implementado um controlador proporcional integral que atua em paralelo com as ações de controle diretas. Para o ajuste dos ganhos proporcional (K_p) e integral (K_i) do controlador foi utilizada uma abordagem clássica baseada em um modelo linear que caracteriza a relação entre o tempo de injeção aplicado e o valor de lambda obtido. Apesar das características não-lineares do sistema, pode-se utilizar um modelo linear para descrevê-lo de forma satisfatória dentro de uma condição limitada de operação. Além disso, o principal objetivo desta abordagem é obter apenas valores iniciais para os ganhos, que devem, posteriormente, ser ajustados durante os testes experimentais.

3.3.6.5 Obtenção do modelo

Para a determinação do modelo foram realizados testes de resposta ao degrau do lambda em função do tempo de injeção. A condição de operação adequada para a obtenção do modelo requer rotação próxima da referência de marcha lenta e mistura em torno da condição estequiométrica. No entanto, algumas considerações devem ser feitas com relação a esta condição. A aplicação de um degrau de tempo de injeção requer que o seu valor não varie com a rotação. Deste modo, o mapa de correção do tempo base deve ser mantido com todos os valores iguais, de forma que o tempo de injeção não varie devido a oscilações na rotação. Porém, cada valor de rotação requer um tempo de injeção para que a mistura seja estequiométrica. No caso específico da região de marcha lenta, o tempo de injeção que gera lambda igual a 1 é inversamente proporcional à rotação. Deste modo, não é possível adotar um valor fixo de tempo de injeção que mantenha o motor funcionando de forma estável, na condição estequiométrica, independente da rotação. À medida que o tempo de injeção é ajustado, de forma que a relação ar-combustível se aproxima da estequiométrica, a própria oscilação natural da rotação faz com que a mistura entre na região pobre, causando uma tendência de queda cada vez maior na rotação. Por este motivo foi necessário fazer os testes com a mistura rica.

Durante a realização dos testes a válvula borboleta foi mantida fechada. A posição do atuador de marcha lenta foi configurada de forma a manter o motor em torno da rotação de 1050 rpm. Todos os pontos do mapa de correção do tempo base de injeção foram configurados para 20% de correção. Neste caso, o tempo de injeção aplicado ao motor é influenciado apenas pelo parâmetro tempo base de injeção. Deste modo, os testes de resposta ao degrau foram realizados alterando-se o valor deste parâmetro através da IHM. O sensor UEGO foi utilizado para medir a variação do lambda durante cada degrau. O módulo DataLog (seção 3.3.5) foi utilizado para armazenar os dados na frequência de 20 Hz. Foram realizados vários testes com degraus positivos e negativos e amplitudes diferentes. Os resultados mostraram que, na faixa de operação considerada, o sistema apresenta comportamento de 1ª ordem com tempo morto. A Tabela 3-5 mostra os parâmetros aproximados para alguns testes.

Tabela 3-5 – Resultados dos testes de resposta do lambda ao degrau de tempo de injeção. Obtenção dos parâmetros de um modelo de 1ª ordem com tempo morto.

Teste [N°]	Ampl. Degrau [ms]	Instante Degrau [segundos]	Instante Inicio Resp [segundos]	Amplitude Resp [lambda]	Const. Tempo [segundos]	Ganho [lambda/ms]	Tempo Morto [segundos]
1	0,15	2,78	2,95	-0,052	0,20	-0,3467	0,17
2	-0,15	3,47	3,66	0,053	0,21	-0,3533	0,19
3	0,30	3,99	4,20	-0,101	0,20	-0,3367	0,21
4	0,30	3,18	3,35	-0,105	0,24	-0,3500	0,17
5	-0,30	2,05	2,25	0,099	0,23	-0,3300	0,20
6	-0,30	2,32	2,56	0,101	0,25	-0,3367	0,24
7	0,45	4,41	4,62	-0,150	0,22	-0,3333	0,21
8	-0,45	4,86	5,08	0,148	0,20	-0,3289	0,22
Média					0,219	-0,3394	0,201
Desvio Padrão					0,020	0,0093	0,024

A Figura 3-11 e a Figura 3-12 mostram testes de validação com degraus positivos e negativos e com amplitudes diferentes. O erro percentual absoluto máximo obtido nos testes de

validação realizados foi inferior a 3%. Deste modo, pode-se considerar que o modelo obtido descreve o comportamento do sistema de forma satisfatória dentro das condições dos testes, ou seja, rotação em torno de 1000 rpm e mistura rica. No entanto, na condição de mistura pobre o sistema real se afasta deste comportamento linear e, conseqüentemente, do modelo apresentado. A equação 3-1 mostra a função de transferência do modelo obtido.

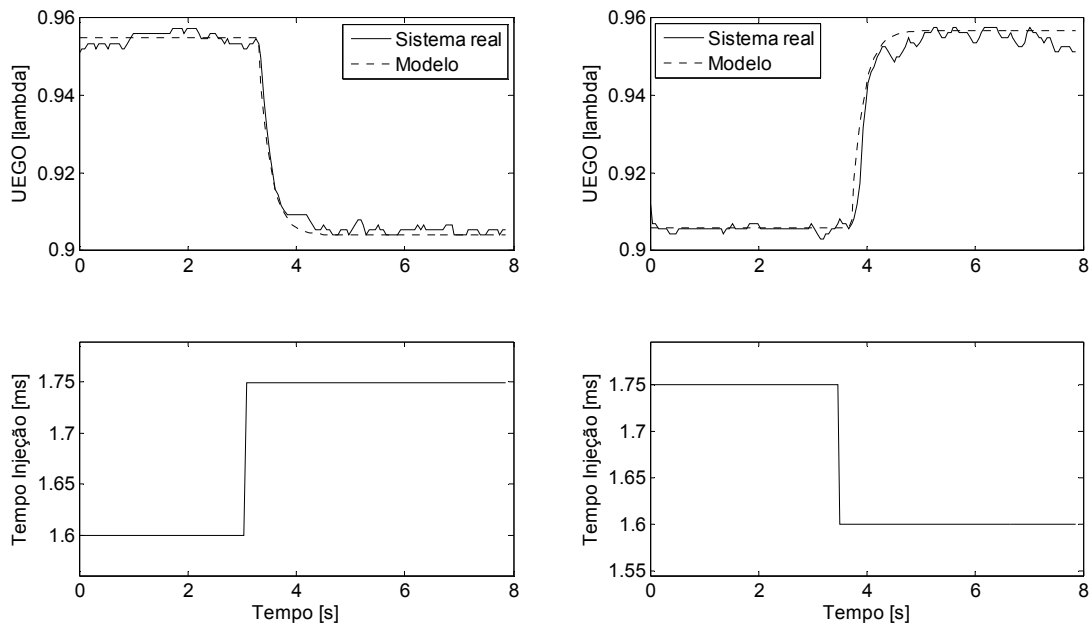


Figura 3-11 – Validação do modelo com resposta do lambda ao degrau positivo e negativo de tempo de injeção, com amplitude igual a 0,15 ms.

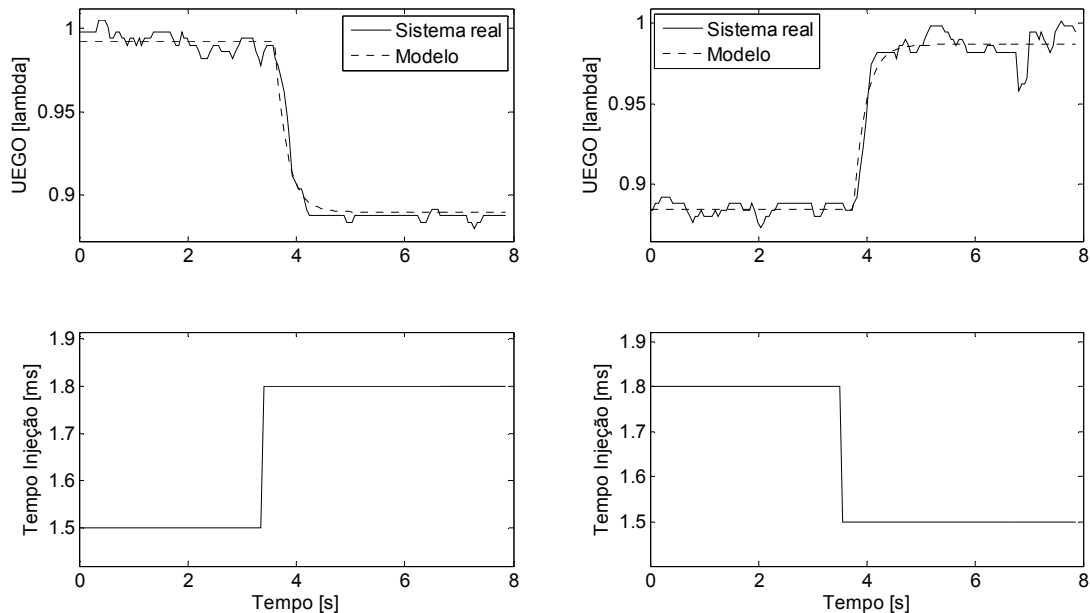


Figura 3-12 - Validação do modelo com resposta do lambda ao degrau positivo e negativo de tempo de injeção, com amplitude igual a 0,30 ms.

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

Onde: $K \rightarrow$ Ganho do sistema [λ/ms]; **3-1**

$\tau \rightarrow$ Constante de tempo [seg];

$\theta \rightarrow$ Tempo morto [seg];

3.3.6.6 Projeto do controlador

Com base no modelo obtido foi projetado um controlador PI pelo método da síntese direta [47]. Como este sistema apresenta uma razão entre tempo morto (θ) e constante de tempo (τ) elevada, a escolha da constante de tempo em malha fechada (τ_c) deve ser conservativa [47]. Isso evita a obtenção de ganhos elevados que podem levar este sistema à instabilidade. Portanto, a constante de tempo em malha fechada escolhida foi de 0,2 segundos. Os cálculos dos ganhos proporcional (K_p) e integral (K_i) estão apresentados nas equações 3-2 e 3-3, onde τ_i corresponde ao tempo integral do controlador PI.

$$K_p = \frac{1}{K} \cdot \frac{\tau}{\theta + \tau_c} = \frac{0,22}{-0,34 \cdot (0,20 + 0,2)} = -1,62 \quad \text{3-2}$$

$$\begin{cases} K_i = \frac{K_p}{\tau_i} \\ \tau_i = \tau \end{cases} \Rightarrow K_i = \frac{K_p}{\tau} = \frac{1,62}{0,22} = 7,36 \quad \text{3-3}$$

No entanto, estes ganhos somente podem ser aplicados caso a realimentação seja feita através do sensor UEGO. A utilização do EGO implica em uma característica não-linear na malha de realimentação, o que torna inadequada a abordagem clássica através de modelos lineares. Deste modo, foi utilizada uma estratégia alternativa para obter valores iniciais para os ganhos do controlador PI realimentado pelo sensor EGO. Esta estratégia consiste em simular a malha de controle com um controlador PI e o modelo obtido com sensor UEGO, e aplicar a não-linearidade do EGO na malha de realimentação. Este sistema pode ser simulado para vários valores de ganhos K_p e K_i , de modo a se obter um comportamento satisfatório do λ . A Figura 3-13 mostra o modelo da malha de controle, simulado no ambiente Simulink do Matlab [57].

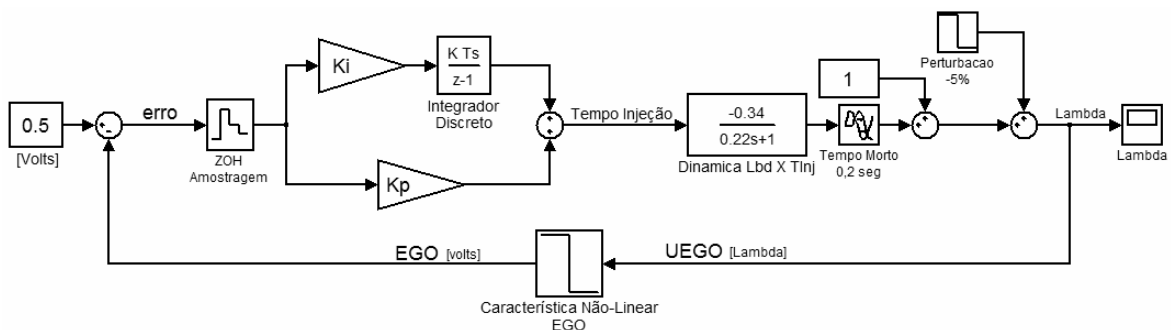


Figura 3-13 – Modelo da malha de controle de lambda com característica não-linear do EGO na realimentação.

O modelo consiste em um controlador PI gerando a ação de controle para o modelo dado pela função de transferência mostrada na equação 3-1. A saída do modelo corresponde ao valor do lambda que seria obtido pelo sensor UEGO. A medição do EGO é simulada através de um mapeamento que aproxima a curva não-linear deste sensor. A aproximação adotada consiste em assumir valor de medição igual a 0,9 volts quando a mistura está rica ($\lambda > 1$) e valor igual 0,1 volts quando está pobre ($\lambda < 1$). Neste caso a referência para mistura estequiométrica é de 0,5 volts. O controlador recebe o valor do erro no lambda, sendo utilizado um retentor de ordem zero (*Zero Order Hold* - ZOH) para simular o efeito da amostragem. No sistema real o controlador de lambda é executado a cada ciclo do motor e, portanto, seu período de amostragem varia com a rotação. No modelo foi adotada a simplificação de se considerar o período de amostragem fixo e com o valor correspondente à rotação de 900 rpm. Deste modo, o valor de 70 ms foi utilizado. Na ação integral foi utilizado um integrador de tempo discreto, que realiza a integração apenas nos instantes de amostragem. Deste modo, o modelo agrega características digitais do sistema real. É importante ressaltar que este modelo corresponde a uma aproximação bastante simplificada da dinâmica do motor. No entanto, seu objetivo é fornecer valores iniciais para os ganhos do controlador, que possam ser ajustados empiricamente no sistema real. Este modelo foi simulado para vários valores de ganhos K_p e K_i .

Algumas considerações devem ser feitas com relação ao ajuste destes ganhos. Como foi visto anteriormente, a malha de realimentação do lambda tem a função principal de corrigir erros estacionários, já que o seu desempenho dinâmico é prejudicado pelo elevado tempo morto e pela característica não-linear da medição. As ações diretas de controle ficam responsáveis por compensar as perturbações de forma a garantir um desempenho dinâmico satisfatório. Além disso, já foi visto também que o controle de lambda usando sensor EGO proporciona um comportamento oscilatório em torno da referência. No sistema real, esta variação da mistura em torno da condição estequiométrica influencia a rotação, que tende a oscilar na mesma frequência. No entanto, se o lambda oscilar em alta frequência, a dinâmica do motor filtra esta influência e a rotação tende a ficar estável. Esta observação é importante por que a perturbação na rotação, causada pelo lambda, prejudica o desempenho do controlador de marcha lenta, que será abordado na seção 3.3.7. Ao mesmo tempo, a amplitude de oscilação do lambda deve ser mantida pequena, para não prejudicar o desempenho do TWC e elevar os níveis de emissões.

Com base nas observações feitas, foram estabelecidos parâmetros de comparação para a seleção dos melhores ganhos: frequência e amplitude da oscilação do lambda, tempo de rejeição a uma perturbação de 5% no lambda, e índice de desempenho ISE (*Integral Square Error*). O índice ISE indica em qual resultado o lambda permaneceu mais próximo da condição estequiométrica, ao longo de todo o teste. Sua fórmula está apresentada na equação 3-4 [16], onde o limite de integração dado pelo parâmetro T é igual ao tempo de duração do teste.

$$ISE = \int_0^T erro^2(t)dt \quad 3-4$$

Foram realizadas várias simulações com diferentes valores de ganhos Kp e Ki. Foram escolhidos os ganhos que proporcionaram o menor ISE, mas mantendo o tempo de rejeição à perturbação próximo de 2 segundos. Com este critério objetiva-se obter uma resposta com o lambda mais próximo da condição estequiométrica ao longo do teste (menor ISE), mas ao mesmo tempo garantindo um desempenho aceitável na rejeição à perturbação. A Tabela 3-6 mostra o comportamento dos parâmetros de desempenho em torno do ganho proporcional escolhido, enquanto a Tabela 3-7 mostra o comportamento em torno do ganho integral.

Tabela 3-6 – Resultados de simulações com ganho Kp variando.

Kp	Ki	ISE	T. Rejeição Pert. [seg]	Freq. de Oscilação [Hz]	Amplit. Oscilação [%]
0,05	0,18	0,000152	1,97	1,1900	0,5209
0,04	0,18	0,000150	1,98	1,0200	0,5115
0,03	0,18	0,000139	2,01	0,8929	0,4874
0,02	0,18	0,000199	2,13	0,7140	0,5388
0,01	0,18	0,000303	2,21	0,5952	0,6633

A Tabela 3-6 mostra que o ganho proporcional igual a 0,03 proporciona o menor índice ISE e a menor amplitude de oscilação. O aumento deste ganho eleva a frequência de oscilação. Já o tempo de rejeição à perturbação sofre pouca influência do ganho proporcional. A característica não-linear do sensor EGO faz com que a transição entre mistura rica e pobre seja abrupta. Neste caso, a ação de controle proporcional do controlador PI sofre uma variação abrupta, o que pode causar uma perturbação na rotação. Deste modo, em um sistema real o ganho Kp deve ser limitado, de forma a se obter uma melhor estabilidade para o sistema.

A Tabela 3-7 mostra que o aumento do ganho integral causa uma diminuição da frequência de oscilação e um aumento na amplitude, mas também proporciona um menor tempo de rejeição à perturbação. Por outro lado, a escolha de um ganho Ki pequeno faz com que o lambda oscile em alta frequência e com pequena amplitude, o que seria ideal para o comportamento do lambda. No entanto, o sistema demoraria a corrigir perturbações. Na prática, não se pode adotar um ganho Ki pequeno, por que, como foi visto na seção 3.3.6.4, a dinâmica complexa do motor faz com que ocorram pequenas perturbações no lambda constantemente, e por isso é importante que o tempo de rejeição não seja elevado. A escolha do ganho integral igual a 0,18 proporciona um tempo de rejeição em torno de 2 segundos, valor que está de acordo com o critério definido para a escolha dos ganhos.

Tabela 3-7 - Resultados de simulações com ganho Ki variando.

Kp	Ki	ISE	T. Rejeição Pert. [seg]	Freq. de Oscilação [Hz]	Amplit. Oscilação [%]
0,03	0,14	0,000085	2,44	1,0200	0,3866
0,03	0,16	0,000132	2,26	0,9105	0,4688
0,03	0,18	0,000139	2,01	0,8929	0,4874
0,03	0,20	0,000187	1,91	0,8211	0,5964
0,03	0,22	0,000297	1,76	0,7937	0,6173

Uma abordagem alternativa para a análise do sistema apresentado na Figura 3-13 consiste na utilização do método da função descritiva [58], que possibilita o estudo da estabilidade de muitos sistemas de controle não-lineares simples, do ponto de vista do domínio da frequência. Este método supõe que apenas a componente harmônica fundamental da saída do elemento não-linear é significativa. Deste modo, é possível fazer um estudo gráfico no domínio da frequência, de forma a se prever a estabilidade do sistema. No caso de ocorrência de uma oscilação mantida na saída do sistema, o método permite determinar a amplitude e a frequência da oscilação. No entanto, tem a desvantagem de não fornecer informações sobre as características da resposta transitória. O método da função descritiva pode ser aplicado ao controlador de lambda em trabalhos futuros.

3.3.6.7 Simulação

Os ganhos escolhidos proporcionam, na simulação do modelo, uma oscilação do lambda com 0,5% de amplitude em relação à referência, frequência de 0,9 Hz e tempo de rejeição à perturbação próximo de 2 segundos. A Figura 3-14 mostra o resultado obtido na simulação do modelo da malha de controle de lambda, utilizando os ganhos escolhidos. O gráfico do sensor UEGO mostra duas linhas tracejadas indicando os limites de tolerância de 1% em relação à condição estequiométrica, que pode ser considerada a região de controle alvo.

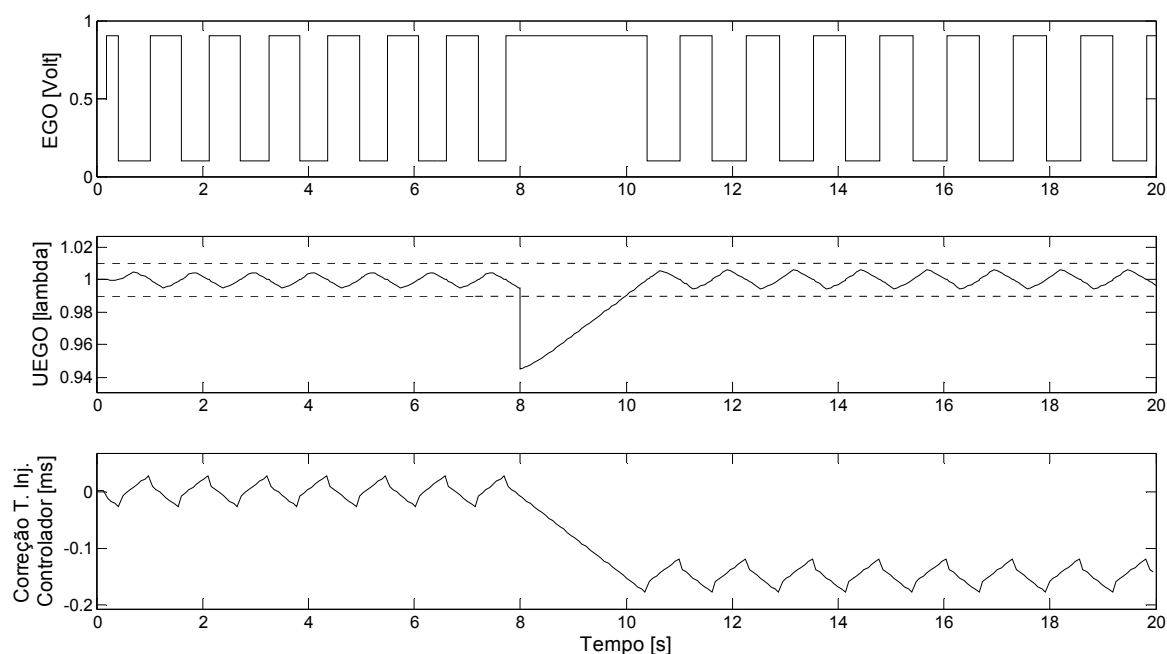


Figura 3-14 – Resultado obtido na simulação do modelo da malha de controle de lambda, utilizando os ganhos escolhidos.

A partir dos resultados obtidos com a simulação do modelo da malha de controle de lambda foi possível obter valores iniciais para os ganhos do controlador PI. Foi possível também analisar a influência dos ganhos nas características da resposta do sistema, o que proporciona uma melhor compreensão do comportamento do controlador PI com realimentação do sensor EGO. No entanto,

deve ser ressaltado que o modelo utilizado corresponde a uma aproximação bastante simplificada da dinâmica complexa do motor. Deste modo, espera-se que sejam necessários ajustes empíricos nos ganhos de modo a se obter um desempenho satisfatório no sistema real, com o λ oscilando dentro da região de tolerância em torno da condição estequiométrica. Além disso, as variações entre ciclos citadas na seção 3.3.6.4 causam constantemente perturbações no λ e, desta forma, não se espera que o sistema real apresente um comportamento fixo como o observado na Figura 3-14.

Por fim, o módulo de controle de λ aplica sobre o tempo de injeção uma correção percentual, gerada pela tabela de injeção em função da tensão na bateria, cujo objetivo é manter uma relação direta entre o tempo de injeção e a massa de combustível injetada. Esta correção já foi abordada na seção 3.3.2. Deve ser ressaltado que o sistema de controle desenvolvido é focado na condição de marcha lenta e, deste modo, não são abordadas condições de partida a frio, aquecimento do motor e aceleração rápida, por exemplo. Estas condições podem ser abordadas em trabalhos futuros.

3.3.7 Módulo de Controle de Marcha Lenta

Como foi visto na seção 2.3.3 o módulo de controle de marcha lenta tem a função de manter o motor funcionando quando este se encontra em baixa rotação e a borboleta está fechada. Nesta condição a rotação deve ser a mais baixa possível de forma a minimizar o consumo de combustível, porém, deve ser suficientemente alta para evitar vibrações elevadas do motor e garantir a rejeição às perturbações de carga no eixo. Neste trabalho foi desenvolvido e implementado um controlador PI que regula a rotação através da vazão de ar no coletor, usando uma válvula baseada em motor de passo. Esta seção descreve com detalhes o controlador de marcha lenta.

O controlador de marcha lenta possui apenas a ação de realimentação através da rotação, ou seja, não possui nenhuma ação direta de controle como no caso do sistema de controle de λ e, deste modo, fica responsável pelo desempenho dinâmico e estacionário. Sua atuação em malha fechada ocorre apenas na condição de marcha lenta. Quando a borboleta não está fechada o controlador permanece em malha aberta, e deve ser adotada alguma estratégia de posicionamento do atuador de marcha lenta, porém este assunto está além do escopo deste trabalho. Após o fechamento da borboleta, o controlador deve passar para a condição de malha fechada de forma suave, sem variações abruptas na ação de controle. A principal função deste controlador é a rejeição às perturbações. Mudanças na referência de rotação são adotadas em sistemas convencionais como parte da estratégia de aquecimento do motor, no entanto, estas mudanças são graduais e nunca abruptas. Deste modo, o controlador de marcha lenta deve ser otimizado para melhor desempenho na rejeição às perturbações. A adoção de um controlador PI justifica-se pelo fato de que a condição de operação em malha fechada é limitada, e neste caso a dinâmica do motor pode ser considerada linear, como será visto mais adiante.

3.3.7.1 Estrutura do Controlador

Para a implementação do controlador PI de marcha lenta foi adotada um estrutura simples proposta em [48], que proporciona vantagens ao sistema a ser controlado. Esta estrutura consiste basicamente em uma ação proporcional através de um ganho e uma realimentação positiva através de um filtro passa - baixas de 1ª ordem, como mostra a Figura 3-15.

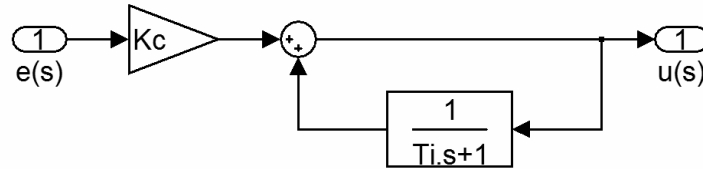


Figura 3-15 – Estrutura adotada para o controlador PI de marcha lenta.

$$u(s) = K_C \cdot e(s) + \frac{u(s)}{T_i \cdot s + 1} \quad 3-5$$

$$u(s) = K_C \cdot \left\{ \frac{(T_i \cdot s + 1)}{s \cdot T_i} \right\} \cdot e(s) = K_C \cdot \left\{ 1 + \frac{1}{T_i \cdot s} \right\} \cdot e(s)$$

Onde: $K_C \rightarrow$ Ganho do controlador PI; 3-6

$T_i \rightarrow$ Tempo integral;

$e(s) \rightarrow$ Erro medido;

$u(s) \rightarrow$ Ação de controle.

Este sistema é descrito pela equação 3-5, que pode ser facilmente transformada na equação 3-6, que por sua vez corresponde à equação de um controlador PI. Adicionando-se a limitação da ação de controle e a chave seletora de malha aberta/fechada, obtêm-se a estrutura mostrada na Figura 3-16.

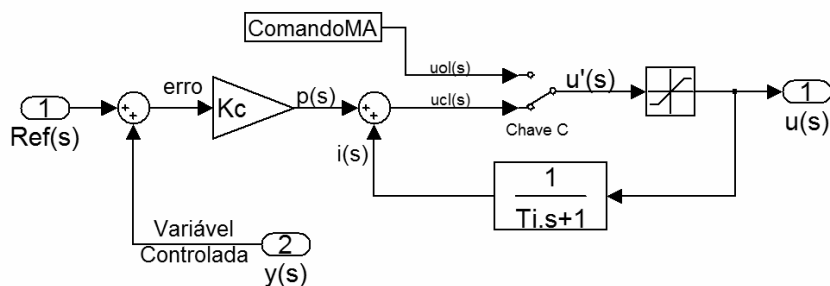


Figura 3-16 – Estrutura do controlador PI com limitação da ação de controle e chave seletora para malha aberta/fechada.

A ação de controle $u'(s)$ pode ser calculada pelo controlador ou pode ser selecionada diretamente através de comando externo, dependendo da posição da chave C. Quando C determina atuação em malha fechada, $u'(s)$ corresponde à soma das ações proporcional, $p(s)$, e integral, $i(s)$. O valor calculado é limitado de acordo com as características do atuador e resulta na ação de controle final, $u(s)$. Observa-se que a ação integral corresponde à ação de controle final filtrada por um passa - baixas de 1ª ordem, com ganho unitário e constante de tempo igual ao tempo integral, T_i .

Quando $u'(s)$ está dentro dos limites do atuador, o sistema atua como um controlador PI normal. No entanto, quando um erro persistente na malha faz com que $u'(s)$ ultrapasse os limites do atuador, a saída de controle final $u(s)$ fica saturada no valor limite. Deste modo, a ação integral também permanece limitada a este valor, mesmo que o erro não seja nulo. Observa-se que a limitação da ação de controle realiza também a função de saturação da ação integral. Assim que o erro muda de sinal, $u'(s)$ é imediatamente reduzido abaixo dos limites do atuador, e o mesmo ocorre com a ação de controle final $u(s)$, o que indica que a dessaturação da ação integral é imediata. Quando a chave C determina atuação em malha aberta, a ação de controle é obtida externamente, sendo também limitada pelo controlador antes de gerar a ação final $u(s)$. Se $u(s)$ permanecer fixo por um intervalo de tempo maior do que aproximadamente 4 vezes T_i , a ação integral atinge o valor da ação de controle. Neste caso, o controlador está pronto para entrar de forma suave no modo de malha fechada, desde que o erro esteja pequeno. Portanto, para uma transição suave de malha aberta para fechada, basta fazer com que a rotação fique próxima da referência, esperar o intervalo maior do que 4 vezes T_i e em seguida alterar a chave. É possível também inicializar diretamente o integrador com o valor da ação de controle e, neste caso, não é necessário esperar um intervalo de tempo para adotar o controle em malha fechada. Esta estrutura de controlador PI é bastante adequada para este trabalho por que:

- Proporciona limitação da ação de controle, que corresponde aos limites de passos do motor de passo utilizado, no caso 0 até 220 (ver seção 3.2.1.3);
- Proporciona limitação da ação integral e estratégia de dessaturação;
- Proporciona passagem suave de malha aberta para malha fechada, o que é muito útil quando o motor entra na condição de marcha lenta.
- Proporciona implementação digital simples;

3.3.7.2 Discretização

A implementação digital deste controlador requer a aproximação da função contínua por uma função discreta. Uma abordagem bastante utilizada consiste em se considerar a variável complexa 's' um operador diferencial e '1/s' um operador integral. Neste caso, pode-se empregar métodos tradicionais de integração numérica para converter uma função em S para Z. O método de integração retangular aproxima o sinal contínuo mantendo o valor das amostras fixo durante todo o período de amostragem. Um método mais preciso é a integração trapezoidal que aproxima o sinal contínuo através de retas entre as amostras. Neste trabalho foi utilizada a integração trapezoidal cuja relação entre S e Z é dada pela equação 3-7, onde T_s corresponde ao período de amostragem.

$$s \approx \frac{2 \cdot (1 - z^{-1})}{T_s \cdot (1 + z^{-1})} \quad 3-7$$

O controlador contínuo pode ser descrito pelas equações 3-8, 3-9, 3-10, 3-11 e 3-12. Este controlador deve ser transformado do domínio S para o domínio Z, de modo a ser implementado na forma de equações de diferenças. Para todas as equações a conversão de S para Z é direta, exceto

para a equação do integrador (3-9), na qual é necessário aplicar o método de integração numérica trapezoidal.

$$p(s) = K_C \cdot (ref(s) - y(s)) \quad 3-8$$

$$i(s) = \frac{1}{Ti \cdot s + 1} \quad 3-9$$

$$u_{CL}(s) = p(s) + i(s) \quad 3-10$$

$$u'(s) = \begin{cases} Se : C = MF \rightarrow u'(s) = u_{CL}(s) \\ Se : C = MA \rightarrow u'(s) = u_{OL}(s) \end{cases} \quad 3-11$$

$$u(s) = \begin{cases} Se : u'(s) > LimMax \rightarrow u(s) = LimMax \\ Se : u'(s) < LimMin \rightarrow u(s) = LimMin \\ Senão : u(s) = u'(s) \end{cases} \quad 3-12$$

Após a aplicação da equação 3-7 na 3-9, obtém-se o controlador discreto na forma de equações de diferenças, pronto para a implementação no DSP. Estas equações estão apresentadas a seguir.

$$p[k] = K_C \cdot (ref[k] - y[k]) \quad 3-13$$

$$i[k] = K_1 \cdot i[k-1] + K_2 \cdot u[k] + K_2 \cdot u[k-1] \quad 3-14$$

$$K_1 = \frac{(2 \cdot Ti - Ts)}{(2 \cdot Ti + Ts)} \quad 3-15$$

$$K_2 = \frac{Ts}{(2 \cdot Ti + Ts)} \quad 3-16$$

$$u_{CL}[k] = p[k] + i[k] \quad 3-17$$

$$u'[k] = \begin{cases} Se : C = MF \rightarrow u'[k] = u_{CL}[k] \\ Se : C = MA \rightarrow u'[k] = u_{OL}[k] \end{cases} \quad 3-18$$

$$u[k] = \begin{cases} Se : u'[k] > LimMax \rightarrow u[k] = LimMax \\ Se : u'[k] < LimMin \rightarrow u[k] = LimMin \\ Senão : u[k] = u'[k] \end{cases} \quad 3-19$$

3.3.7.3 Obtenção do Modelo

Os ganhos do controlador PI de marcha lenta foram calculados pelo método da síntese direta [47], com base em um modelo linear do sistema capaz de descrever de forma aproximada a dinâmica da rotação em função da posição do atuador de marcha lenta, quando o motor encontra-se na condição de marcha lenta.

Para a determinação do modelo foram realizados testes de resposta ao degrau da rotação em função da posição do motor de passo. A condição de operação adequada para a obtenção do modelo requer válvula borboleta fechada, rotação próxima da referência de marcha lenta e mistura

em torno da condição estequiométrica. No entanto, como foi visto nas seções 3.3.6.2 e 3.3.6.6, a variação de posição do atuador de marcha lenta causa perturbação no λ , que por sua vez influi na rotação. Esta influência entre as malhas de λ e marcha lenta ocorre devido à característica multivariável do sistema. No presente trabalho, a solução de controle adotada é baseada em uma abordagem multimalhas, na qual as malhas são tratadas de forma independente²³. Neste caso, o modelo a ser obtido para o projeto do controlador PI de marcha lenta deve relacionar apenas a rotação com a posição do motor de passo. Deste modo, optou-se por manter o controlador de λ em malha fechada durante os testes, para evitar a influência do λ na rotação devido à variação da posição do atuador de marcha lenta. Deve ser ressaltado que o controle de λ foi adotado nestes testes apenas para proporcionar uma condição mais adequada para a obtenção do modelo. Não é objetivo desta seção analisar o ajuste e o desempenho do controle de λ em malha fechada, o que será feito com detalhes no Capítulo 4.

O módulo de controle de λ foi inicialmente configurado para atuar com a estratégia de enriquecimento para aceleração desabilitada. Deste modo, a ação de controle direta foi baseada apenas no mapa de injeção e na compensação da posição do motor de passo. O controlador PI de λ foi habilitado e configurado para atuar com realimentação do sensor EGO. A estratégia de calibração do mapa de injeção e o ajuste dos parâmetros do controlador são abordados com detalhes no Capítulo 4. O mapa de avanço de ignição foi mantido com 10° em todos os pontos. Os testes foram realizados alterando-se o valor da posição do motor de passo através da IHM. O módulo DataLog foi utilizado para armazenar os dados na frequência de 20 Hz. Foram realizados vários testes com degraus positivos e negativos e amplitudes diferentes. Evitou-se aplicar degraus de amplitude elevada para não excitar a dinâmica não linear do sistema. Além disso, como foi visto na seção 3.2.1.3, cada passo do atuador requer o tempo de 5 ms. Sendo o período de amostragem de 50 ms, conclui-se que a variação máxima a ser aplicado é de 10 passos para que os dados amostrados indiquem um degrau. Para o sistema real um deslocamento de 10 passos pode ser considerado um degrau, já que o tempo de posicionamento gasto, 50 ms, é da ordem de 10 vezes menor em relação à constante de tempo do sistema, como será observado no modelo.

Analisando inicialmente os resultados obtidos para os degraus positivos, observa-se que o sistema pode ser descrito por um modelo de 1ª ordem com tempo morto. A Tabela 3-8 mostra os parâmetros de algumas respostas obtidas. O desvio padrão obtido chega a aproximadamente 8% no caso do parâmetro de tempo morto, o que se deve às características não-lineares do sistema sendo excitadas pela variação de amplitude do degrau aplicado. No entanto, pode-se considerar que o comportamento do sistema é aproximadamente linear para a condição testada. A partir da média dos parâmetros obtidos, chega-se à função de transferência do modelo apresentada na equação 3-20.

²³ Uma discussão sobre a característica multivariável do sistema e a abordagem multimalhas utilizada encontra-se na seção 3.3.7.6.

Tabela 3-8 – Resultados obtidos em testes de resposta da rotação ao degrau positivo na posição do motor de passo.

Teste [N°]	Ampl. Degrau [passos]	Instante Degrau [segundos]	Instante Início Resp. [segundos]	Ampl. Resp [rpm]	Const. Tempo [segundos]	Ganho [rpm/passos]	Tempo Morto [segundos]
1	5	3,35	3,66	-112	0,47	-22,40	0,31
2	5	4,67	4,96	-114	0,49	-22,80	0,29
3	5	3,95	4,27	-111	0,52	-22,20	0,32
4	8	3,63	3,96	-176	0,48	-22,00	0,33
5	8	5,12	5,39	-174	0,53	-21,75	0,27
6	10	9,34	9,62	-213	0,49	-21,30	0,28
7	10	4,20	4,49	-217	0,54	-21,70	0,29
8	10	6,31	6,58	-210	0,52	-21,00	0,27
Média					0,51	-21,89	0,30
Desvio Padrão					0,03	0,58	0,02

$$G(s) = \frac{K}{\tau \cdot s + 1} \cdot e^{-\theta \cdot s} = \frac{-22}{0,5 \cdot s + 1} \cdot e^{-0,3 \cdot s} \quad 3-20$$

A validação do modelo obtido está apresentada na Figura 3-17. Observa-se que o sistema inicialmente está com o lambda oscilando em torno da condição estequiométrica devido ao controle em malha fechada. O atuador de marcha lenta se encontra na posição 135, o que mantém o motor em torno de 1100 rpm. O degrau é aplicado com a alteração da posição do motor de passo de 135 para 140. Esta alteração positiva corresponde ao fechamento da válvula de marcha lenta, que conseqüentemente reduz a vazão de ar no coletor. O fechamento da válvula faz com que o tempo de injeção seja reduzido, devido à ação direta de controle que realiza a compensação da posição do motor de passo. No entanto, esta redução no tempo de injeção não impede que a mistura fique rica, como pode ser observado do gráfico C.

Uma consideração importante deve ser feita neste ponto. Do ponto de vista do coletor de admissão, o motor atua como uma bomba de ar, aspirando o ar do coletor para dentro dos cilindros. Quanto maior a rotação, maior a força de aspiração e deste modo menor é a pressão no coletor de admissão. Quando a válvula de marcha lenta é fechada de cinco posições, ocorre uma queda na pressão devido à menor vazão mássica de ar no coletor. No entanto, à medida que a rotação diminui ocorre uma redução na força de aspiração, o que faz a pressão no coletor aumentar como pode ser observado no gráfico D. Deste modo, conclui-se que o fechamento da válvula de marcha lenta causa uma queda momentânea na pressão no coletor (gráfico D), que é responsável pelo enriquecimento da mistura. Contudo, este enriquecimento tem pouca influência na queda da rotação, que varia como um sistema de 1ª ordem com tempo morto. O erro percentual absoluto máximo obtido durante os testes de validação foi de 4,7%. Portanto, pode-se considerar que o modelo obtido explica de forma satisfatória o comportamento da rotação diante de uma variação positiva na posição do motor de passo.

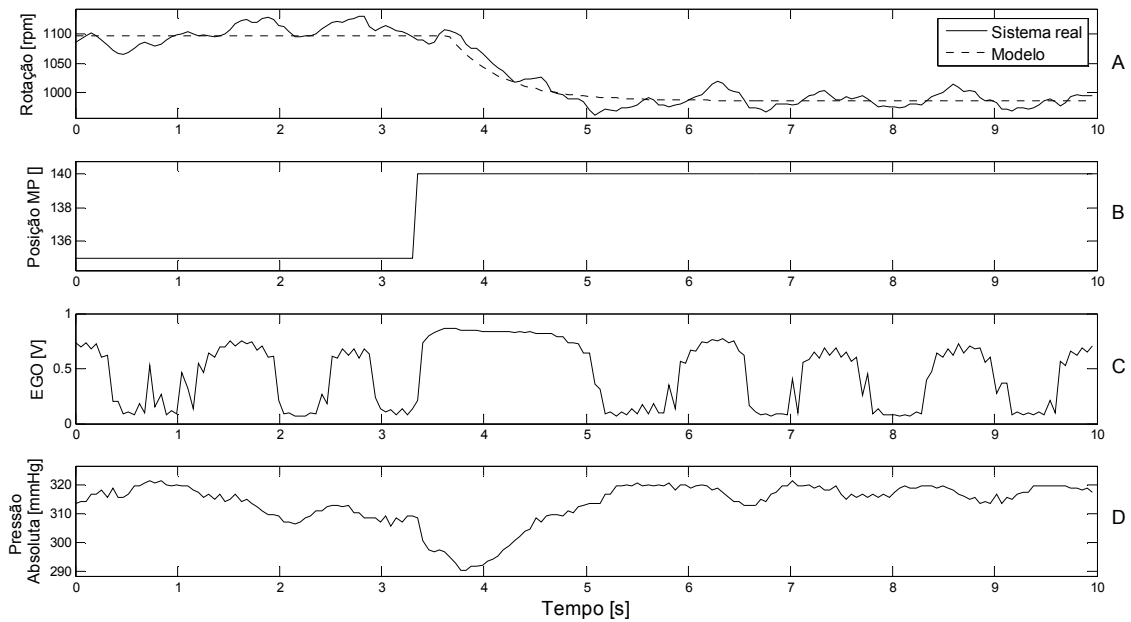


Figura 3-17 – Validação do modelo obtido para a dinâmica da rotação em função da variação positiva da posição do motor de passo.

No caso da aplicação de um degrau negativo o comportamento do sistema é mais complicado. O degrau negativo corresponde à abertura da válvula de marcha lenta, que acarreta em um aumento na vazão mássica de ar no coletor de admissão. Neste caso, a pressão aumenta, sendo reduzida novamente à medida que a rotação e a força de aspiração aumentam. Deste modo, conclui-se que a abertura da válvula de marcha lenta causa um pico na pressão no coletor, que é responsável pelo empobrecimento da mistura. A Figura 3-18 ilustra as observações acima.

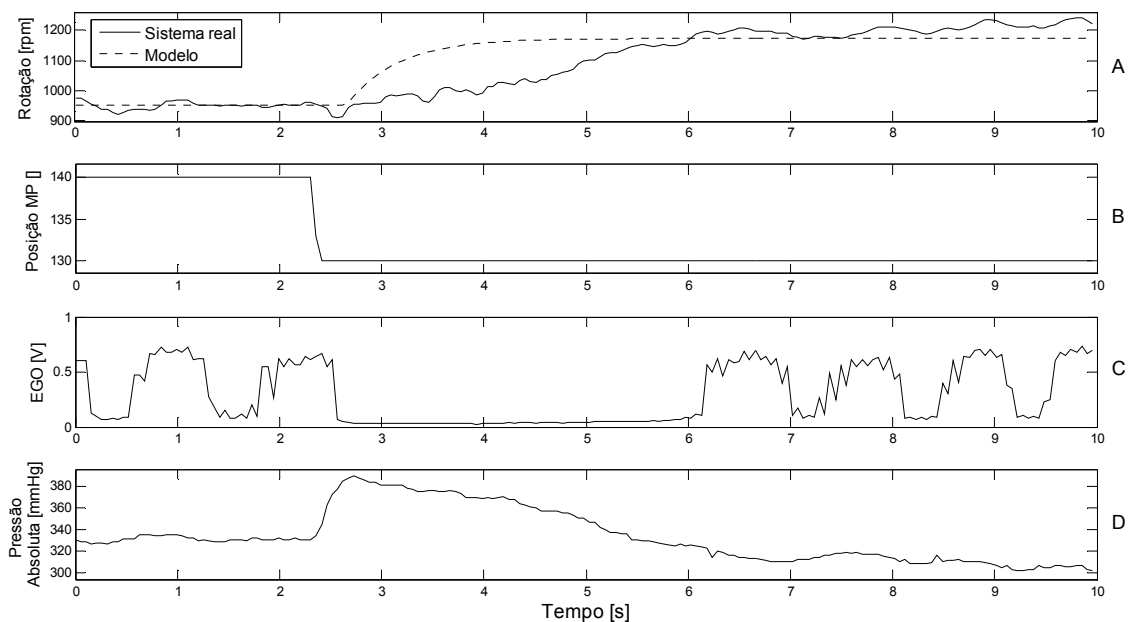


Figura 3-18 - Validação do modelo obtido para a dinâmica da rotação em função da variação negativa da posição do motor de passo.

Nesta situação a mistura pobre tem influência direta na dinâmica do sistema, por que o motor tem dificuldade de acelerar devido ao baixo torque obtido. A Figura 3-18 mostra que a abertura da válvula de marcha lenta (gráfico B) gera um pico de pressão (gráfico D) que faz com que a mistura fique pobre (gráfico C), mesmo com o aumento no tempo de injeção causado pela compensação da posição do motor de passo. Neste caso a rotação aumenta lentamente (gráfico A), com dinâmica bastante diferente daquela obtida para os degraus positivos. Neste caso o modelo obtido não é capaz de descrever o comportamento do sistema.

Neste contexto, a estratégia de enriquecimento para aceleração, apresentada na seção 3.3.6.3, ganha importância. Aplicando-se um ganho no tempo de injeção, no momento em que ocorre uma abertura rápida da válvula de marcha lenta, pode-se evitar o empobrecimento da mistura. No caso da aceleração rápida do motor, o ideal é enriquecer a mistura de forma a se obter maior torque, como foi visto na seção 2.3.1.8. A estratégia de enriquecimento da injeção realiza exatamente esta função, garantindo que a mistura fique rica de forma a proporcionar melhor desempenho para a aceleração. Deste modo, os testes com degrau negativo foram repetidos com a estratégia de enriquecimento habilitada. A Figura 3-19 mostra um dos resultados obtidos.

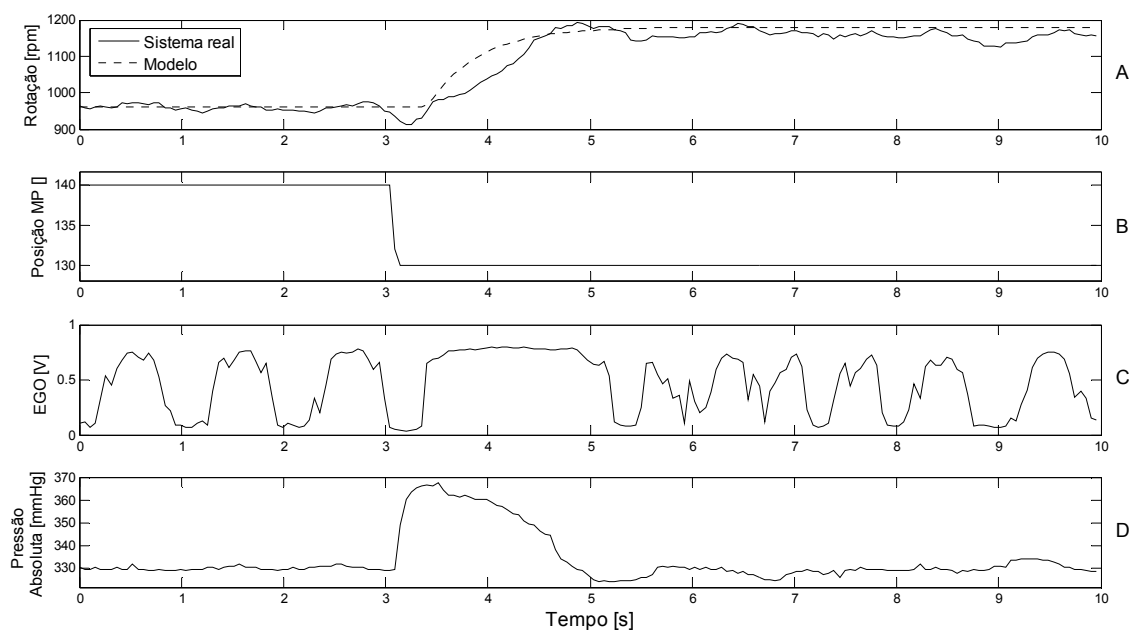


Figura 3-19 - Validação do modelo obtido para a dinâmica da rotação em função da variação negativa da posição do motor de passo, com estratégia de enriquecimento habilitada.

Observa-se que a abertura da válvula de marcha lenta (gráfico B) causa um pico de pressão no coletor (gráfico D). A mistura fica inicialmente pobre, como mostra o sinal do EGO, mas logo em seguida fica rica devido à estratégia de enriquecimento. Com a mistura rica a aceleração do motor fica favorecida, e a rotação aumenta mais rapidamente do que no teste anterior, que mantém a estratégia desabilitada. A mistura permanece rica por aproximadamente 2 segundos, garantindo o bom desempenho da aceleração do motor. Com o aumento mais rápido da rotação, observa-se que

a pressão diminui também mais rapidamente, como era esperado. Pode-se concluir que a utilização da estratégia de enriquecimento faz com que a dinâmica de aceleração se aproxime da dinâmica de desaceleração do motor. O erro percentual absoluto máximo obtido durante os testes de validação foi de 7,6%, o que corresponde a um aumento de 60% em relação ao erro máximo obtido durante os testes de desaceleração. No entanto, o erro máximo abaixo de 8% foi considerado aceitável, e deste modo o modelo de 1ª ordem com tempo morto obtido pode ser usado para projetar o controlador PI, já que descreve aproximadamente a dinâmica do motor na condição de marcha lenta.

3.3.7.4 Projeto do Controlador.

De posse do modelo linear do sistema, os ganhos do controlador PI podem ser facilmente obtidos através do método da síntese direta [47]. Assim como no caso do controle de lambda, este sistema apresenta uma razão entre tempo morto e constante de tempo elevada e, deste modo, a escolha da constante de tempo em malha fechada deve ser conservativa. Deste modo, a constante de tempo em malha fechada escolhida foi de 0,2 segundos. Os cálculos dos ganhos K_c e T_i estão apresentados nas equações 3-21 e 3-22.

$$K_c = \frac{1}{K} \cdot \frac{\tau}{\theta + \tau_c} = \frac{0,5}{-22 \cdot (0,3 + 0,2)} = -0,045 \quad \text{3-21}$$

$$\tau_i = \tau \Rightarrow \tau_i = 0,5 \quad \text{3-22}$$

O modelo obtido possibilita também uma escolha adequada do período de amostragem. A regra geral consiste em escolher o período de amostragem no mínimo 10 vezes menor do que a constante de tempo mais rápida do sistema [51]. No caso da dinâmica da rotação em função da posição do motor de passo, a constante de tempo é de 0,5 segundos. Neste caso, a amostragem deve ser feita com período de, no máximo, 50 ms. Este valor é bastante conveniente, pois o sistema já utiliza um evento temporizado em 20 Hz para fazer aquisição dos dados. Neste caso tanto a amostragem dos dados quanto a execução do código do controlador são feitas com período de 50 ms.

3.3.7.5 Simulação.

O sistema completo foi simulado de forma a se testar a estrutura do controlador, os ganhos obtidos e outras estratégias adicionais, que serão apresentadas a seguir. Procurou-se adicionar o máximo de características do sistema real ao modelo. A simulação foi realizada no ambiente Simulink do Matlab [57]. A Figura 3-20 mostra o diagrama geral do sistema de controle de marcha lenta simulado.

O bloco do modelo compreende a dinâmica do atuador, a dinâmica do motor e algumas perturbações. No caso do atuador, a sua dinâmica corresponde ao tempo de permanência do motor em cada passo, que foi assumido anteriormente como sendo 5 ms. Deste modo, o atuador de marcha lenta sempre se desloca como uma rampa, com cada passo durando 5 ms. A dinâmica do

motor corresponde ao modelo de 1ª ordem com tempo morto dado pela equação 3-20. Para aproximar a simulação de uma situação real foram adicionadas algumas perturbações à saída do modelo. Como foi visto na seção 3.3.6, o controle de injeção através do sensor EGO apresenta oscilações intrínsecas no lambda que, por sua vez, têm influência na rotação. Deste modo, a rotação nunca permanece fixa em um valor e está sempre variando devido, principalmente, às oscilações no lambda. Para representar este efeito foi somada na rotação uma perturbação senoidal, com amplitude de 20 rpm e frequência de 0,9 Hz. Este valor de frequência foi escolhido de acordo com o desempenho obtido para o controlador de lambda simulado na seção 3.3.6. Por fim foi somado um ruído gaussiano com média zero e desvio padrão de 5 rpm, para representar a medição da rotação.

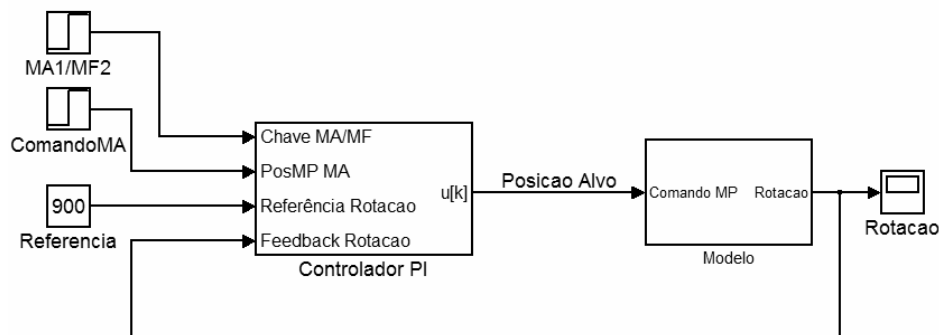


Figura 3-20 – Diagrama geral do sistema de controle de marcha lenta simulado.

O bloco do controlador corresponde basicamente à estrutura apresentada na Figura 3-16 com algumas estratégias adicionais. A Figura 3-21 mostra a estrutura do controlador PI implementado.

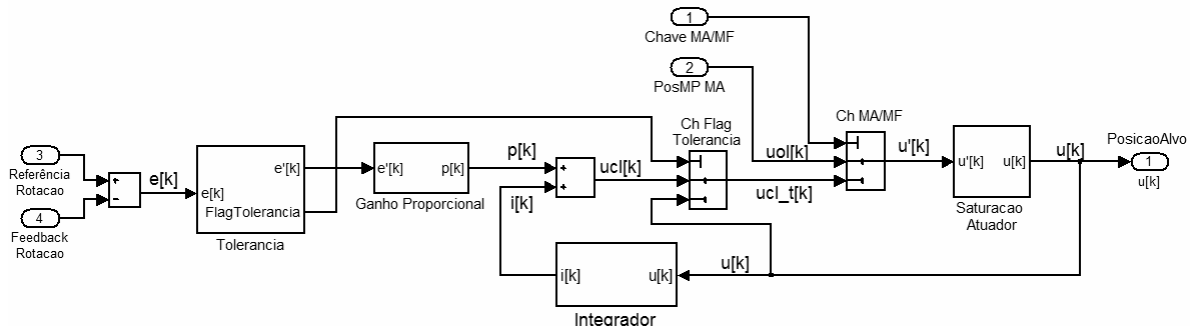


Figura 3-21 – Estrutura do controlador PI de marcha lenta implementado.

Este bloco recebe como entrada quatro sinais: referência e realimentação de rotação, comando seletor entre malha aberta ou fechada e posição do motor de passo em malha aberta. A diferença entre a referência e a medição de rotação corresponde ao erro, $e[k]$, que é a entrada do bloco chamado ‘Tolerância’. Como foi visto anteriormente, a influência do lambda faz com que a rotação nunca atinja um valor fixo, ou seja, fica sempre variando em torno de uma rotação média. Além disso, o modelo do sistema mostra que cada passo do atuador causa uma variação de 20 rpm na rotação, o que indica a impossibilidade de se realizar o controle com precisão maior do que esta. Deste modo foi implementada uma estratégia de tolerância na qual o atuador se move apenas

quando o erro supera um determinado limite. O bloco ‘Tolerância’ tem a função de zerar o erro caso seu valor seja menor do que o limite de tolerância. A equação 3-23 descreve a atuação deste bloco, que gera como saída o erro alterado $e'[k]$ e o ‘FlagTolerância’, que indica se o erro está dentro da região de tolerância (valor 1) ou se está fora dela (valor 0). A função deste *flag* será explicada posteriormente. O valor do limite de tolerância de rotação é configurável através da IHM. A Figura 3-22 mostra a curva característica deste bloco.

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Se: } |e[k]| < \text{LimToleranciaRot} \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} e'[k] = 0 \\ \text{FlagTolerancia} = 1 \end{array} \right. \\ \text{Senão} \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} e'[k] = e[k] \\ \text{FlagTolerancia} = 0 \end{array} \right. \end{array} \right. \quad \text{3-23}$$

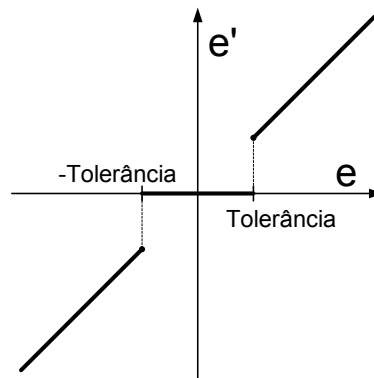


Figura 3-22 – Curva característica do bloco ‘Tolerância’.

O erro modificado $e'[k]$ é entrada do bloco de ganho proporcional, no qual é multiplicado pelo ganho K_c , gerando como saída a ação proporcional $p[k]$. No entanto, testes com o sistema real mostraram que o ajuste do ganho K_c para pequenas e grandes perturbações é diferente. A ocorrência de grandes variações na rotação devido, por exemplo, à carga do eletro-ventilador, exige uma atuação mais rápida do controlador para que a perturbação seja rejeitada rapidamente. Neste caso o ganho K_c deve ser maior. Porém, quando a rotação está próxima da referência, sofrendo apenas pequenas perturbações, causadas muitas vezes pelo próprio λ , o ganho K_c deve ser reduzido de forma a se garantir uma maior estabilidade para o sistema. Nesta situação o motor de passo deve sofrer apenas pequenas correções para manter a rotação dentro da região de tolerância, sem gerar grandes perturbações na malha de λ . Assim, foi implementada uma estratégia de ajuste do ganho K_c , na qual seu valor é reduzido à metade quando o erro é menor do que o dobro do limite de tolerância. Corresponde a uma estratégia de escalonamento de ganho, utilizada para compensar características não-lineares do sistema real. À medida que o sistema se afasta do ponto de operação considerado o modelo linear utilizado deixa de ser adequado e, deste modo, o ganho do controlador tem que ser ajustado. A equação 3-24 mostra a implementação do bloco de ganho proporcional.

$$\begin{cases} \text{Se } |e[k]| < (\text{LimToleranciaRot} \times 2) \rightarrow p[k] = e'[k] \times \frac{K_c}{2} \\ \text{Senão} \rightarrow p[k] = e'[k] \times K_c \end{cases} \quad 3-24$$

A ação integral $i[k]$ é calculada a partir da ação de controle $u[k]$, utilizando a equação 3-14 que, como já foi visto, corresponde à implementação de um filtro passa - baixas de 1ª ordem com ganho unitário e constante de tempo igual a T_i . Deste modo, a ação integral $i[k]$ é a versão filtrada da ação de controle $u[k]$. Somando-se a ação proporcional $p[k]$ com a ação integral $i[k]$, obtém-se a ação de controle de malha fechada $ucl[k]$. Algumas observações devem ser feitas neste ponto. A ação proporcional $p[k]$ é diferente de zero apenas quando o erro $e'[k]$ não é nulo. No entanto, a estratégia de tolerância faz com que o erro $e'[k]$ se torne zero se $e[k]$ for menor do que o limite de tolerância, como mostra a equação 3-23. Quando a rotação ultrapassa o limite da região de tolerância, fazendo com que $e'[k]$ seja igual a $e[k]$, uma ação proporcional não nula é gerada, o que acarreta no deslocamento do motor de passo visando corrigir a rotação. Porém, se a rotação entrar novamente na região de tolerância o erro alterado $e'[k]$ se torna nulo, fazendo com que a ação proporcional aplicada seja cancelada. Neste caso, o motor de passo volta à posição anterior, fazendo com que a rotação tenda a sair novamente da região de tolerância. Este ciclo se repete, de modo que o atuador de marcha lenta permanece se movendo periodicamente enquanto a rotação oscila em torno do limite da região de tolerância, o que não é desejável. Para evitar esta situação, utiliza-se o 'FlagTolerancia'. Este *flag* indica que a rotação entrou na região de tolerância e, neste caso, a chave 'FlagTolerancia' faz com que a ação de controle corrente $u[k]$ seja mantida. Deste modo, o motor de passo fica fixo na posição que levou a rotação até a região de tolerância, mesmo com o cancelamento da ação proporcional. O integrador continua sendo calculado normalmente e tende a se aproximar da ação de controle aplicada, assim como na condição de malha aberta. Desta maneira, quando o erro ultrapassar a tolerância novamente, o integrador estará próximo da posição corrente do atuador de marcha lenta, de forma que nenhuma descontinuidade é percebida.

A chave MA/MF determina se o sistema está em malha aberta ou malha fechada. Se estiver em malha aberta a ação de controle externa $uol[k]$ é utilizada. Caso contrário, utiliza-se a ação de controle de malha fechada com tolerância $ucl_t[k]$. Obtém-se então a ação de controle $u'[k]$, que passa pelo bloco de saturação, de forma que seu valor seja adequado às limitações físicas do atuador. A saturação envolve a posição desejada para a válvula, que deve estar entre 0 e 220, e a taxa de variação da posição, que não pode ser maior do que 10 passos por ciclo de amostragem, devido ao intervalo de 5 ms para cada passo. Finalmente obtém-se a ação de controle final $u[k]$, que é chamada de 'posição alvo' por que o atuador se move de acordo com uma rampa e não instantaneamente.

Este modelo, apresentado na Figura 3-21, representa de forma simplificada o controlador implementado. No entanto, como o sistema foi desenvolvido com base em um processador de ponto fixo, foi necessário adaptar o modelo para que a estrutura do controlador real fosse validada. Deste modo, as operações foram convertidas para ponto fixo e adaptadas para corresponderem

exatamente à implementação real no DSP. Esta estratégia permite verificar a possibilidade de ocorrência de *overflow*/saturação e analisar os efeitos da quantização, por exemplo.

A partir deste modelo final do controlador foi realizada a simulação de todo o sistema apresentado na Figura 3-20. Para aproximar as condições reais de operação, foi inserida no modelo uma perturbação negativa de 250 rpm na rotação correspondendo ao acionamento do eletroventilador e outra perturbação positiva de mesmo valor correspondendo ao desligamento. A referência de marcha lenta foi mantida em 900 rpm, a tolerância foi configurada para 30 rpm e os ganhos do controlador PI foram aqueles obtidos nas equações 3-21 e 3-22. O resultado obtido está apresentado na Figura 3-23.

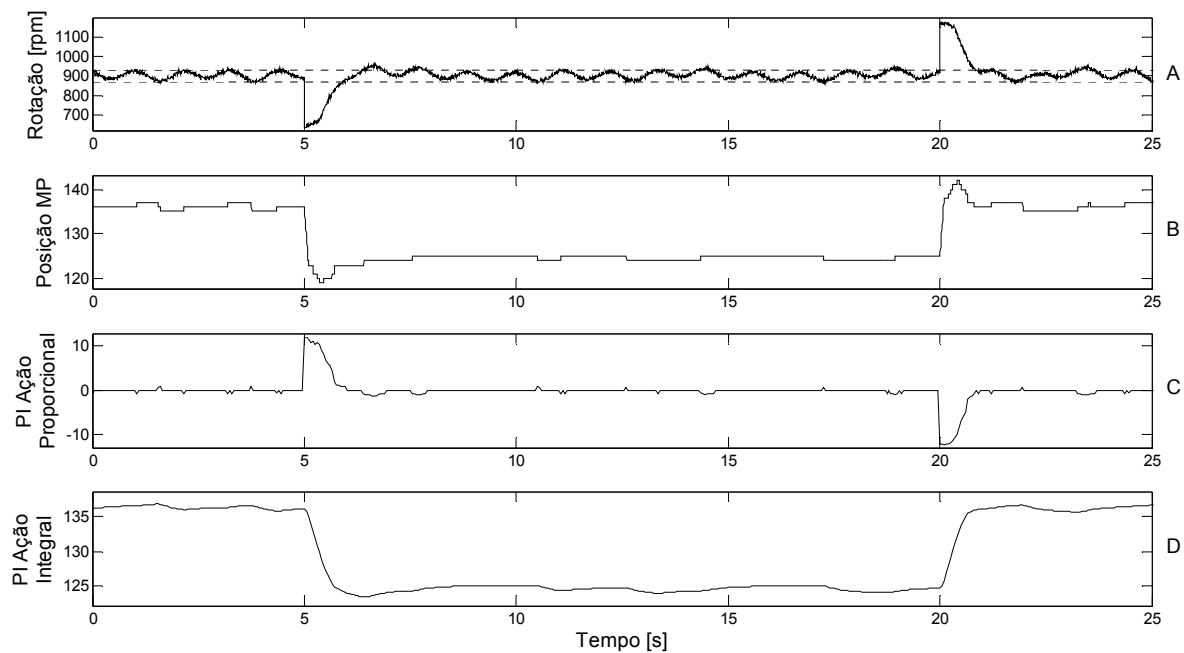


Figura 3-23 – Resultado obtido com a simulação do modelo completo do sistema de controle de marcha lenta.

O gráfico A da Figura 3-23 mostra o comportamento da rotação ao longo do tempo e os limites da região de tolerância. O gráfico B mostra a variação da posição do motor de passo. Os gráficos C e D mostram, respectivamente, a ação proporcional e a ação integral aplicadas pelo controlador PI. Observa-se que, em regime permanente, o atuador se move pouco, apenas mantendo a rotação dentro da região de tolerância. Quando a carga negativa é aplicada, no instante igual a 5 segundos, a ação proporcional faz com que o motor de passo abra rapidamente, proporcionando a rejeição da perturbação em aproximadamente 1 segundo. A perturbação positiva na rotação é rejeitada da mesma maneira, com o fechamento rápido do motor de passo causado pela ação proporcional. A ação integral acompanha o movimento do atuador de forma filtrada, e mantém a sua posição após a ocorrência do transitório. Pode-se concluir que o modelo simulado se comporta como esperado.

3.3.7.6 Acoplamento entre as malhas de marcha lenta e lambda

Nas seções anteriores foi abordada a questão da influência que os controladores de marcha lenta e lambda exercem entre si. Esta interação ocorre por que o MCI é um sistema multivariável (MIMO - *Multiple Input - Multiple Output*), no qual a dinâmica de rotação e de lambda pode ser representada, de forma simplificada, pela Figura 3-24 [27]. A posição do atuador de marcha lenta e o tempo de injeção aplicado afetam tanto a rotação quanto o lambda [46]. Deste modo, as ações de controle tomadas pelos controladores afetam as duas malhas simultaneamente.

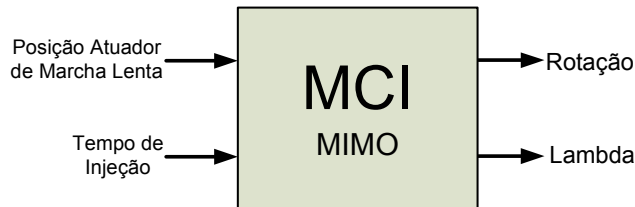


Figura 3-24 – Representação multivariável simplificada da dinâmica de rotação e lambda de um MCI.

A forte interação entre a rotação e a posição do atuador de marcha lenta, e entre o lambda e o tempo de injeção, possibilitou a adoção de uma abordagem descentralizada (multimalhas) para o desenvolvimento dos controladores no presente trabalho. Deste modo, os controladores foram projetados de forma independente, sendo utilizadas estratégias de desacoplamento para reduzir a interação entre as malhas [59], [60].

A redução da influência do controlador de marcha lenta no lambda foi realizada através da estratégia de compensação da posição do atuador de marcha lenta (seção 3.3.6.2), que consiste em um desacoplador estático. A estratégia de enriquecimento para aceleração (seção 3.3.6.3) evita o empobrecimento da mistura durante as acelerações, mas ao mesmo tempo a enriquece, de modo a melhorar o desempenho dinâmico do motor nesta condição. Neste caso, pode-se considerar que a estratégia de enriquecimento atua como um desacoplador dinâmico durante as acelerações. Já no caso da redução da influência do controlador de lambda sobre a rotação, não foi utilizada nenhuma estratégia. A simples adoção de um valor de tolerância em torno da referência de marcha lenta garante o comportamento satisfatório da rotação diante da influência das oscilações do lambda. Com base nestas considerações, pode-se concluir que o sistema de controle desenvolvido pode ser representado pela estrutura apresentada na Figura 3-25.

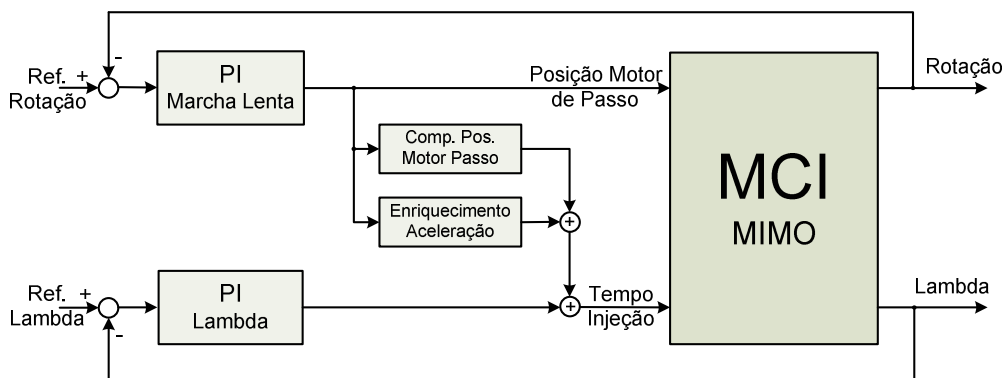


Figura 3-25 – Estrutura multimalhas correspondente aos controladores de marcha lenta e lambda.

Como os controladores foram projetados de forma independente e o desacoplamento entre as malhas não é perfeito, espera-se que seja necessário reduzir os ganhos dos controladores quando estes atuarem juntos no sistema real. Esta estratégia de ajuste dos ganhos (dessintonia) visa reduzir a interação dinâmica restante entre as malhas, sendo muito empregada em sistemas MIMO que são analisados simplificados como múltiplos sub-sistemas SISO (*Single Input – Single Output*) [59].

3.3.8 Módulo de Controle do Avanço de Ignição

Este módulo tem como função fornecer o valor do ângulo de avanço de ignição que proporcione o máximo torque possível, dentro dos limites de emissões e com nível relativamente pequeno de detonação (LDI). O módulo desenvolvido neste trabalho é bastante simples e consiste em uma ação direta de controle baseada no mapa de avanço, em paralelo com uma realimentação da informação de ocorrência de detonação. A Figura 3-26 apresenta a estrutura do módulo implementado.

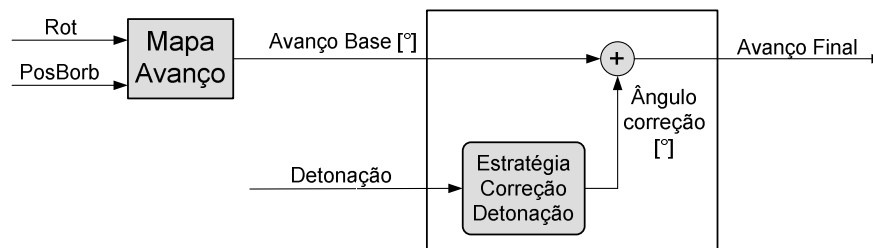


Figura 3-26 – Estrutura do módulo de controle do avanço de ignição.

Observa-se que a estratégia adotada depende muito da calibração do mapa de avanço. Isso ocorre por que a variável a ser otimizada, no caso o torque, não é realimentada no sistema. Deste modo é necessário que seja realizada uma calibração prévia do mapa de avanço, de forma que os valores de avanço base fornecidos pelo mapa estejam bem próximos da condição de máximo torque (MBT). Para corrigir o avanço base obtido do mapa é utilizada uma realimentação da informação de ocorrência de detonação, que é disponibilizada pelo sistema de identificação de detonação através da rede CAN.

A estratégia de correção do avanço está apresentada na Figura 3-27 e consiste em subtrair do ângulo de correção um determinado valor dado pelo parâmetro ‘DetDecrementoAvanco’ sempre que a detonação é detectada. Caso não seja detectada a detonação, o ângulo de correção é incrementado do valor dado pelo parâmetro ‘DetIncrementoAvanco’. Os parâmetros de incremento e decremento da estratégia são configuráveis através da IHM. O ângulo de correção é sempre negativo, ou seja, o valor do ângulo de avanço final nunca é maior do que o avanço base obtido do mapa. Deste modo, se o ângulo de correção se tornar positivo seu valor é alterado para zero. Isso se deve ao fato de que o mapa é a única fonte de informação otimizada do torque, sendo a correção de detonação apenas uma proteção do sistema, que evita a ocorrência do fenômeno acima dos níveis toleráveis.

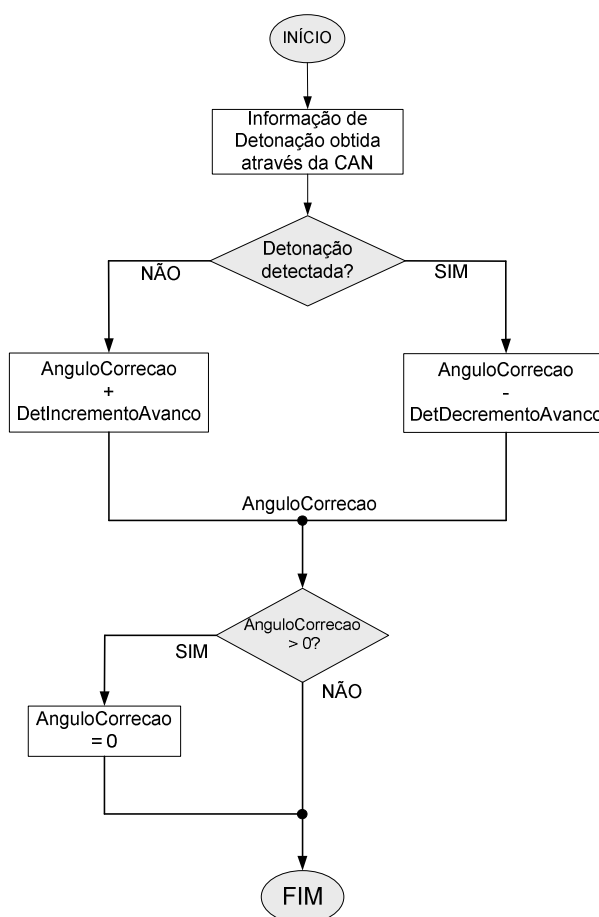


Figura 3-27 – Estratégia de correção do avanço com base na detecção de detonação.

A vantagem da detecção de detonação está na possibilidade de uma calibração mais otimizada do mapa de avanço, já que neste caso não é necessário adotar margens de segurança para evitar a ocorrência do fenômeno. Deste modo, os pontos mais próximos do MBT podem ser utilizados no mapa.

3.3.9 Arquitetura do software

A arquitetura do software da ECU é baseada em eventos gerados pelos módulos periféricos do DSP. Estes eventos são utilizados basicamente para execução das estratégias de controle, protocolos de comunicação e aquisição dos dados, sendo os mais importantes apresentados a seguir:

- **Captura de transição no sinal de rotação:** este evento é gerado sempre que uma transição de subida é detectada no sinal do sensor indutivo de rotação. A função chamada tem a responsabilidade de determinar a posição angular do eixo, calcular a rotação e, caso seja detectada a falha da roda dentada, executar a rotina principal de controle do sistema.
- **Evento de um temporizador com período de 50 ms:** este evento é utilizado para a aquisição dos dados do módulo DataLog e também para a execução da estratégia de controle de marcha lenta. É usado também para amostragem das variáveis do

módulo ADC quando o motor está parado e o evento de transição do sinal de rotação não é detectado.

- **Eventos dos módulos de comunicação:** o envio e o 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. Neste caso as funções de tratamento de erros são chamadas.

A rotina de tratamento do evento de captura de transição do sinal de rotação é ilustrada através de um fluxograma apresentado na Figura 3-28. Esta rotina executa quase toda a estratégia de controle do sistema, exceto o controlador de marcha lenta que é executado no evento do temporizador, com período fixo de 50 ms. As demais estratégias são executadas apenas quando a falha da roda dentada é detectada, o que ocorre uma vez a cada ciclo do motor. Esta característica se deve ao fato de que a atuação sobre as válvulas injetoras e bobinas de ignição somente pode ser realizada uma vez por ciclo. Após a detecção da falha, a rotina inicialmente atualiza 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. Em seguida, valores iniciais para o avanço de ignição e para 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 a partir dos mapas permanecem inalterados. Em seguida aplica-se sobre os tempos de comando de ignição e injeção a compensação da tensão medida na bateria. Por fim, 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, verifica-se as condições de envio do comando de sincronismo para o sistema de identificação de detonação. Os detalhes destas condições serão abordados na seção 3.4.

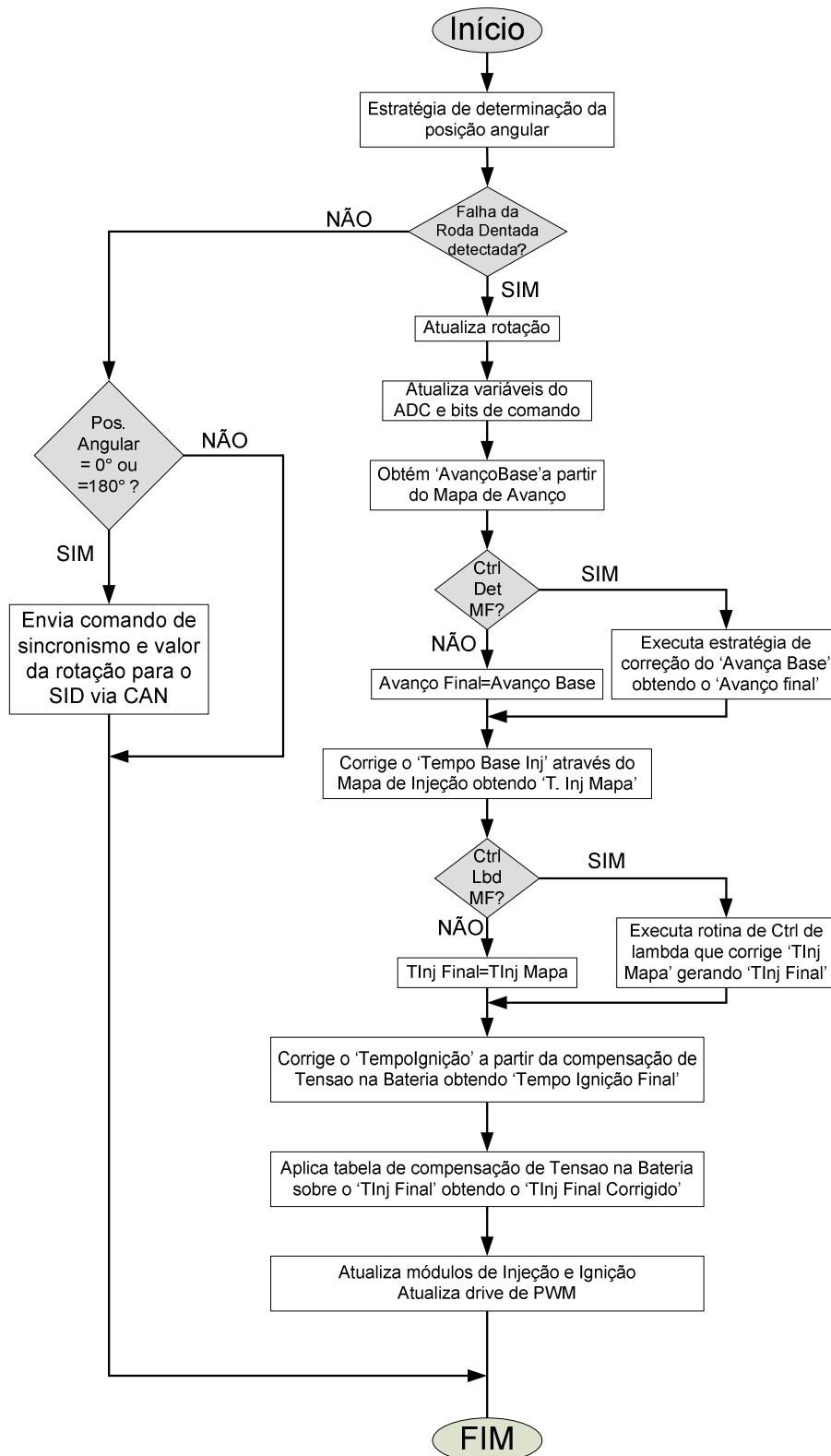


Figura 3-28 – Fluxograma simplificado do evento de captura de transição de subida no sinal do sensor indutivo de rotação.

Todos os parâmetros do software da ECU, incluindo os pontos dos mapas e das tabelas, ficam armazenados na memória FLASH interna do DSP, que é 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.

3.4 Software - Sistema de identificação de detonação

O software do SID tem o objetivo de identificar a ocorrência da detonação a partir dos dados amostrados do sinal de vibração estrutural do motor. A estratégia utilizada é a análise espectral do sinal obtido através de um algoritmo dedicado de FFT. A identificação é feita com base em determinados modos de vibração específicos. Para garantir a detecção correta do fenômeno em toda a faixa de operação do motor, utiliza-se uma estratégia de adaptação do algoritmo. A Figura 3-29 mostra o diagrama de blocos do software do SID.

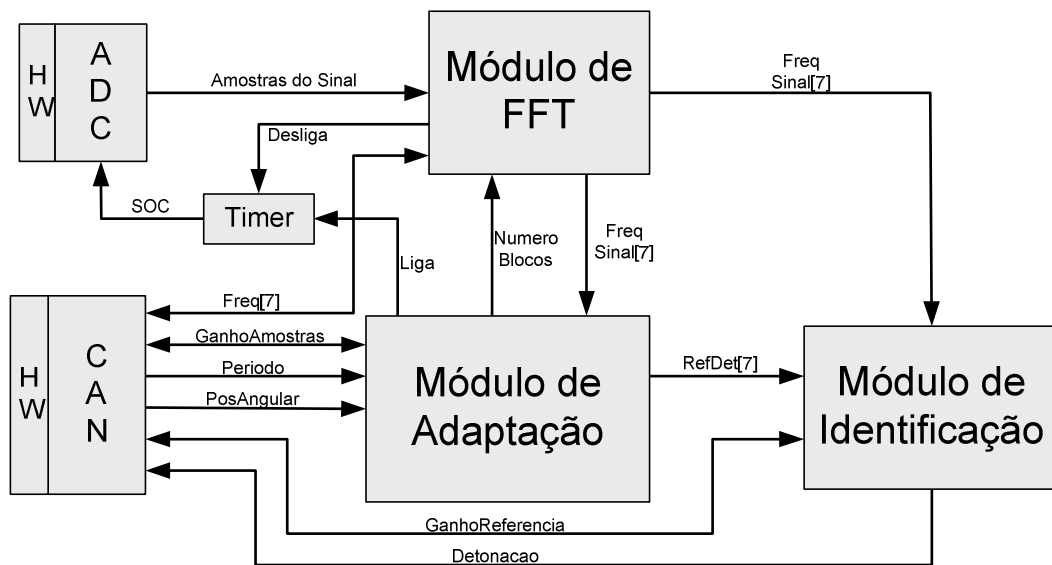


Figura 3-29 – Diagrama de blocos do software do SID.

A amostragem dos dados para a identificação da detonação deve ser realizada apenas na janela de tempo na qual o fenômeno pode ocorrer, o que corresponde às faixas de aproximadamente 10° até 70° e 190° até 250° do eixo de manivelas. O módulo de adaptação determina a posição e a largura desta janela, sendo responsável por iniciar a amostragem dos dados através de um temporizador (*timer*) e calcular o número de blocos que devem ser amostrados. Esta definição da janela é feita com base na posição angular corrente do eixo e no período de cada dente da roda dentada. O tamanho da janela de amostragem pode ser ajustado através do parâmetro “GanhoJanela”. O módulo de FFT calcula a potência espectral do sinal amostrado para 7 frequências determinadas pelo usuário. O módulo de identificação compara os valores obtidos para a potência espectral de cada frequência com valores de referência de detonação gerados pelo módulo de adaptação. Os valores de referência são adaptativos por que consistem em uma média dos últimos ciclos onde não ocorreu detonação, sendo esta estratégia usada para compensar a queda na relação sinal-ruído com o aumento da rotação. Deste modo, a detecção da detonação é feita

quando ocorre um aumento abrupto na potência espectral do sinal nas frequências características. O limiar de detecção da detonação pode ser ajustado através do parâmetro “GanhoReferência”.

O objetivo desta seção é mostrar como a interface CAN foi integrada ao SID para permitir o sincronismo e a troca de dados e parâmetros do sistema. A descrição detalhada dos módulos de FFT, Adaptação e Identificação encontra-se na referência [17]. Para a descrição do módulo CAN implementado no presente trabalho, consulte a seção 3.3.4.2.

O SID original desenvolvido em [17] obtém os valores de posição angular do eixo e período de rotação através da medição direta do sinal de rotação, assim como faz a ECU. No entanto, a utilização da interface CAN permite que estas informações sejam obtidas diretamente da ECU, como mostra a Figura 3-29. Além disso, no SID original os parâmetros do sistema como “GanhoJanela”, “GanhoReferência” e as frequências características, são alterados através de uma IHM executada em um PC. A interface CAN possibilita que estes parâmetros sejam alterados através da IHM da própria ECU, utilizando os objetos SDO do protocolo da camada de aplicação. Como foi visto na seção 3.3.4.2, os SDOs acessam os parâmetros através de entradas no OD do dispositivo. Deste modo foi necessário definir entradas específicas no OD para os parâmetros do SID, como mostra a Tabela 3-9.

Tabela 3-9 – Entradas no OD definidas para o SID.

Índice	Sub-índice	Descrição do Parâmetro
0x6001	0	GanhoAmostras
0x6002	0	GanhoReferencia
0x6003	0	= 7 (número de sub-índices)
	1	Frequência Característica 1
	2	Frequência Característica 2
	3	Frequência Característica 3
	4	Frequência Característica 4
	5	Frequência Característica 5
	6	Frequência Característica 6
	7	Frequência Característica 7

Para o envio dos dados do processo são usados PDOs. A ECU envia os valores de posição angular e período de rotação para o SID, enquanto este envia de volta a identificação da detonação. O sincronismo para a amostragem dos dados é realizado através do próprio PDO que a ECU envia para o SID, devido ao número limitado de *mailboxes*. Deste modo, a ECU envia o seu PDO sempre nos dentes 20 e 50 da roda dentada, que correspondem aos ângulos 0° e 180°, respectivamente. Nestes ângulos um dos cilindros está no PMS iniciando o ciclo de expansão, no qual pode ocorrer o fenômeno da detonação. Portanto, sempre que o SID recebe o PDO da ECU, contendo posição angular e período, é realizado o cálculo do número de blocos a serem amostrados e em seguida o processo de amostragem é iniciado. Ao final deste ciclo de identificação o SID envia para a ECU o resultado obtido.

3.5 Interface Homem-Máquina

Como parte do trabalho foi desenvolvido um software de interface entre o usuário e a ECU. Seu objetivo principal é possibilitar o ajuste das estratégias de controle e a visualização do comportamento do sistema através da aquisição de dados medidos. As seções seguintes apresentam as características do software desenvolvido e as suas funcionalidades.

3.5.1 Características do software

Na etapa de planejamento do software IHM foram assumidas algumas prioridades com relação às suas características, que estão citadas a seguir:

- Estrutura modular, que permitisse fácil expansão à medida que novas estratégias fossem desenvolvidas;
- Alta robustez na comunicação com a ECU, garantindo a integridade dos dados e a visualização das variáveis em tempo real;
- Interface gráfica amigável, porém simples, que permitisse fácil expansão à medida que novas variáveis, parâmetros e mapas fossem agregados ao sistema;

Para atingir estes objetivos, a linguagem C++ foi adotada, por que proporciona todas as vantagens de uma linguagem orientada a objetos aliadas a um alto desempenho, sendo atualmente muito utilizada no desenvolvimento de software profissional, principalmente nas áreas de engenharia, matemática, física e química. Com relação ao ambiente de desenvolvimento, a utilização de ferramentas RAD (*Rapid Application Development*), como o C++Builder da Borland, proporciona uma série de facilidades que aceleram o processo de desenvolvimento, mas que acarretam em um menor desempenho da aplicação. Para o desenvolvimento de uma aplicação acadêmica, com foco no desempenho, a utilização de uma ferramenta como o Visual Studio da Microsoft é mais adequada. 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 [49], 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). Esta arquitetura proporciona 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 multi-tarefa, 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 às prioridades estabelecidas.

3.5.2 Funcionalidades

O software de interface foi desenvolvido para possibilitar uma completa interação entre o usuário e a ECU. Suas funcionalidades fazem da ECU uma ferramenta de controle bastante flexível. As principais funcionalidades estão citadas a seguir:

- Visualização de todas as variáveis medidas e das ações de controle tomadas;
- Visualização e alteração dos mapas e tabelas utilizados;
- Visualização e alteração de praticamente todos os parâmetros do sistema;
- Ajuste de calibração dos sensores;
- Configuração da rede CAN e envio de pacotes SDO;
- Armazenamento dos dados obtidos da ECU em arquivo;
- Configuração do módulo DataLog e carregamento dos dados aquisitados;
- Verificação do estado do sistema com *flags* indicadores de erro;
- Configuração das malhas de controle com comandos para abrir ou fechar a malha;
- Armazenamento de todos os parâmetros e calibrações usadas em arquivo;

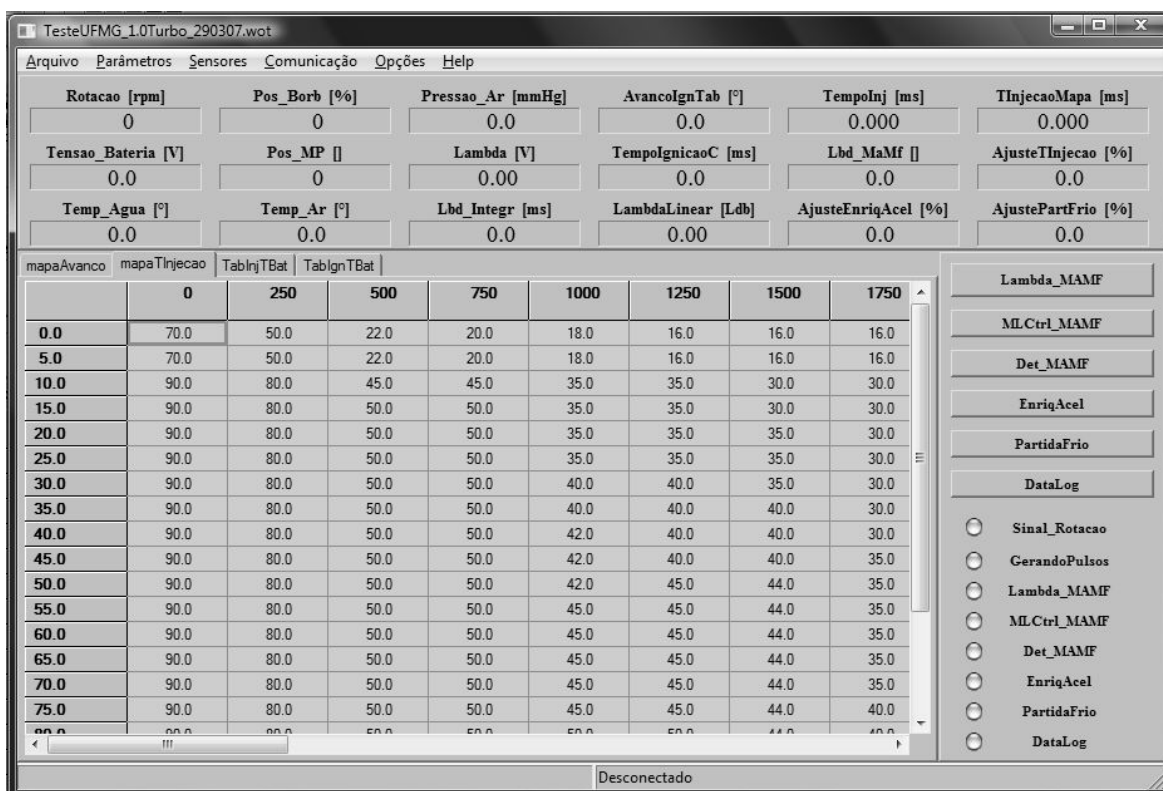


Figura 3-30 – Tela principal da IHM com arquivo de calibração aberto.

A Figura 3-30 apresenta a tela principal da IHM com um arquivo de calibração já aberto. Observa-se que na parte superior são mostrados os valores das variáveis medidas e das ações de controle adotadas. Logo abaixo ficam os mapas e tabelas de calibração. No caso são mostrados os mapas de avanço e tempo de injeção, além das tabelas de compensação da tensão na bateria. No

canto direito da tela são mostrados os comandos do sistema e o seu estado atual. Os comandos permitem abrir e fechar as malhas de controle de lambda, marcha lenta e correção de detonação. Possibilita também iniciar e interromper o processo de aquisição de dados da ECU através do módulo DataLog visto na seção 3.3.5. São disponibilizados ainda 2 comandos adicionais para habilitar e desabilitar estratégias de partida a frio e enriquecimento para aceleração rápida, que devem ser desenvolvidas em trabalhos futuros. Deve ser ressaltado que a estratégia de enriquecimento para aceleração citada aqui corresponde à aceleração gerada pela válvula borboleta, e não à estratégia de enriquecimento citada na seção 3.3.6.3. Os ‘leds’ mostrados no canto inferior direito da tela indicam o estado das malhas de controle, das estratégias e do processo de aquisição de dados. Dois ‘leds’ adicionais indicam se o sinal de rotação está sendo medido corretamente e se os pulsos de comando de injeção e ignição estão sendo gerados.

Na parte superior da tela uma barra de menus permite o acesso às funções adicionais do programa. O menu ‘Arquivo’ permite o gerenciamento dos arquivos de calibração, com as funções abrir, fechar e salvar, entre outras. O menu ‘Parâmetros’ possibilita o acesso às janelas de configuração dos parâmetros do sistema, que serão mostradas a seguir. O menu ‘Sensores’ permite o acesso aos parâmetros e curvas de calibração dos sensores utilizados. O menu ‘Comunicação’ permite iniciar e finalizar a comunicação com a ECU, e escolher se os dados do arquivo de calibração serão enviados para a ECU, ou se serão carregados para a IHM os dados presentes na memória da ECU. Possibilita ainda o acesso à janela de configuração da rede CAN. Através do menu ‘Opções’ pode-se comandar o processo de gravação dos parâmetros na memória Flash, e ainda iniciar o processo de armazenamento em arquivo dos dados enviados pela ECU. Este menu permite também o acesso à janela de *flags* de erro do sistema, e à janela de configuração do módulo DataLog.

A Figura 3-31 mostra a janela com os parâmetros básicos de ignição e injeção. Nesta janela permite-se configurar o valor do tempo base de injeção, parâmetro muito importante no controle de injeção como foi visto na seção 3.3.6. Permite-se ainda configurar os ângulos dos pulsos de injeção e a duração do pulso de ignição (tempo de permanência).

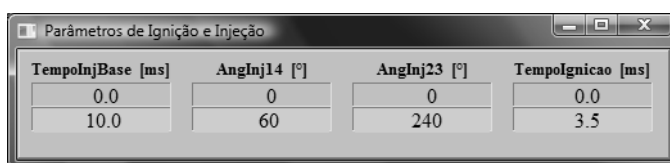


Figura 3-31 – Janela com os parâmetros de injeção e ignição.

A Figura 3-32 mostra a janela com os parâmetros do controlador de marcha lenta, que estão descritos na Tabela 3-10, com as indicações das respectivas seções nas quais podem ser obtidas informações completas sobre cada um.

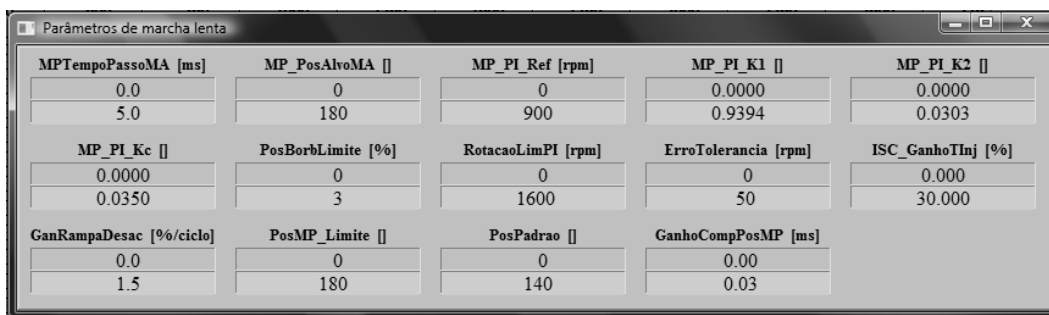


Figura 3-32 – Janela com os parâmetros do controlador de marcha lenta.

Tabela 3-10 – Parâmetros do controlador de marcha lenta.

Parâmetro	Descrição
MPTempoPassoMA	Tempo de duração do passo (em milissegundos) aplicado no atuador de marcha lenta. Ver seção 3.2.1.3
MP_PosAlvoMA	Posição alvo do atuador de marcha lenta quando o controlador está em malha aberta. Ver seção 3.3.7.1.
MP_PI_Ref	Referência de rotação do controlador PI de marcha lenta. Ver seção 3.3.7.1.
MP_PI_K1	Ganho K1 do controlador PI de marcha lenta. Ver equação 3-15.
MP_PI_K2	Ganho K2 do controlador PI de marcha lenta. Ver equação 3-16.
MP_PI_Kc	Ganho Kc do controlador PI de marcha lenta. Ver seção 3.3.7.1.
PosBorbLimite	Limite da posição da borboleta na qual é considerada fechada.
RotacaoLimPI	Valor máximo de rotação na qual o PI atua. Acima deste valor o controlador é desabilitado.
ErroTolerancia	Valor de tolerância no controle da rotação. Ver equação 3-23.
ISC_GanhoTIinj	Ganho percentual aplicado sobre o tempo de injeção durante a estratégia de enriquecimento para aceleração rápida. Ver seção 3.3.6.3.
GanRampaDesac	Taxa de redução do ganho, em porcentagem por ciclo, aplicada na estratégia de enriquecimento para aceleração rápida. Ver seção 3.3.6.3.
PosMP_Limite	Posição máxima permitida para o atuador de marcha lenta. Nesta posição o MCI já não funciona e, portanto, não adianta fechar ainda mais a válvula.
PosPadrao	Valor da posição padrão da estratégia de compensação da posição do atuador de marcha lenta. Ver seção 3.3.6.2.
GanhoCompPosMP	Valor do ganho da estratégia de compensação da posição do atuador de marcha lenta. Ver seção 3.3.6.2.

A Figura 3-33 mostra a janela com os parâmetros do controlador de lambda, na qual se permite configurar: ganhos Kp e Ki do controlador PI; limite máximo e mínimo para a correção gerada pelo controlador; tipo de sensor usado pelo controlador, EGO ou UEGO; valor de referência para o controlador; posição angular da falha da roda dentada em relação ao PMS do cilindro 1. Os parâmetros do controlador PI são apresentados na seção 3.3.6.4. O valor de referência para o controlador é dado em tensão, e deve ficar em torno de 500 mV para o controle através do EGO e em torno de 1V para o controle com UEGO. Deve ser lembrado que o sensor UEGO apresenta uma relação direta entre a tensão gerada e o valor do lambda, como foi visto na seção 3.2.1.1.

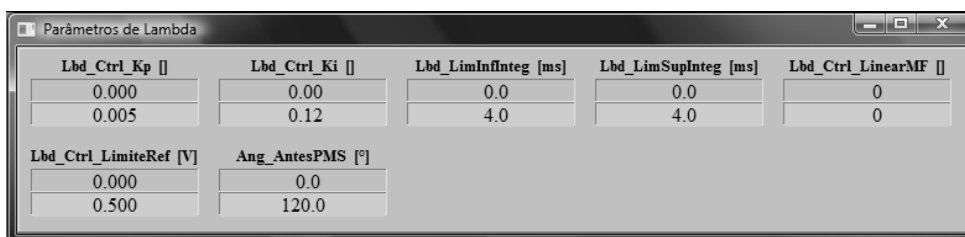


Figura 3-33 – Janela com os parâmetros do controlador de lambda.

A Figura 3-34 mostra a janela com os parâmetros da estratégia de correção do avanço de ignição. Nesta janela permite-se configurar os valores de incremento e decremento do ângulo de avanço de ignição utilizados pela estratégia de correção do avanço, apresentada na seção 3.3.8.

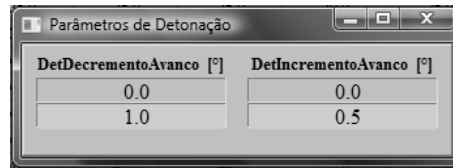


Figura 3-34 – Janela com os parâmetros da estratégia de correção do avanço.

A Figura 3-35 mostra a janela na qual se permite fazer requisições SDO como foi visto na seção 3.3.4.2. Observa-se que esta janela está dedicada ao SID, porém pode ser modificada de forma a se tornar flexível. Os parâmetros desta janela estão descritos na Tabela 3-11. Através destes parâmetros pode-se consultar ou alterar qualquer parâmetro do SID que esteja mapeado no seu OD (ver Tabela 3-9). Deste modo, é possível ajustar a janela de amostragem e o limiar de detecção, além de alterar as frequências monitoradas pelo algoritmo.

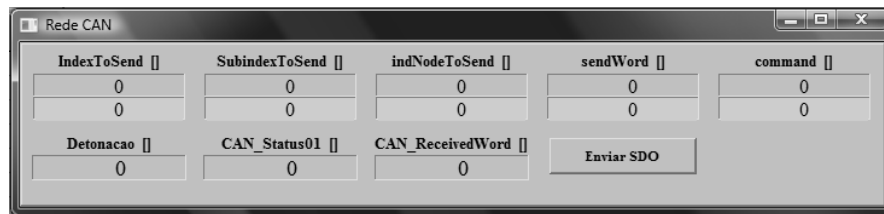


Figura 3-35 – Janela com os parâmetros de comunicação da rede CAN.

Tabela 3-11 – Parâmetros de comunicação da rede CAN.

Parâmetro	Descrição
IndexToSend	Índice do parâmetro desejado no OD do dispositivo escravo
SubindexToSend	Sub-Índice do parâmetro desejado no OD do dispositivo escravo
indNodeToSend	Identificador do nodo alvo na rede.
sendWord	Valor a ser escrito no parâmetro determinado acima (caso o comando seja de escrita)
command	Tipo de operação a ser feita, escrita ou leitura.
Detonacao	Valor da informação de ocorrência de detonação enviada pelo SID através de um PDO
CAN_Status01	Estado do nodo alvo
CAN_ReceivedWord	Valor lido do escravo se o comando foi de leitura; Se o comando foi de escrita então este valor deve ser igual ao valor que foi escrito, para confirmar a operação.
Botão EnviarSDO	Após preencher os campos acima basta pressionar este botão para que a requisição SDO seja enviada.

3.6 Conclusões

Neste capítulo foi apresentada a metodologia utilizada no desenvolvimento da arquitetura de controle de um MCI-ICE na condição de marcha lenta. O sistema completo pode ser dividido em três partes: ECU, SID e IHM. O desenvolvimento da ECU e do SID foi baseado em um DSP que agrega diversos periféricos, o que permitiu uma simplificação do hardware. As variáveis analógicas são medidas através do módulo ADC do DSP, enquanto a rotação e a posição angular do eixo são medidas pelo módulo de captura. O periférico de PWM é usado para gerar os pulsos de ignição e injeção, enquanto o GPIO é usado para a geração dos comandos do atuador de marcha lenta. Os

periféricos SCI e CAN do DSP executam as camadas inferiores dos protocolos de comunicação utilizados, de modo que o software fica responsável apenas pelas camadas de alto nível.

Com relação ao controlador de injeção, foi mostrado que as ações diretas são responsáveis por rejeitar as perturbações medidas, enquanto o controlador PI realimentado fica responsável por corrigir eventuais erros em regime permanente. No caso do controle de marcha lenta, utiliza-se apenas um controlador PI realimentado. O projeto dos controladores PI de lambda e marcha lenta foi baseado em modelos lineares que se mostraram satisfatórios para descrever o comportamento do sistema em torno de um ponto de operação, desde que respeitadas algumas condições. Este capítulo mostrou também a característica multivariável do MCI, que implica em acoplamento entre as malhas de controle de marcha lenta e lambda. Foi adotada uma abordagem multimalhas, o que permitiu o projeto independente dos controladores, porém foi necessário utilizar estratégias auxiliares para reduzir e minimizar os efeitos da interação entre as malhas. Devido à abordagem utilizada e às simplificações consideradas, espera-se que seja necessário ajustar os ganhos empiricamente quando os controladores atuarem em paralelo no sistema real.

Com relação ao controle de ignição foi mostrado que o mapa de avanço base é fundamental para o desempenho da estratégia, já que o torque não é realimentado no sistema. Neste caso, o mapa deve ser calibrado previamente para a condição de máximo torque ou LDI. Com a realimentação da informação de ocorrência de detonação no sistema, não é necessário adotar margens elevadas de segurança no mapa de avanço, o que permite uma calibração mais otimizada em busca da condição de máximo torque.

Capítulo 4

Resultados

Este capítulo apresenta os resultados obtidos neste trabalho. Inicialmente especifica-se as condições dos testes realizados, incluindo as limitações enfrentadas, as simplificações consideradas e a descrição do motor e dos equipamentos utilizados. Em seguida os resultados obtidos com os controladores implementados são mostrados e analisados.

4.1 Condições dos testes

Como foi visto ao longo dos capítulos anteriores, as estratégias de controle eletrônico das ECUs modernas se baseiam em mapas, tabelas e parâmetros que precisam ser calibrados de acordo com o motor a ser controlado. O mesmo ocorre com o sistema desenvolvido neste trabalho. As malhas de controle realimentado não atuam sozinhas e precisam de ações diretas de controle para que um bom desempenho seja alcançado. No caso do controle de lambda, o mapa de injeção tem grande importância, pois corrige o tempo base de injeção de acordo com o ponto de operação do motor, como foi visto na seção 3.3.6.1. O controlador PI de lambda tem banda passante limitada e, deste modo, não proporciona bom desempenho dinâmico. Portanto, o mapa de injeção é fundamental para que o sistema de controle de lambda forneça resultados satisfatórios. No caso do controle do avanço de ignição, o mapa tem importância ainda maior já que não existe nenhum tipo de realimentação que forneça a informação de torque. A correção de detonação apenas reduz o ângulo de avanço de forma a evitar que o motor opere em condições de detonação elevada, como foi visto na seção 3.3.8. Deste modo, o mapa é fundamental para indicar o ângulo de avanço que fornece o maior torque possível dentro das limitações de emissões e nível de detonação. Conclui-se que, para um bom desempenho do sistema, é necessário que mapas, tabelas e parâmetros da ECU estejam corretamente calibrados.

No processo de calibração de motores um mecanismo de teste baseado em dinamômetro tem importância fundamental, já que controla a rotação do motor através da carga aplicada no seu eixo. Deste modo, para se determinar o ponto de operação, basta ajustar a posição desejada para a válvula borboleta e selecionar a rotação de referência. O controlador do dinamômetro ajusta a carga aplicada no eixo do motor de forma a manter a rotação próxima da referência, mesmo com variações de parâmetros como avanço e tempo de injeção, por exemplo. Ao mesmo tempo o dinamômetro fornece a medição do torque instantâneo gerado pelo motor. Nestas condições os

parâmetros de calibração podem ser alterados sem que o motor mude o seu ponto de operação, até que a condição desejada seja atingida. Para a calibração do mapa de injeção, deve-se varrer os pontos de operação do mapa ajustando o tempo de injeção de forma a se obter o valor de lambda desejado. No caso da calibração do mapa de avanço, deve-se varrer os pontos de operação do motor ajustando o avanço até que seja atingido o maior torque ou a condição de LDI.

Caso não seja possível utilizar um dinamômetro, a tarefa de calibração de um motor se torna complicada. Não é possível escolher qualquer ponto de operação, pois na condição de carga fixa no eixo, cada posição de borboleta leva o motor a uma determinada rotação, ou seja, não é possível escolher o valor da rotação. Além disso, qualquer alteração nos parâmetros faz com que a rotação se altere, mudando o ponto de operação. Conclui-se que o dinamômetro é estritamente necessário para a calibração correta de um motor.

No presente trabalho não foi possível utilizar um dinamômetro, nem qualquer tipo de medição de torque. Os testes foram realizados com o motor em bancada. Como o escopo deste trabalho se restringe ao controle do MCI na condição de marcha lenta, a indisponibilidade de um dinamômetro não prejudica os testes. No entanto, as estratégias de controle de lambda e de avanço se baseiam em mapas que precisam ser calibrados. No caso do avanço de ignição, a falta do dinamômetro inviabiliza qualquer tentativa de calibração, já que não há informação do torque desenvolvido. Deste modo foi adotado o valor fixo de 10° de avanço em todo o mapa. Além disso, o fenômeno da detonação não ocorre na ausência de carga no eixo e, desta forma, não foi possível testar a estratégia de correção do avanço. Já no caso do controle de lambda, a medição obtida através do sensor UEGO possibilita um ajuste aproximado do mapa de injeção.

Como o escopo deste trabalho se restringe à condição de marcha lenta, é necessário ajustar apenas os pontos que correspondem à posição igual a zero da válvula borboleta. Além disso, pode-se considerar apenas a faixa de rotação de zero até 1500 rpm. Com estas simplificações, o ajuste se restringe a apenas sete pontos do mapa. Como não é possível ajustar a carga aplicada no eixo, de forma a varrer esta faixa de rotações, foi utilizado o atuador de marcha lenta para variar a rotação. A posição do motor de passo foi ajustada de forma a manter o motor em cada valor de rotação, e o tempo de injeção foi corrigido para mistura ligeiramente rica com lambda de aproximadamente 0,98. Este procedimento é iterativo, já que a alteração do tempo de injeção faz com que a rotação se altere, de forma que é necessário reajustar a posição do atuador de marcha lenta. Observe que esta estratégia tem o mesmo efeito de alterar a posição da borboleta, pois a vazão mássica de ar é alterada, no entanto este procedimento foi considerado satisfatório para calibrar de forma aproximada o motor na faixa desejada. Este ajuste aproximado foi realizado nos pontos de 750 rpm até 1500 rpm. Na faixa de 0 até 500 rpm foi adotada mistura rica de forma a garantir a partida do motor. A Tabela 4-1 mostra a região do mapa ajustada. Observa-se que entre 750 rpm e 1250 rpm a correção do tempo de injeção decresce linearmente com o aumento da rotação. O tempo base de injeção utilizado foi de 10 ms.

Tabela 4-1 – Região do mapa de injeção correspondente à condição de marcha lenta, com os valores ajustados através da medição do sensor UEGO.

Pos Borb [%]	Rotação [rpm]						
	0	250	500	750	1000	1250	1500
0	70	50	22	20	18	16	16
5	70	50	22	20	18	16	16

Os parâmetros da ação direta de compensação da posição do atuador de marcha lenta também requerem calibração. Através da realização de testes, a posição 140 foi escolhida como padrão (ver seção 3.3.6.2), por que está entre os valores que mantêm a rotação próxima dos 900 rpm de referência de marcha lenta quando o motor está sem carga em seu eixo. Os testes mostraram também que cada passo do atuador de marcha lenta causa um desvio de aproximadamente 0,03 ms no tempo de injeção em relação à condição estequiométrica. Portanto o valor de 0,03 ms foi utilizado como ganho de compensação da posição do motor de passo (ver seção 3.3.6.2). Os parâmetros da ação direta de enriquecimento para aceleração foram ajustados empiricamente. Os melhores resultados foram obtidos com a aplicação de 30% de ganho no tempo de injeção e taxa de redução de 1,5% em cada ciclo do motor (ver seção 3.3.6.3). A Tabela 4-2 mostra os parâmetros básicos definidos para o sistema.

Tabela 4-2 – Parâmetros básicos definidos para o sistema.

Parâmetro	Valor usado
Tempo Base de Injeção	10 ms
Tempo de Ignição	3,5 ms
Tempo duração passo do MP	5 ms
Ganho Enriq. Para Aceleração Ráp.	30%
Taxa decaimento Ganho Enriq.	1,5 % por ciclo
Posição padrão do motor de passo	140
Ganho Compensação da posição MP	0,03 ms

O motor utilizado nos testes foi do modelo Fiasa 1.0 mpi fabricado pela Fiat Automóveis S.A. Os principais dados técnicos deste motor estão apresentados na Tabela 4-3.

Tabela 4-3 – Dados técnicos do motor utilizado nos testes

Fabricante	Fiat Automóveis S.A.
Modelo	Fiasa 1.0 mpi
Ciclo/Combustível	Otto/Gasolina
Número e posição dos cilindros	4 em linha
Número de válvulas por cilindro	2
Diâmetro x curso	76 mm x 54,8 mm
Cilindrada total	994 cm ³
Taxa de compressão	9,35 : 1
Potência Máxima	61 CV a 6000 rpm
Torque Máximo	8,1 kgfm a 3000 rpm
Regime de marcha lenta	850 ± 50 rpm
Tipo de injeção	Multiponto
Pressão de injeção	3 bar
Ordem de Ignição	1-3-4-2
Teor de CO em marcha lenta	< 0,5%

Durante os testes realizados, a dinâmica do sistema controlado pela ECU foi avaliada através da aplicação de carga no eixo do motor. Para isso foi utilizado o eletro-ventilador do sistema de arrefecimento. Seu acionamento causa um aumento de carga no eixo do motor através do alternador. Nesta condição, a potência requerida pode ser estimada a partir da potência elétrica de acionamento do eletro-ventilador (0,35 kW), do rendimento total do sistema de recarga (0,90) e do rendimento do acoplamento entre o motor e o alternador (0,85). Obtém-se o valor de 0,45 kW (0,6 CV) de potência requerida no eixo com o acionamento do eletro-ventilador, valor que pode ser considerado significativo, já que a potência útil disponibilizada pelo motor, na condição de marcha lenta, é da ordem de 3,0 CV.

Os testes foram realizados com o motor aquecido, em sua temperatura normal de operação. As compensações da tensão na bateria não foram utilizadas. Isso se justifica pelo fato de que o alternador usado é capaz de suprir a potência necessária aos dispositivos elétricos do motor, evitando a ocorrência de um balanço negativo na energia do sistema. Deste modo, pôde-se considerar que a tensão não apresenta variações suficientes para comprometer os resultados apresentados neste trabalho.

4.2 Resultados obtidos

Foram realizados vários testes com o sistema desenvolvido controlando o lambda e a rotação na condição de marcha lenta. Inicialmente são apresentados os testes com o controle de lambda em malha fechada e o controle de marcha lenta em malha aberta, com o objetivo de mostrar como as ações de controle de injeção se combinam para manter o lambda na condição estequiométrica. São mostrados também testes dinâmicos do controle de lambda diante de uma perturbação gerada pela malha de marcha lenta. Em seguida são apresentados os testes com os controladores de lambda e marcha lenta em malha fechada, o que corresponde ao objetivo final deste trabalho. O desempenho dos controladores atuando em paralelo é avaliado através da aplicação da carga do eletro-ventilador no eixo do motor. Discute-se o desempenho obtido e a influência que as malhas exercem entre si. Avalia-se a validade dos métodos lineares aplicados a um MCI em torno de uma região de operação. Em todos os testes a aquisição dos dados foi realizada a uma taxa de 20Hz através do módulo DataLog descrito na seção 3.3.5. Os dados armazenados na ECU foram carregados em um PC através da IHM. Posteriormente foram gerados os gráficos apresentados nesta seção utilizando o Matlab [57].

4.2.1 Controle de lambda com sensor EGO em regime permanente

Inicialmente foi testado o controlador de lambda realimentado com sensor EGO, sendo o controlador de marcha lenta mantido em malha aberta. O primeiro teste realizado foi em regime permanente, ou seja, sem perturbação e com referência constante. O atuador de marcha lenta permaneceu fixo na posição 130, de forma a manter o motor em uma rotação baixa, que

corresponda à faixa de validade do modelo linear obtido na seção 3.3.6.5 e que permaneça na região de marcha lenta. Os ganhos obtidos através das simulações desenvolvidas na metodologia, $K_p = 0,03$ e $K_i = 0,18$, proporcionaram resposta com amplitude de oscilação elevada, com o lambda se afastando constantemente da região estequiométrica. A redução do ganho proporcional para 0,01 proporcionou o resultado que está apresentado na Figura 4-1, com as medidas de rotação, lambda não-linear (EGO), lambda linear (UEGO) e tempo de injeção. Mostra-se separadamente a correção do tempo de injeção gerada pelo controlador PI de realimentação. A Tabela 4-4 mostra os valores dos parâmetros relevantes ao teste em questão.

Tabela 4-4 – Parâmetros relevantes para o teste de controle em malha fechada de lambda usando EGO e marcha lenta em malha aberta.

Parâmetro	Valor usado
Tempo Base de Injeção	10 ms
Tempo de Ignição	3,5 ms
Posição motor de passo - Malha Aberta	130
Ganho K_p controlador PI de lambda	0,01
Ganho K_i controlador PI de lambda	0,18
Posição padrão do motor de passo	140
Ganho Compensação da posição MP	0,03 ms

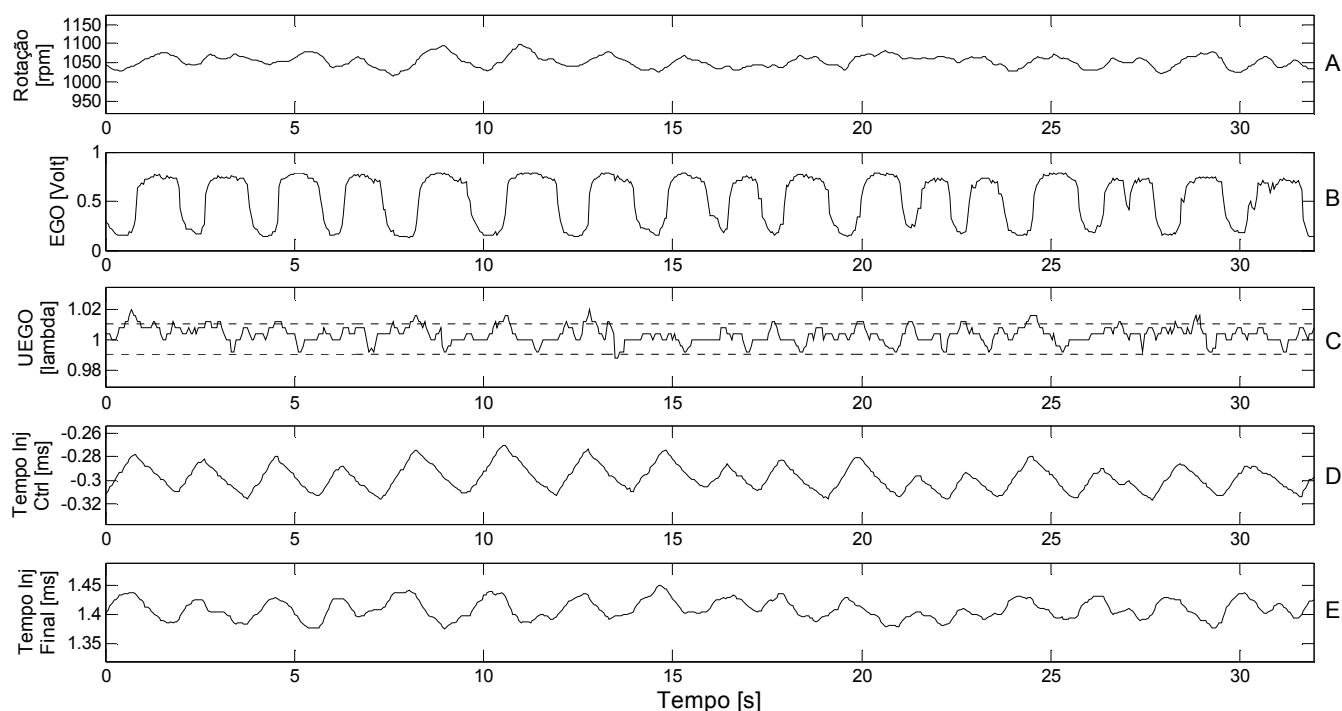


Figura 4-1 – Controle de lambda em malha fechada com realimentação através de sensor EGO, com marcha lenta em malha aberta.

O gráfico A da Figura 4-1 mostra que a rotação se manteve em torno de 1050 rpm com variação máxima de 30 rpm. O gráfico B mostra a medição gerada pelo sensor EGO, que foi usada para fechar a malha de controle. Observa-se que o lambda oscila com frequência que varia entre 0,5 e 0,7 Hz. O gráfico C mostra a medição gerada pelo sensor UEGO, que corresponde ao valor

instantâneo do lambda ao longo do tempo. Duas linhas tracejadas de tolerância de 1% em torno da referência do lambda são mostradas representando a região ótima de controle. Observa-se que o controlador é capaz de manter o lambda próximo da região ideal, com variação máxima de 2%. O gráfico E mostra o tempo de injeção final aplicado pela ECU no comando dos bicos injetores. O tempo médio é de aproximadamente 1,4 ms, com variação máxima de 5%. Como foi visto na seção 3.3.6 o cálculo do tempo final de injeção compreende três ações diretas de controle e uma realimentação. As ações diretas se baseiam em correções aplicadas sobre o tempo base de injeção. A primeira delas é a correção percentual gerada pelo mapa de injeção, que varia linearmente com a rotação neste caso. Em seguida adiciona-se uma compensação em função da posição do motor de passo de marcha lenta. Por fim aplica-se uma correção percentual com base na variação da posição do motor de passo. No caso do teste com o controlador de marcha lenta em malha aberta, a correção com base na variação da posição do motor de passo não atua, já que este permanece fixo na posição 130. No entanto, a diferença de 10 passos em relação à posição padrão faz com que seja aplicada uma compensação de 0,3 ms ao tempo de injeção. A ação de realimentação é gerada pelo controlador PI, e está apresentada no gráfico D. Pode-se observar sua variação baseada na medição gerada pelo sensor EGO. A correção média de realimentação fica em torno de -0,3 ms, com variação de aproximadamente 7%. A correção negativa indica que, como esperado, a mistura gerada pela ação direta é ligeiramente rica, e seu valor deve ser reduzido. Do total de 5% de variação do tempo de injeção final, o controlador PI de realimentação é responsável por 3%, enquanto os 2% restantes são causados pela ação direta através do mapa de calibração.

Voltando aos resultados das simulações, apresentados na seção 3.3.6.7, observa-se na Tabela 3-6 que os ganhos aplicados no sistema real, $K_p = 0,01$ e $K_i = 0,18$, proporcionam na simulação amplitude de oscilação do lambda igual a 0,66% e frequência de 0,6Hz. Já o sistema real apresentou oscilação com amplitude média de 1%, com picos de 2%, e frequência entre 0,5 e 0,7 Hz. As diferenças já eram esperadas devido ao nível de simplificação do modelo, no entanto os resultados foram razoavelmente próximos. No caso do ganho proporcional original, considerado ótimo na metodologia, o sistema real apresentou oscilações elevadas no lambda, com picos de 3%, e variações maiores que 50 rpm na rotação. Esta diferença se deve principalmente ao fato de que o lambda influi na rotação, que por sua vez influi no cálculo do tempo de injeção, através do mapa de calibração. Esta interdependência entre o lambda e a rotação não é levada em conta pelo modelo de simulação, que considera apenas a malha de realimentação do controlador de lambda. No entanto, se a rotação for mantida com variação relativamente pequena, o modelo obtido se aproxima do comportamento real do sistema.

Como foi visto na seção 3.3.6.4, a dinâmica complexa do motor faz com que este sistema apresente variações entre ciclos mesmo que todos os parâmetros controláveis sejam mantidos constantes. Deste modo, o comportamento do lambda sempre varia, apresentando alterações na frequência e na amplitude das oscilações, como pode ser observado no gráfico B da Figura 4-1, no

qual a frequência de oscilação varia entre 0,5 e 0,7 Hz aproximadamente. Os gráficos obtidos mostram também a influência do lambda na rotação, efeito citado na seção 3.3.6.6. Quando o lambda oscila com uma frequência maior (intervalo entre 15 e 23 segundos) a rotação fica mais estável. No entanto, quando a frequência do lambda é reduzida (intervalo entre 5 e 15 segundos) pode-se perceber oscilações na rotação, na mesma frequência.

4.2.2 Teste dinâmico do controle de lambda com sensor EGO

Foi realizado também um teste para verificar a resposta dinâmica do controlador realimentado com sensor EGO, através da perturbação do atuador de marcha lenta na malha de lambda. Para a realização de um teste mais próximo das condições reais, foi utilizada a perturbação gerada pelo próprio controlador de marcha lenta durante a variação de carga no eixo do motor. Esta opção se justifica pelo fato de que os dois controladores exercem influência entre si, o que pode levar a instabilidade. Deste modo, não faz sentido ajustar o controlador de lambda com a marcha lenta em malha aberta, pois posteriormente será necessário reajustá-lo. O controlador de marcha lenta será abordado em detalhes na seção 4.2.5.

Como foi visto na seção 3.3.6.6, variações no lambda em torno da região estequiométrica causam oscilações na rotação. Do mesmo modo, a seção 3.3.6.2 mostra que variações na posição do motor de passo causam perturbação de vazão de ar na malha de lambda. Na prática, esta interação implica em limitações ao ajuste dos controladores. Foi observado que o comportamento estável do sistema é obtido apenas quando se configura uma região de tolerância para o controle de rotação, de modo que o atuador de marcha lenta se move apenas quando a rotação excede esta região. Esta estratégia foi implementada no sistema e está descrita na seção 3.3.7.5. Testes mostraram que o valor de tolerância de rotação igual a 50 rpm é necessário para que o motor atinja um regime permanente de controle. Foi necessário também reduzir os ganhos do controlador PI de lambda, já que os melhores resultados foram obtidos quando o lambda oscila com pequena amplitude, mesmo que a frequência seja baixa. No entanto, a redução exagerada do ganho integral prejudica o desempenho dinâmico da malha de realimentação na correção da mistura. Portanto uma relação de compromisso deve ser adotada.

Com base nas considerações feitas, foi adotada a referência de 900 rpm com tolerância de 50 rpm, e os ganhos adotados anteriormente para o controle de lambda foram reduzidos para $K_p = 0,005$ e $K_i = 0,12$. A necessidade de redução dos ganhos dos controladores era esperada, devido à abordagem multimalhas adotada na análise do sistema (ver seção 3.3.7.6). Este primeiro teste dinâmico envolveu apenas a redução de carga no eixo do motor. A situação de aumento de carga no eixo é mais complicada e será usada na seção 4.2.5 para avaliar a dinâmica do sistema completo. A Tabela 4-5 mostra os valores dos parâmetros relevantes, enquanto a Figura 4-2 mostra o resultado obtido.

Tabela 4-5 – Parâmetros relevantes ao teste dinâmico do controlador de lambda com EGO.

Parâmetro	Valor usado
Tempo Base de Injeção	10 ms
Tempo de Ignição	3,5 ms
Tempo duração passo do MP	5 ms
Referência rotação marcha lenta	900 rpm
Tolerância de rotação	50 rpm
Ganho Kp controlador PI de lambda	0,005
Ganho Ki controlador PI de lambda	0,12
Posição padrão do motor de passo	140
Ganho Compensação da posição MP	0,03 ms

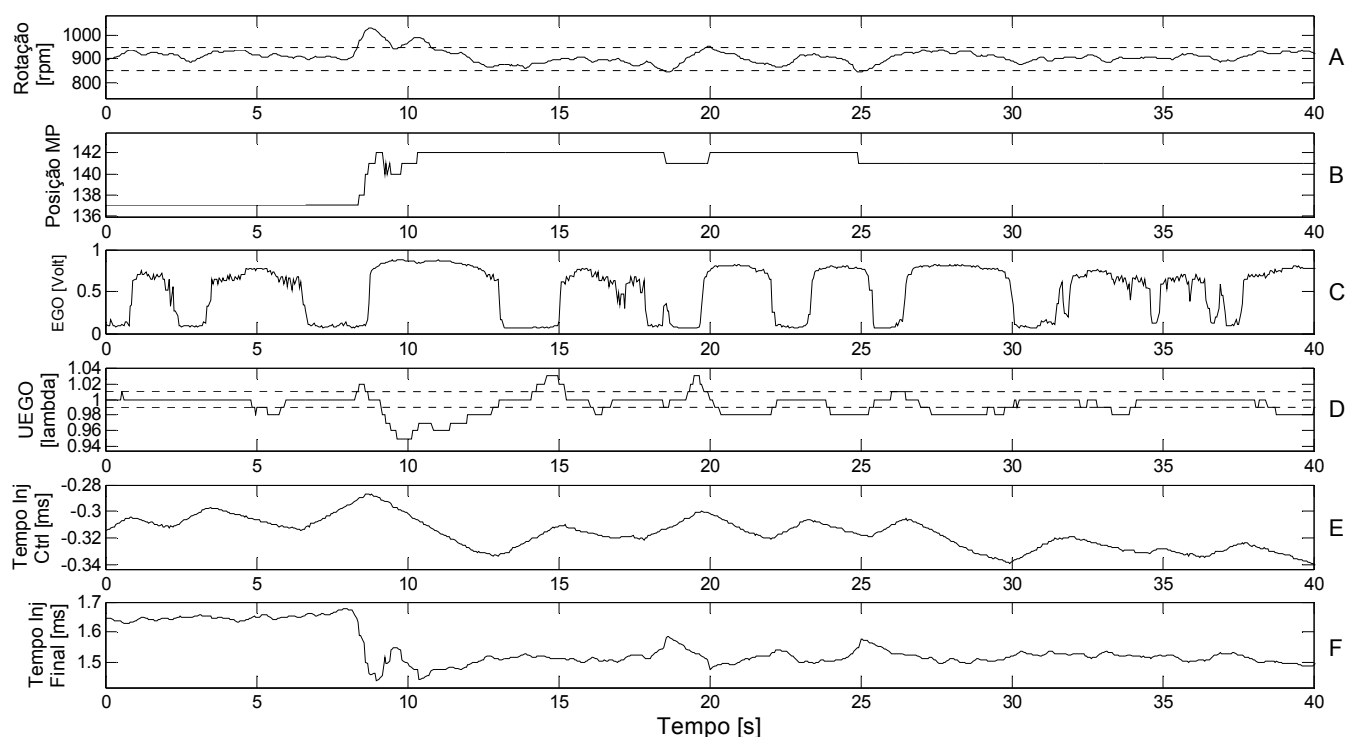


Figura 4-2 – Controle de lambda com sensor EGO e perturbação gerada pelo motor de passo, devido ao controlador de marcha lenta.

Inicialmente o sistema está em regime permanente, com a rotação dentro da faixa de tolerância, como mostra o gráfico A, e o lambda próximo da região estequiométrica, como mostra o gráfico D. No instante de tempo igual a 8 segundos o eletro-ventilador é desligado, o que causa uma redução na carga aplicada no eixo do motor e conseqüentemente a rotação aumenta. Ao perceber o aumento na rotação, o controlador de marcha lenta faz com que o motor de passo reduza a vazão mássica de ar que chega ao coletor de admissão, como pode ser visto no gráfico B. Esta ação causa uma perturbação na malha de lambda, já que a mistura tende a ficar rica. As ações diretas de controle atuam imediatamente para minimizar e corrigir esta perturbação. Através da ação direta do mapa de injeção, o aumento da rotação faz com que o tempo de injeção diminua. Ao mesmo tempo, o fechamento do atuador de marcha lenta também reduz o tempo de injeção, devido à compensação da posição do motor de passo. Estas duas ações diminuem o efeito de

enriquecimento da mistura, porém, mesmo após a correção da rotação e da estabilização do atuador de marcha lenta no instante igual a 11 segundos, a mistura permanece ligeiramente rica. Através da realimentação do lambda via sensor EGO o controlador PI percebe que a mistura está rica e reduz lentamente sua ação de controle até que a condição estequiométrica seja atingida, como pode ser visto no gráfico E. Os baixos ganhos do controlador PI fazem com que sua contribuição dinâmica seja muito pequena, de modo que a sua principal função é corrigir o erro estacionário, o que foi previsto na seção 3.3.6.1. O sistema de controle leva aproximadamente 4 segundos para corrigir a perturbação causada pelo atuador de marcha lenta.

A redução dos ganhos do controlador PI de lambda em relação ao primeiro teste pode ser confirmada pela menor taxa de variação da ação de controle calculada, apesar de que a menor rotação também contribui para a redução da inclinação da correção gerada pelo PI. Esta estratégia de redução dos ganhos proporciona uma menor amplitude de oscilação do lambda, no entanto, a frequência também fica reduzida, como mostra o sinal do sensor EGO apresentado no gráfico C. Os gráficos mostram que, no intervalo de 17 até 30 segundos, a baixa frequência de oscilação do lambda faz com que a rotação varie da mesma maneira. No entanto, como a amplitude de oscilação do lambda é limitada, as perturbações na rotação não chegam a instabilizar o sistema.

O tempo de injeção final aplicado aos bicos injetores está apresentado no gráfico F. Observa-se que inicialmente o tempo de injeção é de aproximadamente 1,65 ms, e após a redução da vazão de ar este tempo é reduzido para aproximadamente 1,5 ms, o que mostra a ação do sistema para manter a mistura estequiométrica. O controlador PI é responsável por menos de 15% da variação total de 0,15 ms do tempo de injeção final. Todo o restante da correção fica a cargo da compensação da posição do motor de passo. A ação de controle baseada no mapa de injeção não tem nenhum efeito se forem consideradas apenas as condições estacionárias deste teste, o que se deve ao fato de a rotação ser aproximadamente a mesma antes e depois da perturbação. Ou seja, esta ação direta através do mapa tem efeito apenas durante o transitório, quando ocorre variação na rotação. Pode-se concluir que a compensação da posição do motor de passo é de fundamental importância na rejeição à perturbação, pois corrige diretamente o tempo de injeção, deixando-o próximo do valor estequiométrico. A estratégia de controle se completa com o controlador PI que utiliza a medição da variável controlada para fazer a correção mais precisa da mistura, de forma que o erro estacionário seja sempre pequeno.

Outras situações de rejeição à perturbação no controle de lambda podem ser observadas nos instantes de tempo iguais a 18, 20 e 25 segundos, nos quais a rotação sai da região de tolerância, fazendo com que o motor de passo se mova para corrigi-la. Nestes casos observa-se a correção realizada no tempo de injeção para evitar que a mistura se afaste da região estequiométrica. A partir de 30 segundos o sistema volta à condição de regime permanente, na qual o lambda se mantém próximo da região de tolerância de 1% e a rotação permanece dentro da faixa de 50 rpm em torno da referência de marcha lenta.

Os resultados apresentados permitem concluir que o desempenho do controlador de lambda com realimentação via EGO é satisfatório, pois é capaz de manter a mistura em média 2% em torno da região estequiométrica, e rejeitar as perturbações aplicadas. O bom desempenho dinâmico é garantido pelas ações diretas do mapa de injeção e da compensação da posição do motor de passo, que minimizam os efeitos das perturbações e mantém o lambda próximo da referência. A malha de realimentação do lambda via sensor EGO garante o desempenho estacionário, corrigindo eventuais erros na relação ar/combustível.

4.2.3 Controle de lambda com sensor UEGO em regime permanente

Foram realizados também testes utilizando o controlador de lambda realimentado com o sensor UEGO. Na seção 3.3.6.6 foi projetado um controlador PI por síntese direta com base em um modelo linear de primeira ordem com tempo morto, obtido a partir de dados de resposta ao degrau do sistema. Os ganhos obtidos foram $K_p = 1,6$ e $K_i = 7,35$. Os testes experimentais mostraram que estes ganhos produzem resultados satisfatórios, com o lambda sendo mantido na região de tolerância em torno da condição estequiométrica e, portanto, nenhum ajuste adicional foi necessário. Os parâmetros da malha de ação direta foram mantidos com os mesmos valores dos testes anteriores. A Figura 4-3 mostra o resultado obtido para o controle de lambda em malha fechada com realimentação através de sensor UEGO, mantendo o controlador de marcha lenta em malha aberta, com motor de passo na posição 135.

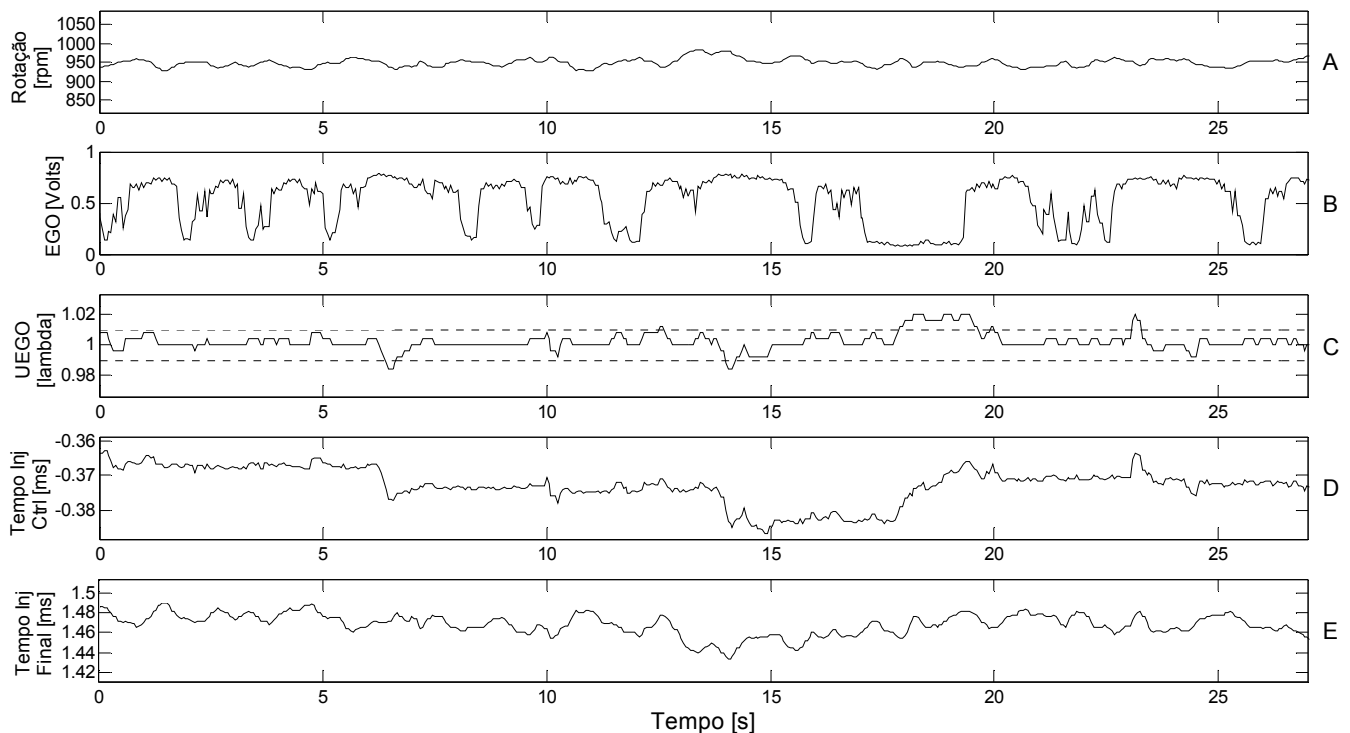


Figura 4-3 - Controle de lambda em malha fechada com realimentação através de sensor UEGO, com marcha lenta em malha aberta.

O gráfico A da Figura 4-3 mostra que a rotação se mantém por volta de 950 rpm, com variação máxima de aproximadamente 30 rpm. O gráfico C mostra a medição do sensor UEGO, usada na realimentação do controlador PI. Observa-se que o lambda não apresenta a característica oscilatória obtida com o sensor EGO, se mantendo a maior parte do tempo bem próximo do valor de referência. Esta característica aparece também no sinal do sensor EGO, mostrado no gráfico B, que não apresenta as oscilações definidas observadas na Figura 4-1. O gráfico do sensor UEGO mostra a ocorrência de perturbações no lambda devido às variações entre ciclos nos instantes iguais a 7, 14, 18 e 23 segundos. O gráfico D mostra a ação de controle do PI para corrigir as perturbações. A ação de controle negativa indica que a malha de ação direta gera mistura ligeiramente rica, como era esperado. O tempo de injeção final aplicado aos bicos injetores é mostrado no gráfico E. A partir dos gráficos D e E pode-se perceber que a maior parte da variação do tempo de injeção final em regime permanente é causada pela rotação através da ação direta do mapa de injeção, já que a ação de controle do PI varia muito pouco nesta condição.

O controle do lambda com sensor UEGO possibilita evitar a característica oscilatória observada no controle com sensor EGO. A utilização do UEGO permite ao controlador saber mais precisamente o valor do erro, de forma a atuar com a intensidade necessária. Deste modo, a correção do tempo de injeção calculada pelo PI não precisa ficar oscilando todo o tempo já que, à medida que o erro se aproxima de zero, a ação de controle tende a ficar inalterada. Ao mesmo tempo, o controle mais eficiente do lambda proporciona a redução da variação da rotação, como mostra o gráfico A da Figura 4-3. Como consequência, a ação direta de controle obtida do mapa de injeção a partir da rotação também varia menos, como mostra o gráfico E, no qual o tempo de injeção final varia menos do que 2%, enquanto no teste anterior com EGO esta variação é maior do que 4%.

4.2.4 Teste dinâmico do controle de lambda com sensor UEGO

A dinâmica do controlador de lambda com sensor UEGO foi testada através da aplicação de perturbação na vazão de ar, usando o atuador de marcha lenta. Como já foi explicado, optou-se por aplicar a perturbação indiretamente, através do controlador de marcha lenta, situação mais próxima da real. O controlador de marcha lenta será abordado na próxima seção, no entanto já será utilizado, com referência igual a 900 rpm e tolerância de 50 rpm. Foram utilizados os mesmos ganhos do teste anterior, ou seja, $K_p = 1,6$ e $K_i = 7,35$. A Figura 4-4 mostra os resultados obtidos.

O teste realizado é igual ao da seção 4.2.2. Inicialmente o sistema está em regime permanente, com a rotação dentro da faixa de tolerância, como mostra o gráfico A, e o lambda dentro da região estequiométrica, como mostra o gráfico C. No instante de tempo igual a 8 segundos o eletro-ventilador é desligado, o que causa uma redução na carga aplicada no eixo do motor e conseqüentemente a rotação aumenta. Para corrigir o aumento na rotação, o controlador de marcha lenta faz com que o motor de passo reduza a vazão mássica de ar que chega ao coletor de admissão, como pode ser visto no gráfico B. Esta ação causa uma perturbação na malha de lambda,

devido ao enriquecimento da mistura. Deste modo, o controlador de lambda atua de forma a corrigir a perturbação. Primeiramente, o aumento da rotação faz com que o tempo de injeção base obtido do mapa seja reduzido, o que diminui o enriquecimento. Ao mesmo tempo, o deslocamento de 6 posições do motor de passo faz com que o tempo base de injeção seja reduzido de 0,18 ms. O gráfico E mostra que estas duas ações diretas causam uma redução abrupta no tempo de injeção final, o que minimiza o enriquecimento da mistura. O controlador PI de realimentação atua em paralelo, fazendo o ajuste mais preciso da mistura, de forma que o erro seja zero em regime permanente, como pode ser observado no gráfico D.

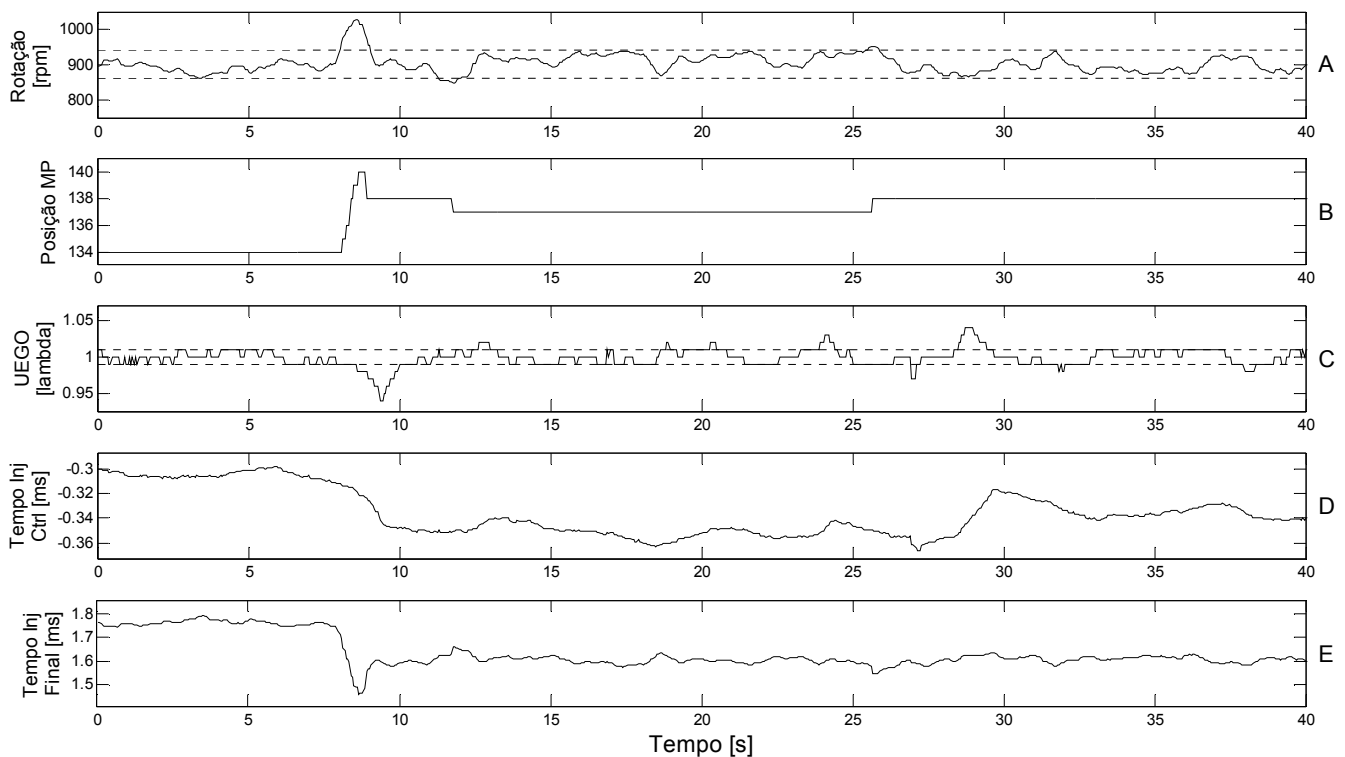


Figura 4-4 - Controle de lambda com sensor UEGO e perturbação gerada pelo motor de passo devido ao controlador de marcha lenta.

Através deste gráfico pode-se perceber também a diferença entre a ação de controle do PI usando UEGO e usando EGO. No caso do UEGO, o controlador aumenta a inclinação da ação de controle à medida que o erro aumenta, já que ele possui a informação da magnitude do erro. Deste modo o controlador corrige o erro no lambda em um tempo menor, no caso 2 segundos. No caso do EGO, como mostra o gráfico E da Figura 4-2, observa-se que a ação de controle do PI varia com a mesma inclinação não importando o valor do erro, por que o controlador não tem a informação da magnitude do erro quando usa o EGO. Neste caso, para manter a estabilidade da malha, é necessário utilizar ganhos menores para o controlador, o que implica em uma correção mais lenta do lambda até a condição estequiométrica, levando aproximadamente 4 segundos como mostra a Figura 4-2.

A Figura 4-4 mostra que a perturbação na vazão de ar no instante de tempo igual a 8 segundos causa uma correção no tempo de injeção final de aproximadamente 0,15 ms, considerando apenas as condições de regime permanente. O controlador PI contribui com apenas 25% desta variação, sendo a correção restante feita pela ação direta de compensação da posição do motor de passo.

Como previsto, os resultados apresentados nas últimas seções permitem concluir que o controlador baseado no sensor UEGO apresenta melhor desempenho em relação ao que utiliza o EGO. Primeiramente, o controle do lambda é mais preciso, e não apresenta as oscilações características do EGO, o que reduz a variação da rotação. Além disso, a informação de magnitude do erro possibilita ao controlador atuar com mais intensidade quando o erro está elevado, o que reduz o tempo de rejeição à perturbação.

4.2.5 Controladores de lambda e marcha lenta em malha fechada

Nas seções anteriores o controlador de lambda foi analisado em detalhes e seu desempenho foi avaliado através de testes, sendo considerado satisfatório, pois mantém a mistura próxima da região estequiométrica e rejeita as perturbações aplicadas. Foram realizados inicialmente testes em regime permanente com o controle de lambda em malha fechada e o de marcha lenta em malha aberta, sendo o atuador de marcha lenta mantido em uma posição fixa. Em seguida foram realizados testes dinâmicos nos quais se aplicou uma perturbação no lambda através da variação da vazão mássica de ar no coletor. Optou-se por aplicar esta perturbação indiretamente, através do controlador de marcha lenta que, deste modo, foi mantido em malha fechada nos testes dinâmicos. No entanto, foi realizada apenas uma análise superficial do controle de marcha lenta e da interação entre as malhas, já que o objetivo principal era analisar o controlador de lambda. Nesta seção será analisada a dinâmica do sistema de controle completo.

Durante a realização dos testes dinâmicos do controlador de lambda, nas seções 4.2.2 e 4.2.4, foram feitas algumas considerações sobre as influências dos controladores entre si. A principal delas consiste na influência do lambda sobre a rotação. 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. Foi observado também que não é possível manter a rotação em torno de uma referência com grande precisão. Fatores complexos como variações entre ciclos e a própria variação do lambda fazem com que a rotação não permaneça fixa. Além disso, a resolução de controle do atuador de marcha lenta é de aproximadamente 20 rpm para cada passo. Deste modo, foi adotada a tolerância de 50 rpm em torno da referência. Esta estratégia também evita que o motor de passo gere frequentemente perturbações no controle de lambda através da variação da vazão de ar que entra no coletor. Com estas medidas foi possível garantir a estabilidade e o desempenho satisfatório do sistema nos testes dinâmicos anteriores.

Nesta seção será apresentado o teste final do sistema completo em malha fechada, com a aplicação e a retirada de carga no eixo do motor. Nas seções 4.2.2 e 4.2.4 o teste dinâmico do controlador de lambda foi baseado na retirada de carga do eixo do motor. Nesta situação a rotação aumenta e sai da região de tolerância, fazendo com que o controlador de marcha lenta reduza a vazão de ar no coletor de admissão através do motor de passo. A redução na vazão faz com que a mistura ar/combustível fique rica, o que gera uma perturbação no lambda. Os testes realizados mostraram que o sistema de controle é capaz de contornar esta situação de forma satisfatória, levando rotação e lambda de volta às suas condições ideais. Esta situação foi adequada para analisar o desempenho dinâmico do controlador de lambda diante da atuação do controlador de marcha lenta.

No entanto, para o controlador de marcha lenta a condição mais crítica consiste na aplicação de carga no eixo do motor. Nesta situação a rotação cai abruptamente e o controlador deve garantir o seu retorno à região de tolerância. Do ponto de vista do controlador de marcha lenta, esta tarefa é mais complicada por que requer uma aceleração rápida e controlada do motor, enquanto a retirada de carga requer apenas a desaceleração do motor até a rotação desejada. A aceleração rápida de um MCI é favorecida pela adoção de mistura rica, que prioriza o torque, como foi visto na seção 2.3.1.8. Entretanto, quando a rotação cai abruptamente, o controlador de marcha lenta aumenta a vazão de ar no coletor de admissão, o que gera um empobrecimento imediato da mistura. Nestas condições o motor tem dificuldade de acelerar devido à queda no torque, e o desempenho do controlador fica muito comprometido. Deste modo, foi implementada uma estratégia simples, baseada no enriquecimento de aceleração mostrado na seção 2.3.1.8, e que consiste em enriquecer a mistura ar/combustível quando a válvula de marcha lenta é aberta rapidamente. Esta estratégia foi descrita na seção 3.3.6.3.

Os testes realizados consistiram em manter o sistema completo em malha fechada, ligar o eletro-ventilador de forma a aplicar carga no eixo, e desligá-lo ao final. Deste modo pode-se verificar o desempenho dinâmico do sistema completo diante da aplicação de uma carga presente na maioria dos MCI. Foram realizados testes com os sensores EGO e UEGO, sendo os resultados apresentados nas subseções seguintes.

4.2.5.1 Teste com sensor EGO e estratégia de enriquecimento habilitada

Inicialmente foi realizado o teste com realimentação do lambda através do sensor EGO. 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 região estequiométrica. A estratégia de enriquecimento para aceleração foi configurada para aplicar um ganho de 30% sobre o tempo de injeção da ação direta de controle. A taxa de redução deste ganho foi configurada para 1,5% por ciclo, sendo necessários 20 ciclos para que o seu efeito se torne nulo, o que corresponde a aproximadamente 1,5 segundos se considerarmos 800 rpm como rotação média durante a perturbação. Os ganhos do controlador de lambda foram mantidos iguais aos do teste da seção

4.2.2, ou seja, $K_p = 0,005$ e $K_i = 0,12$. No caso do controlador PI de marcha lenta, os ganhos usados inicialmente foram aqueles fornecidos pela simulação realizada na metodologia, $K_c = 0,0455$ e $T_i = 0,5$. No entanto, o sistema físico completo apresenta margens de estabilidade pequenas com estes ganhos, com resposta oscilatória à perturbação. Deste modo foi necessário alterar os ganhos para $K_c = 0,035$ e $T_i = 0,8$. É importante lembrar, mais uma vez, que este ajuste dos ganhos já era esperado, devido à abordagem multimalhas utilizada no projeto dos controladores (ver seção 3.3.7.6). A Tabela 4-6 apresenta os valores dos parâmetros usados.

Tabela 4-6 – Parâmetros utilizados no sistema de controle completo com sensor EGO.

Parâmetro	Valor usado
Tempo Base de Injeção	10 ms
Tempo de Ignição	3,5 ms
Tempo duração passo do MP	5 ms
Referência rotação marcha lenta	900 rpm
Ganho K_c controlador PI marcha lenta	0,035
Ganho T_i controlador PI marcha lenta	0,8
Tolerância de rotação	50 rpm
Ganho K_p controlador PI de lambda	0,005
Ganho K_i controlador PI de lambda	0,12
Ganho Enriq. Para Aceleração Ráp.	30%
Taxa decaimento Ganho Enriq.	1,5 % por ciclo
Posição padrão do motor de passo	140
Ganho Compensação da posição MP	0,03 ms

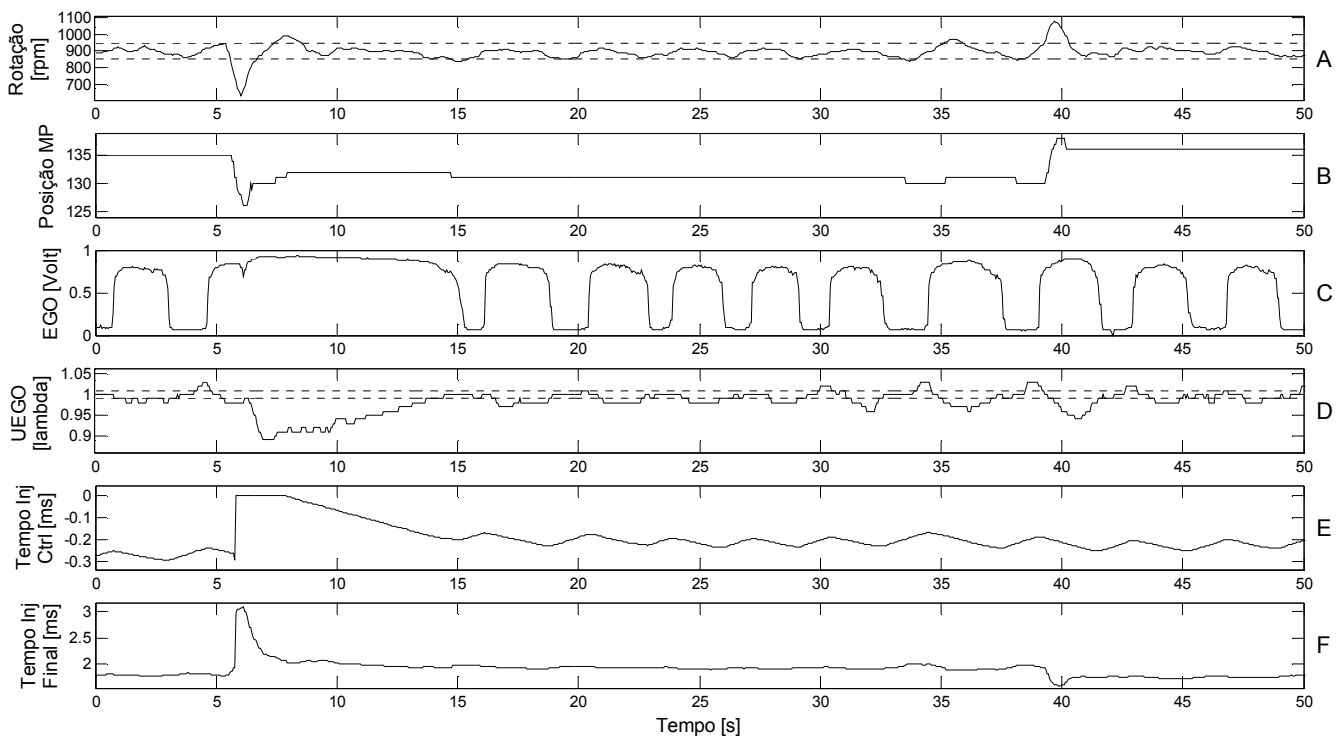


Figura 4-5 – Controle de marcha lenta e lambda em malha fechada com sensor EGO e estratégia de enriquecimento da mistura habilitada.

A resposta obtida está apresentada na Figura 4-5. O gráfico A mostra o comportamento da rotação ao longo do tempo, incluindo as linhas tracejadas que indicam a região de tolerância de 50 rpm. O valor do lambda é mostrado no gráfico D através da medição do sensor UEGO, incluindo também as linhas tracejadas que indicam a região de tolerância de 1% em torno do ponto estequiométrico. A realimentação do controlador de lambda foi feita através do sinal do EGO, que pode ser observado no gráfico C. O gráfico B mostra a posição do atuador de marcha lenta. O gráfico F mostra o tempo de injeção total aplicado nos bicos injetores, enquanto o gráfico E apresenta a parcela de correção do tempo de injeção calculada pelo controlador PI de lambda.

Inicialmente o sistema está em regime permanente com a rotação na região de marcha lenta e o lambda próximo da condição estequiométrica. O atuador de marcha lenta encontra-se parado na posição 135, enquanto o tempo de injeção está em torno de 1,8 ms. O controlador PI de lambda está aplicando uma correção média negativa de aproximadamente 0,27 ms, com a característica oscilatória típica da realimentação via sensor EGO. No instante de tempo igual a 5 segundos aproximadamente, o eletro-ventilador é acionado, aplicando uma carga no eixo do motor. A rotação cai abruptamente, fazendo com que o controlador de marcha lenta aumente rapidamente a vazão de ar no coletor de admissão. A abertura rápida da válvula de marcha lenta causaria um pico de empobrecimento do lambda, porém, a estratégia de enriquecimento da mistura é acionada, gerando um rápido aumento no tempo de injeção. Analisando detalhadamente pode-se observar que, após a aplicação da carga, o tempo de injeção, que se encontrava em 1,8 ms, inicialmente aumenta o seu valor para aproximadamente 2 ms devido à queda inicial da rotação. Em seguida, uma alteração abrupta de 2 ms para aproximadamente 3 ms pode ser observada. Esta variação corresponde ao ganho de 30% aplicado sobre o tempo de injeção gerado pelas ações diretas de controle, adicionado da contribuição de 0,27 ms que deixa de ser aplicada pelo controlador PI, já que este permanece em malha aberta durante a estratégia de enriquecimento. No gráfico E pode-se observar o intervalo de tempo no qual o controlador PI de lambda permanece em malha aberta, aplicando correção nula. Este intervalo é de aproximadamente 2 segundos, e corresponde ao tempo necessário para que o ganho de enriquecimento de 30% seja reduzido à zero ao passo de 1,5% por ciclo. A redução gradual do ganho de enriquecimento pode ser observada no gráfico do tempo de injeção final, F. O gráfico do UEGO mostra que o lambda atinge o valor de 0,9 durante o enriquecimento da mistura. A rotação chega a cair até o valor de 650 rpm, mas o enriquecimento da mistura e o aumento da vazão de ar no coletor provocam a aceleração do motor, que retorna à região de controle em aproximadamente 1 segundo, e em seguida ultrapassa o limite superior de tolerância, com 5% de *overshoot* (sobre-sinal). O controlador de marcha lenta então reduz a vazão de ar até que a rotação entre novamente na região de controle. Quando o ganho da estratégia de enriquecimento chega a zero, aproximadamente no instante igual a 8 segundos, o controlador PI de lambda passa a atuar novamente em malha fechada. Como o EGO está indicando mistura rica, a correção do tempo de injeção calculada pelo PI cresce negativamente até que a condição estequiométrica seja atingida. À

medida que o λ se aproxima da condição estequiométrica, a rotação diminui lentamente até sair da região de controle no instante de aproximadamente 15 segundos. A abertura de 1 passo do atuador de marcha lenta já é suficiente para corrigir novamente a rotação, que passa a oscilar dentro da região de tolerância de acordo com a variação do λ . O sistema se estabiliza com o motor de passo na posição 131 e o tempo de injeção em torno de 2,1 ms. Após o instante igual a 30 segundos a variação entre ciclos faz o λ oscilar com uma maior amplitude, o que influi na rotação, que chega a sair da região de tolerância sendo, porém, rapidamente corrigida pelo controlador de marcha lenta.

Por volta do instante igual a 38 segundos o eletro-ventilador é desligado, reduzindo a carga no eixo do motor. Esta situação de redução da carga no eixo do motor já foi analisada com detalhes na seção 4.2.2, e será abordada apenas brevemente aqui. Como consequência da redução da carga no eixo do motor, a rotação aumenta e sai da região de controle, fazendo com que o controlador de marcha lenta reduza a vazão de ar no coletor. Esta ação causa uma perturbação na malha de λ , já que a mistura tende a ficar rica, como pode ser observado no gráfico D. Como já foi visto anteriormente, a mistura é corrigida inicialmente pela estratégia de compensação da posição do motor de passo, ficando o controlador PI responsável pelo ajuste da mistura em regime permanente. Pode-se observar que, após o instante igual a 42 segundos, o sistema permanece estável, com o motor de passo na posição 136, tempo de injeção aproximado de 1,8 ms, e com as variáveis controladas próximas de suas respectivas referências.

A Figura 4-5 permite verificar algumas considerações feitas anteriormente. A influência do λ na rotação pode ser verificada a partir dos gráficos de rotação e do UEGO. Observa-se que após a estratégia de enriquecimento o λ permanece rico no intervalo de 8 até 13 segundos. Como o λ não está oscilando, a rotação permanece mais estável. Após o instante de 13 segundos o λ passa a oscilar em torno na região estequiométrica, causando a oscilação da rotação na mesma frequência. Após 30 segundos a amplitude de oscilação do λ aumenta, causando uma perturbação na rotação que, no entanto, é prontamente corrigida pelo controlador de marcha lenta.

O intervalo de 15 a 30 segundos mostra a importância da região de tolerância de rotação, por que as oscilações do λ são intrínsecas ao sistema baseado no EGO, e deste modo não é possível evitar que a rotação também varie dentro de uma faixa. A redução da região de tolerância faz com que o atuador de marcha lenta se mova constantemente tentando evitar a oscilação da rotação. No entanto, a variação na vazão de ar causa perturbação no λ , que passa a oscilar com maior amplitude. Neste contexto, a dinâmica interligada entre rotação e λ tende a não entrar em regime permanente.

O intervalo de 5 a 15 segundos permite observar o comportamento do sistema de controle completo quando uma carga é aplicada no eixo do motor. Durante a atuação da estratégia de enriquecimento a correção do controlador PI de λ é zerada, de modo que o tempo de injeção

é calculado apenas pela ação direta de controle. Além disso, o integrador do controlador PI também é zerado. Deste modo, quando o ganho de enriquecimento chega a zero e o controlador PI passa a atuar novamente em malha fechada, não ocorre uma transição abrupta, mas sim uma redução gradual do tempo de injeção até a condição estequiométrica. Esta redução gradual é importante para a dinâmica do sistema, por que mantém a rotação estável até que a condição estequiométrica seja atingida. Se o integrador do PI não fosse zerado ocorreria uma redução abrupta no tempo de injeção, que causaria uma queda acentuada da rotação, o que consiste em uma nova perturbação para todo o sistema. Do mesmo modo, se o controlador PI de lambda fosse mantido em malha fechada durante a estratégia de enriquecimento, sua ação de controle cresceria negativamente devido à indicação de mistura rica do EGO. Neste caso, quando o ganho de enriquecimento chegasse a zero, a mistura estaria pobre, gerando uma tendência de queda e instabilidade na rotação. Portanto, conclui-se que a adoção de mistura rica durante a aplicação de carga no eixo do motor proporciona uma correção rápida da rotação até a região de controle, e garante sua estabilidade até que a condição estequiométrica seja gradualmente restabelecida.

4.2.5.2 Teste com sensor EGO e estratégia de enriquecimento desabilitada

Para mostrar a influência do enriquecimento da mistura durante a aplicação de carga no eixo do motor, o teste anterior foi repetido, mas com a estratégia de enriquecimento desabilitada. Todos os parâmetros foram mantidos iguais. A Figura 4-6 apresenta o resultado obtido.

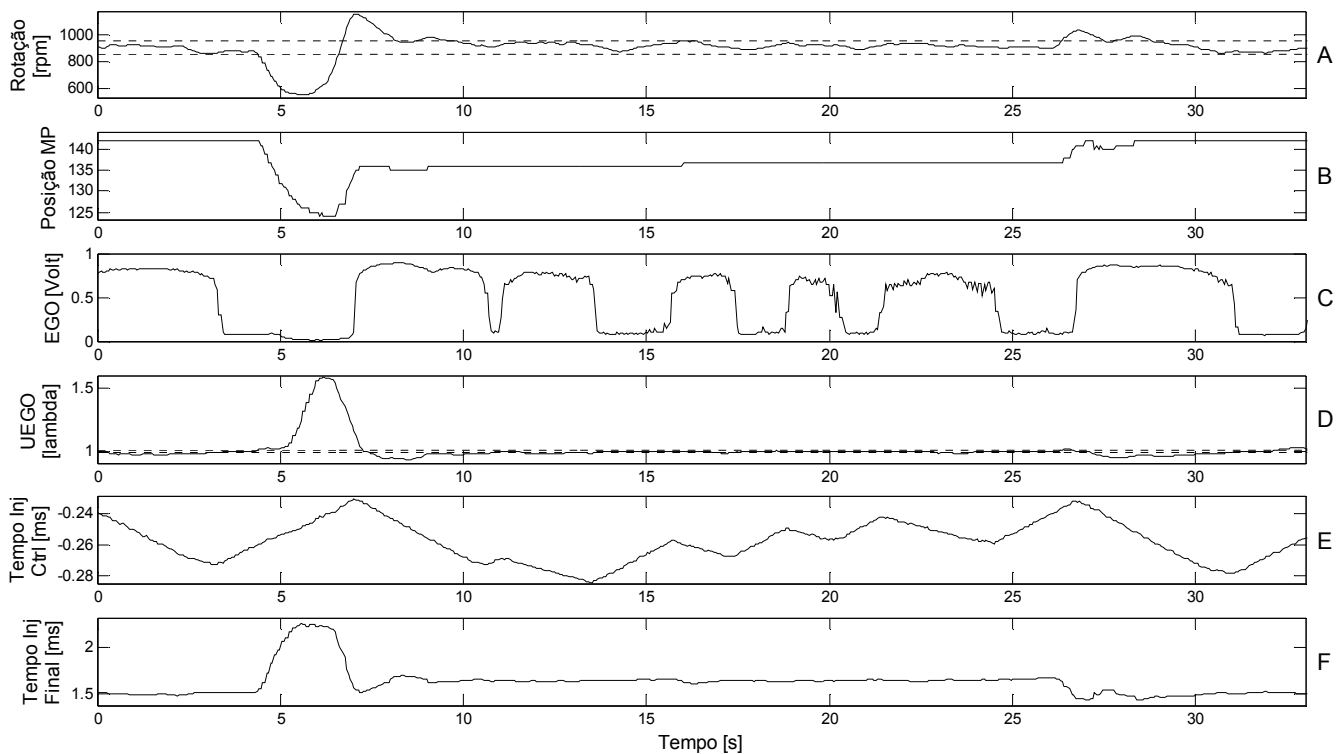


Figura 4-6 – Controle de marcha lenta e lambda em malha fechada com sensor EGO e estratégia de enriquecimento da mistura desabilitada.

Observa-se que a queda da rotação faz com que o controlador de marcha lenta aumente a vazão de ar, o que causa um pico de pressão no coletor, como foi visto na seção 3.3.7.3. Como a estratégia de enriquecimento está desabilitada, a mistura fica pobre, com o λ atingindo um valor superior a 1,5. Pode-se observar no gráfico F que a queda na rotação e a abertura do atuador de marcha lenta provocam o aumento no tempo de injeção através das ações diretas do controle. No entanto, este aumento não é suficiente para evitar o empobrecimento da mistura durante a ocorrência do pico de pressão no coletor. A mistura pobre dificulta a aceleração do motor e a rotação cai abaixo de 600 rpm. O controlador de marcha lenta continua aumentando a vazão de ar até que a rotação aumenta e entra novamente na região de controle após 3 segundos da aplicação da carga. Com o aumento da rotação a pressão no coletor diminui e a mistura se aproxima da condição estequiométrica. Antes de se estabilizar dentro da região de controle a rotação apresenta *overshoot* de aproximadamente 25%, causado pelo aumento exagerado da vazão de ar comandado pelo controlador de marcha lenta.

Na Figura 4-5, que mostra os resultados do teste com a estratégia de enriquecimento habilitada, a queda máxima na rotação durante a aplicação de carga no eixo é de aproximadamente 250 rpm, o tempo de retorno da rotação à região de controle é de 1 segundo e o *overshoot* é de 5%. O λ apresenta enriquecimento de 10% e leva aproximadamente 7 segundos para retornar à condição estequiométrica. Já na Figura 4-6, que mostra os resultados do teste com a estratégia desabilitada, a queda máxima na rotação é de aproximadamente 350 rpm, o tempo de retorno à região de controle é de 3 segundos e o *overshoot* é de 25%. O λ apresenta um empobrecimento acima de 50% e leva aproximadamente 3 segundos para retornar à condição estequiométrica. Estes dados permitem concluir que a estratégia de enriquecimento proporciona um melhor desempenho dinâmico para todo o sistema durante a aplicação de carga no eixo o motor. Com relação às emissões, a adoção da estratégia proporciona um desvio em relação à condição estequiométrica 5 vezes menor. Além disso, como foi visto na seção 2.3.1.8, a situação de enriquecimento da mistura para aceleração rápida é permitida pela legislação na medida em que é apenas temporária [5], [20].

4.2.5.3 Teste com sensor UEGO e estratégia de enriquecimento habilitada

O mesmo teste anterior foi realizado mais uma vez, porém utilizando o sensor UEGO para a medição do λ e mantendo a estratégia de enriquecimento habilitada. Todos os parâmetros foram mantidos iguais, exceto a tolerância de rotação, que foi reduzida para 40 rpm, e os ganhos do controlador PI de λ , que foram configurados para $K_p = 1,6$ e $K_i = 5,8$. Devido ao acoplamento entre as malhas de λ e rotação, foi necessário reduzir o ganho integral do controlador de λ para aumentar as margens de estabilidade, de forma que a tolerância na malha de rotação pudesse ser reduzida. Este ajuste no ganho integral foi realizado empiricamente, com a redução de 7,3 para 5,8, valor que possibilitou o comportamento estável do motor, mesmo

com a tolerância de rotação reduzida. A estratégia de enriquecimento da mistura foi habilitada. A Figura 4-7 mostra os resultados obtidos.

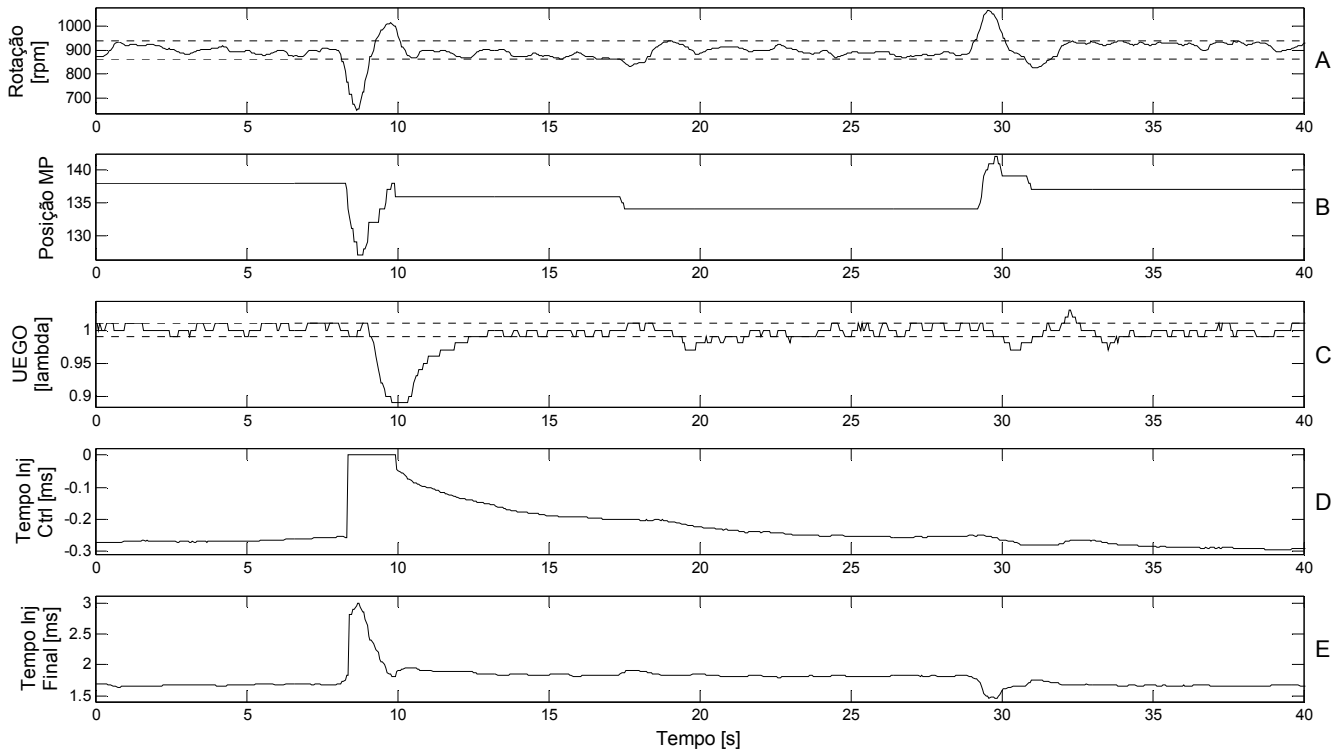


Figura 4-7 – Controle de marcha lenta e lambda em malha fechada com sensor UEGO e estratégia de enriquecimento da mistura habilitada.

De forma geral observa-se um comportamento semelhante ao do teste com o sensor EGO. O sistema encontra-se inicialmente em regime permanente, com o atuador de marcha lenta na posição 138 (gráfico B) e o tempo de injeção em torno de 1,7 ms (gráfico E). A aplicação da carga no instante igual a 8 segundos faz a rotação cair até aproximadamente 650 rpm (gráfico A). O controlador de marcha lenta aumenta rapidamente a vazão de ar no coletor (gráfico B), o que aciona a estratégia de enriquecimento da mistura ar/combustível, fazendo o tempo de injeção aumentar para aproximadamente 2,8 ms. Durante o enriquecimento, o controlador PI de lambda permanece desabilitado, gerando correção zero (gráfico D). O lambda atinge o pico de 11% de enriquecimento (gráfico C). O ganho aplicado no tempo de injeção leva aproximadamente 1,5 segundos para ser zerado, o que ocorre pouco antes do instante igual a 10 segundos. A partir deste momento o controlador PI de lambda atua novamente em malha fechada, e leva pouco mais de 2 segundos para corrigir a mistura de volta à condição estequiométrica. A rotação leva aproximadamente 1 segundo para retornar à região de controle, e em seguida atinge o pico de 5% de *overshoot* antes de se estabilizar. O motor se mantém em regime permanente até a redução da carga no eixo, no instante igual a aproximadamente 28 segundos, situação que é rejeitada pelo sistema de modo análogo ao apresentado na seção 4.2.4.

Pode-se perceber que a utilização do sensor UEGO ao invés do EGO proporciona vantagens para o sistema, o que já era esperado. Observa-se que a ausência de oscilação no lambda possibilita uma maior estabilidade na rotação, o que permitiu reduzir a tolerância de 50 para 40 rpm. Além disso, o controlador PI de lambda leva menos da metade do tempo para corrigir uma mistura com 10% de enriquecimento, já que o UEGO fornece a informação da magnitude do erro. O sistema como um todo apresenta menos oscilações e, portanto, possui um melhor desempenho.

4.3 Conclusões

Neste capítulo foram analisados os resultados obtidos durante os testes realizados com o sistema implementado. Os testes com o controle de lambda em regime permanente mostraram que as estratégias desenvolvidas são capazes de manter a mistura próxima da condição estequiométrica e rejeitar as perturbações decorrentes das variações entre ciclos. Como era esperado, a realimentação através do sensor EGO proporciona comportamento oscilatório do lambda, o que não ocorre quando se usa o UEGO. Foi mostrado que a oscilação do lambda em torno da condição estequiométrica influencia a rotação. Deste modo, a utilização do sensor UEGO proporciona um melhor desempenho tanto para o comportamento do lambda quanto para o da rotação. Os testes dinâmicos do controlador de lambda mostraram que as estratégias de ação direta de controle se combinam para minimizar os efeitos das perturbações medidas. A ação do controlador PI realimentado atua em paralelo corrigindo eventuais erros estacionários.

Nos testes com o sistema completo em malha fechada foi necessário reduzir os ganhos dos controladores devido à interação entre as malhas, o que já era esperado em decorrência da abordagem multimalhas adotada no projeto. Foi mostrado que a rotação apresenta uma variação intrínseca ao sistema, o que torna necessária a adoção da estratégia de tolerância em torno da referência de marcha lenta. Foi mostrado também que a estratégia de compensação da posição do motor de passo é fundamental para o bom desempenho do sistema diante das perturbações causadas pelo controlador de marcha lenta na malha de lambda. Do mesmo modo, foi mostrado que a estratégia de enriquecimento para aceleração proporciona um melhor desempenho do sistema diante das perturbações de aumento de carga no eixo do motor.

Os resultados permitem concluir que, mesmo diante de um sistema multivariável e complexo como o MCI, foi possível obter um desempenho satisfatório através de uma abordagem multimalhas aliada a estratégias auxiliares de desacoplamento e de minimização dos efeitos da interação entre as malhas.

Capítulo 5

Conclusão Final

O trabalho apresentado integra o que foi desenvolvido anteriormente em [15] e [17], de forma a gerar um sistema de controle de um MCI-ICE, composto por uma ECU, um sistema de identificação de detonação e uma interface com o usuário. Uma arquitetura de controle de injeção, ignição e rotação para um MCI-ICE na condição de marcha lenta foi desenvolvida e implementada. Os métodos de modelagem e controle utilizados são simples, sendo o foco do trabalho voltado para a estrutura do sistema, que deve ser flexível, tanto no nível do ajuste de parâmetros quanto na alteração das estratégias de controle implementadas.

Foram realizados testes com o motor em bancada, sendo utilizado o eletro-ventilador para variar a carga no eixo. Não foi possível realizar a calibração adequada dos mapas da ECU devido à indisponibilidade de uma sala dinamométrica. Esta limitação inviabilizou qualquer teste com o sistema de controle de ignição, por que este requer um mapa de avanço calibrado. No caso do mapa de injeção, adotou-se um procedimento de calibração simplificado que foi considerado satisfatório. Dentro das limitações, foi possível realizar testes com o sistema controlando a rotação e o lambda em paralelo, na condição de marcha lenta. O desempenho dinâmico das estratégias implementadas foi avaliado através da variação de carga no eixo do motor.

Os testes realizados mostraram que as dinâmicas de rotação e lambda constituem um sistema multivariável, o que gera acoplamento entre as malhas de controle. O controlador de marcha lenta atua sobre a vazão mássica de ar no coletor, o que influi diretamente no lambda que, por sua vez, afeta a rotação. Foi adotada uma abordagem multimalhas no projeto dos controladores, sendo a interação entre as malhas reduzida através de estratégias de desacoplamento estático, tolerância na referência de controle, e de redução da banda passante das malhas para aumentar as margens de estabilidade. Os testes mostraram também que o bom desempenho do controlador de rotação durante as acelerações requer mistura rica. Neste caso, foi implementada uma estratégia de enriquecimento da mistura durante a abertura rápida do atuador de marcha lenta.

Os resultados obtidos permitem concluir que o sistema desenvolvido é capaz de controlar a rotação do motor em torno da referência e ao mesmo tempo manter a mistura na condição estequiométrica, independente da variação de carga no eixo causada pelo acionamento do eletro-ventilador. A utilização do sensor EGO na realimentação do lambda proporciona o controle por ciclo limite, com oscilações constantes do lambda em torno da condição estequiométrica, o que era esperado. As variações do lambda se refletem na rotação, que oscila ligeiramente. Quando se

utiliza o sensor UEGO o lambda não apresenta característica oscilatória, e deste modo a rotação tende a variar menos em regime permanente. Durante os transitórios de carga no eixo do motor, o comportamento da rotação é praticamente o mesmo com ambos os sensores, no entanto, a utilização do UEGO proporciona melhor desempenho na correção do lambda.

Algumas questões devem ser consideradas com relação aos resultados obtidos. Primeiramente, o avanço de ignição não foi otimizado, sendo mantido constante em todos os testes. Esta limitação prejudica o desempenho do sistema, que não consegue obter do motor todo o torque que ele pode gerar. Deve ser considerado também que não foram realizadas análises de emissões de poluentes. O controle da mistura na região estequiométrica não garante que as emissões estejam dentro dos limites impostos pela legislação. Outra questão importante é o fato de as estratégias desenvolvidas estimarem a vazão mássica de ar no coletor usando apenas a posição da válvula borboleta. Este método é muito limitado porque não considera os efeitos de aspiração do motor e nem a passagem de ar pelo atuador de marcha lenta. Um método mais adequado consiste em fazer esta estimativa a partir da pressão no coletor de admissão, no entanto, seria necessário realizar calibração em dinamômetro, o que inviabilizou sua utilização. Do mesmo modo, a utilização do método *speed-density* requer a calibração da eficiência volumétrica do motor em cada ponto de operação, o que exige também o dinamômetro. Por fim, deve ser observado que os testes dinâmicos de variação de carga no eixo do motor foram baseados apenas no acionamento do eletro-ventilador. Não foi avaliado o desempenho do sistema de controle diante de outras cargas, como por exemplo, ar condicionado e direção hidráulica.

Durante a realização dos testes o sistema se mostrou robusto e confiável. A ECU foi capaz de obter as informações dos sensores e comandar os atuadores de forma adequada. A comunicação entre ECU e IHM também se apresentou robusta, garantindo a integridade dos dados e a visualização das variáveis em tempo real. A IHM foi de fundamental importância na aquisição de dados e na otimização das estratégias. A rede CAN implementada também apresentou o desempenho esperado, possibilitando o sincronismo e a troca de dados entre a ECU e o SID.

Como resultado final foi obtido um sistema de controle de um MCI-ICE na condição de marcha lenta. Os parâmetros e configurações do sistema podem ser facilmente ajustados através da IHM, que permite também a visualização em tempo real das variáveis do motor. Além disso, a estrutura modular utilizada no desenvolvimento permite que sejam adicionados novos mapas, tabelas, parâmetros, medições, e até mesmo novas estratégias de controle. Deste modo, pode-se considerar que o objetivo do trabalho foi alcançado.

5.1 Propostas de continuidade

O trabalho desenvolvido cria inúmeras possibilidades de pesquisas, sendo apresentadas algumas sugestões a seguir:

- Repetir os testes do presente trabalho com o sistema calibrado em dinamômetro e avaliar o ganho de desempenho.
- Alterar as estratégias de controle de forma a realizar a estimação da vazão mássica de ar no coletor de admissão através da medida de pressão no coletor.
- Implementar o método *speed-density* e avaliar seu desempenho.
- Estudar a influência do tempo de permanência de ignição (*dwel time*) e do ângulo de injeção no desempenho, consumo e emissões do motor e implementar estratégias de otimização.
- Melhorar o desempenho do controlador de marcha lenta utilizando o avanço de ignição para proporcionar uma resposta mais rápida de torque no motor.
- Avaliar o desempenho do sistema de controle diante da aplicação de outras cargas no eixo do motor, como por exemplo, ar-condicionado e direção hidráulica.
- Analisar a malha de controle de lambda realimentada com sensor EGO através do método da função descritiva.
- Desenvolver e implementar estratégias de posicionamento do atuador de marcha lenta para as situações na qual o motor não se encontra em marcha lenta.
- Desenvolver e implementar estratégias de partida a frio, aquecimento do motor, aceleração rápida e desaceleração.
- Desenvolver e implementar estratégia de controle de recirculação dos gases de exaustão (*Exhaust Gas Recirculation - EGR*).
- Reestruturar o hardware, retirando do DSP funções críticas de gerenciamento dos pulsos de injeção e ignição. Substituir o DSP utilizado por um mais moderno.
- Desenvolver circuitos de potência para outros tipos de atuadores, incluindo bicos injetores de baixa impedância, ignição por descarga capacitiva, *drive by wire* e válvulas de marcha lenta comandadas por PWM.
- Implementar circuitos condicionadores para diferentes tipos de sensores, de forma a tornar o hardware mais flexível.
- Realizar estudos de compatibilidade eletromagnética.
- Desenvolver dispositivos independentes (como o SID) que incluam em seu código o protocolo CAN desenvolvido, de forma a estabelecer uma rede com troca contínua de dados entre os dispositivos escravos e a ECU. Podem ser desenvolvidos, por exemplo: módulo de controle da borboleta eletrônica (*Drive by wire*), módulo de controle de tração, módulo de freio ABS, entre outros.
- Aprimorar as estratégias de controle desenvolvidas neste trabalho através de métodos modernos de modelagem e controle.
- Desenvolver trabalhos baseados em técnicas de controle adaptativo e robusto, controle multivariável e redes neuro-fuzzy, entre outros.

Apêndice A

Redes de dados veiculares

Nos últimos anos a eletrônica tem assumido cada vez mais funções no gerenciamento de um veículo. Com o baixo custo dos micro-controladores e o seu alto poder computacional, a tendência atual tem sido empregar o processamento digital sempre que possível como, por exemplo, nos módulos de controle do freio ABS²⁴, transmissão automática, borboleta eletrônica, controlador de tração, controlador de estabilidade, entre outros. Neste contexto, o melhor gerenciamento sobre os dados disponíveis em um veículo é conseguido através de ECUs distribuídas, cada qual responsável por uma parte do veículo, mas compartilhando informações entre si através de uma rede de dados.

A arquitetura distribuída permite reduzir o cabeamento do sistema, uma vez que as ECUs podem ser instaladas próximas aos seus respectivos sensores e atuadores. Deste modo é possível reduzir o tráfego de sinais de medição dos sensores e de sinais de comando para os atuadores, o que proporciona um ambiente com menor nível de ruídos. Além disso, pode-se usar sensores inteligentes, que realizam todo o processamento do sinal localmente e disponibilizam a informação para as ECUs através da rede. Com o menor cabeamento o sistema adquire maior robustez e atinge-se uma maior eficiência na manufatura do veículo. A arquitetura distribuída permite também uma modularização do sistema, facilitando as tarefas de manutenção, ampliação e desenvolvimento. Com funções e interfaces bem definidas, pode-se realizar tarefas de atualização e correção em um dos módulos de forma independente do resto do sistema.

A rede de dados ideal para um veículo comercial deve apresentar baixo custo, alto desempenho para transmissão de dados em tempo real, alta confiabilidade e imunidade eletromagnética, além de tratamento seguro de erros. Dentro destas exigências foi proposto, em 1980 por Robert Bosch, o modelo de rede CAN (*Controller Area Network*), que vem se tornando um padrão na indústria automobilística [19].

A.1 Introdução à rede CAN

O modelo de rede CAN consiste em uma tecnologia de comunicação serial que foi originalmente desenvolvida para indústria automotiva, mas se tornou popular também em outras áreas [38]. Uma rede CAN utiliza um protocolo síncrono, baseado no conceito de multi-mestre,

²⁴ ABS - *Antilock Braking Systems* – Dispositivo do sistema de freio que atua em malha fechada para evitar o travamento das rodas durante uma frenagem.

onde todos os nodos podem se tornar mestre em determinado momento e escravo em outro. Suas mensagens são enviadas em regime *multicast*, caracterizado pelo envio de toda e qualquer mensagem para todos os nodos existentes na rede [34]. É fundamentado no conceito CSMA/CD *with NDA* (*Carrier Sense Multiple Access / Collision Detection with Non-Destructive Arbitration*) [33]. Com base neste conceito, em uma rede CAN todos os nodos que desejam transmitir verificam o estado do barramento, analisando quem está enviando a mensagem com a maior prioridade. Ao perceber que ocorreu uma colisão, ou seja, a sua mensagem não tem a maior prioridade, o nodo cessa sua transmissão e se torna um receptor. Apenas o nodo com a mensagem de maior prioridade consegue transmiti-la até o final, sem ter que reiniciá-la, o que indica que a arbitragem é não destrutiva. A arbitragem é feita pela mensagem e não pelos nodos. Isso garante que mensagens vitais sejam enviadas em detrimento de mensagens não tão importantes [35].

Considerando o modelo de comunicação OSI (*Open Systems Interconnection*) de 7 camadas, definido pela norma ISO7498 (*International Standards Organization*) [34], as redes CAN automotivas implementam apenas as camadas física, de enlace de dados e de aplicação, respectivamente 1, 2 e 7 [35],[34],[19], como mostra a Figura A-1.

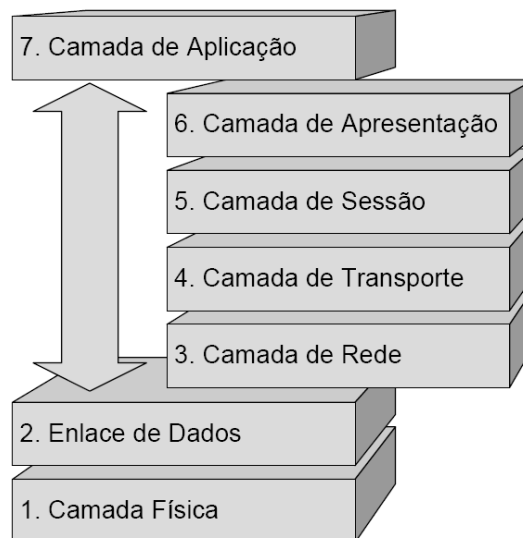


Figura A-1 – Modelo de comunicação OSI de 7 camadas [38].

Existem atualmente três padrões ISO que especificam as camadas física e de enlace de dados, tendo como principais diferenças a taxa de transferência de dados no barramento e o tamanho do campo de identificação, como mostra a Tabela A-1. A versão 2.0 A disponibiliza até 2048 identificadores diferentes, enquanto a versão 2.0 B tem capacidade para até 537 milhões [35].

Tabela A-1 – Padrões ISO para as camadas física e de enlace de dados [35].

Nomenclatura	Padrão	Taxa Máxima	Identificador
CAN baixa-velocidade	ISO 11519	125 Kbps	11 bits
Versão 2.0 A	ISO 11898 : 1993	1 Mbps	11 bits
Versão 2.0 B	ISO 11898 : 1995	1 Mbps	29 bits

Existem vários protocolos para a camada de aplicação como, por exemplo, CANopen, J1939, DeviceNet, SDS, CAN Kingdom, entre outros. O J1939 é mantido pela SAE (*Society of Automotive Engineers*) e tem como principal aplicação as redes de dados em veículos comerciais, tendo prevalecido neste mercado. O CANopen é mantido pela CiA (*CAN in Automation*), e tem como aplicação principal as redes de sensores, atuadores e controladores na indústria. No entanto, tem ganhado espaço em outras áreas, inclusive na automobilística [36].

A arquitetura típica de uma rede CAN embarcada é formada por um transceptor, um módulo controlador CAN e um micro-controlador ou DSP, como mostra a Figura A-2. O transceptor realiza a interface com o barramento, implementando os sinais de tensão adequados. O módulo controlador é responsável pelas funções da camada de enlace, realizando detecção e tratamento de erros, arbitragem, formação de mensagem, entre outras. Este módulo pode ser um componente independente ou um periférico interno de um DSP. Por fim, o protocolo da camada de aplicação é implementado em software que é executado em um micro-controlador ou DSP. Estas funções serão abordadas nas seções seguintes.

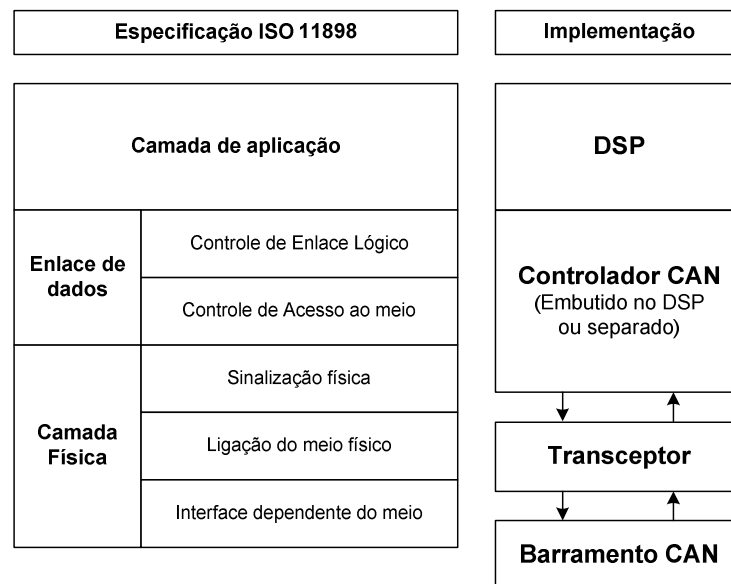


Figura A-2 – Arquitetura típica de uma rede CAN embarcada.

A.2 Camadas física e de enlace de dados

A.2.1 Barramento de dados

O barramento de comunicação da rede CAN se baseia em dois sinais: CAN High (CAN_H) e CAN Low (CAN_L). A transmissão é feita em modo diferencial, no qual avalia-se a diferença de tensão entre estes dois sinais. De acordo com a especificação os fios devem ser trançados, o que garante a robustez da rede em relação a ruídos, já que qualquer tensão induzida em um dos fios aparece também no outro, o que causa flutuação igual nos dois sinais. Como a transmissão é diferencial não ocorre prejuízo para a comunicação [34], [35].

A rede CAN trabalha com o conceito de dominância de bit, onde o bit dominante sempre sobrescreve o recessivo. O bit recessivo corresponde a nível lógico alto (1), enquanto o bit

dominante possui nível lógico baixo (0). A Figura A-3 mostra os níveis de tensão no barramento e a sua relação com os níveis lógicos [34]. A interface entre os níveis de tensão e os níveis lógicos é realizada pelo transceptor.

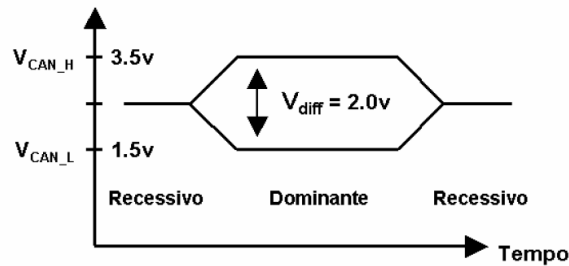


Figura A-3 – Níveis de tensão no barramento CAN e sua relação com os níveis lógicos.

Para gerar um bit dominante, o transceptor força o nível de tensão do sinal CAN_H para aproximadamente 3,5 volts e o do sinal CAN_L para aproximadamente 1,5 volts. Fica estabelecida uma diferença de potencial de aproximadamente 2 volts, que corresponde ao bit dominante. Quando os dois sinais apresentam tensão próxima a 2,5 volts a diferença medida é zero, o que corresponde a um bit recessivo [35].

A taxa de transmissão alcançada depende do comprimento do barramento. A maior taxa especificada é de 1Mbps em um barramento com 40 metros no máximo [34]. Com o aumento do barramento esta taxa cai proporcionalmente como mostra a Tabela A-2.

Tabela A-2 – Relação entre a taxa de transmissão e o comprimento do barramento [34].

Comprimento do Barramento [m]	Taxa de Transferência [Kbps]
30	1000
100	500
250	250
500	125
1000	62,5

A.2.2 Formato das mensagens

O formato das mensagens depende do padrão adotado para a rede, que pode ser baseado em um identificador de 11 bits no caso da mensagem normal, ou de 29 bits no caso da mensagem estendida, como foi mostrado na Tabela A-1. A Figura A-4 mostra a estrutura de uma mensagem nos dois casos. O início da mensagem é marcado pelo bit dominante SOF (*Start of Frame*). Em seguida aparece o identificador, que caracteriza a mensagem, especificando por exemplo, seu tipo, conteúdo e destinatário, de acordo com as camadas de alto nível. Além disso, o identificador determina a prioridade da mensagem, sendo que o menor valor possui a maior prioridade. Em seguida o bit RTR (*Remote Transmission Request*) indica se a mensagem está fazendo uma requisição de dados ao nodo especificado pelo identificador. O bit IDE (*Identifier Extension*) diferencia a mensagem normal da estendida. O campo DLC (*Data Length Code*) determina o número de bytes de dados na mensagem (de 0 até 8). O campo CRC (*Cyclic Redundancy Code*) contém 16 bits para detecção de erros. O campo ACK (*Acknowledge*) é usado por todo e qualquer

nodo para validar a mensagem se ela foi recebida corretamente. Ao perceber a validação o nodo transmissor sabe que a sua mensagem foi recebida com sucesso pelos outros nodos. O campo EOF (*End Of Frame*) possui 7 bits que indicam o final do quadro, através da violação intencional da regra do *bit stuffing*²⁵ [37].

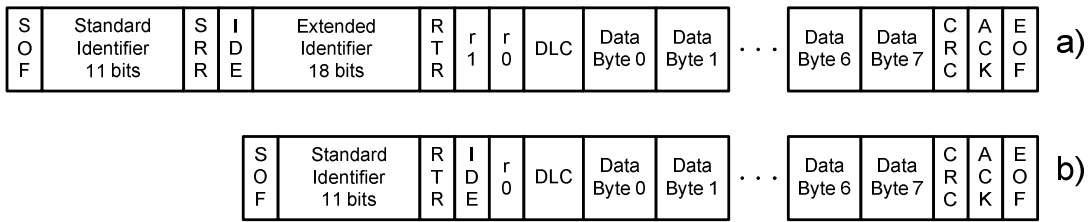


Figura A-4 – Estrutura da mensagem estendida (a) e normal (b) na rede CAN [37].

A.2.3 Detecção de erros

A rede CAN apresenta grande robustez e capacidade de se adaptar às condições de falha, tanto temporárias quanto permanentes. O esquema de detecção de erros apresenta dois níveis: nível de mensagem e nível de bit [34].

No nível de bit dois métodos são usados. No primeiro, avalia-se a consistência dos bits, verificando se o bit transmitido é igual ao bit lido após a escrita. A verificação é feita em toda a mensagem, exceto nos campos do identificador, onde ocorre o processo de arbitragem, e no de confirmação, onde é feita a validação da mensagem [35]. O segundo método consiste em verificar a regra do *bit-stuff*. Esta regra determina que após a transmissão de cinco bits consecutivos de mesmo valor, o transmissor deve inserir na mensagem um bit com valor complementar aos anteriores, chamado de *stuff bit*. Os nodos receptores sabem que devem ignorar este bit [34]. A checagem do *bit stuffing* não é feita no campo de EOF, onde esta regra é violada intencionalmente para indicar o fim do frame [37].

A detecção de erros no nível da mensagem utiliza três métodos. O primeiro consiste em verificar o valor de alguns bits delimitadores cujos valores são fixos e determinados pela especificação. O segundo método consiste no CRC, onde o transmissor usa um polinômio para calcular um valor de verificação (CRC) em função dos bits de dados. Os nodos receptores recalculam o CRC e verificam se o valor obtido é igual ao enviado na mensagem [33]. O último método consiste no transmissor verificar se o campo de ACK apresenta um bit dominante, indicando que algum nodo recebeu a mensagem sem erros. A falta desta validação indica que a mensagem foi corrompida, ou não há mais nenhum outro nodo na rede [34].

A detecção de qualquer uma das falhas citadas acima faz com que o nodo envie uma mensagem de erro no barramento. Esta mensagem de erro consiste em 6 bits de mesmo valor, o que causa erro de *bit stuffing* em todos os outros nodos. Deste modo todos os nodos sabem que um erro foi detectado e, portanto, o transmissor deve reenviar a mensagem.

²⁵ Será vista na seção A.2.3.

A.2.4 Interface de nível de enlace

As funções da camada de enlace são implementadas pelo módulo controlador CAN, o que inclui os métodos de detecção de erro, arbitragem do barramento e formatação das mensagens, já citados anteriormente. O controlador CAN também disponibiliza as funções de mais alto nível na camada de enlace, como filtros de mensagens, múltiplos buffers de transmissão e recepção, confinamento de erros, entre outras [35]. Os múltiplos buffers de transmissão permitem a adoção de diferentes níveis de prioridades para as mensagens, através de identificadores individuais. Os múltiplos buffers de recepção também disponibilizam identificadores individuais, que são usados para filtrar as mensagens desejadas. Com o auxílio de máscaras é possível filtrar uma faixa de identificadores, cujos dados serão disponibilizados para a camada de aplicação.

O confinamento de erros é outra funcionalidade implementada pelo controlador CAN. A estratégia se baseia em dois contadores de erros, um para transmissão (*Transmit Error Counter - TEC*) e outro para recepção (*Receive Error Counter - REC*). O nodo transmissor incrementa seu TEC de 8 unidades quando detecta um erro durante o envio de uma mensagem. Se nenhum erro é detectado o TEC é decrementado de 1 unidade. No caso de um nodo receptor o REC é incrementado ou decrementado de 1 unidade, de acordo com a ocorrência ou não de um erro [37]. Estes contadores determinam o estado do nodo no contexto da máquina de estados mostrada na Figura A-5.

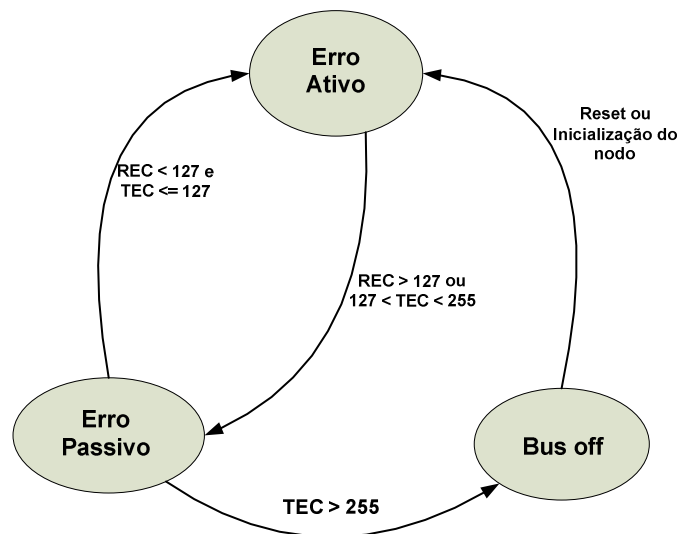


Figura A-5 – Máquina de estados de erro da rede CAN.

Qualquer nodo, ao detectar um erro, envia uma mensagem de erro com seis bits consecutivos de mesmo valor que violam a regra do *bit stuff*. Caso o nodo em questão esteja no estado de erro ativo, os seis bits consecutivos da mensagem de erro serão dominantes. Caso esteja no estado de erro passivo, os seis bits serão recessivos. Com esta estratégia, o nodo no estado ativo destrói qualquer mensagem do barramento ao detectar um erro. Já o nodo no estado passivo destrói apenas as mensagens enviadas por ele mesmo, enquanto as mensagens enviadas pelos outros nodos circulam normalmente. Assim, após detectar muitos erros e entrar no modo passivo, o nodo passa a

considerar que ele mesmo é a origem do erro, e neste caso, passa a destruir apenas a suas próprias mensagens, enquanto o restante da rede funciona normalmente. Caso continue a detectar erros, o nodo defeituoso pode entrar no modo *BusOff*, no qual ele fica desconectado do barramento até que seja aplicado um reset. Esta estratégia de confinamento de erros evita distúrbios persistentes eliminando os nodos defeituosos automaticamente, sem interferir em outros [39].

Como já foi dito, o controlador CAN pode ser um módulo periférico de um DSP, ou um componente separado, que se comunica com o controlador principal por alguma interface paralela ou serial. Toda a camada de enlace é executada pelo controlador CAN, ficando sob responsabilidade do DSP ou micro-controlador apenas as funções da camada de aplicação [35].

A.3 Camada de aplicação

Na seção anterior foram abordadas as camadas física e de enlace de dados, especificadas pelo padrão ISO11898, que garantem a troca de mensagens de no máximo 8 bytes, entre diferentes pontos conectados ao barramento CAN [34]. É necessária uma camada que faça o gerenciamento da comunicação, determinando conexões, endereços dos nodos, troca de blocos grandes de dados, entre outras funções. No modelo de rede OSI estas funcionalidades são implementadas pela camada de aplicação.

Como foi dito anteriormente, diversos protocolos de alto nível foram desenvolvidos para a camada de aplicação, com especificação aberta para o desenvolvimento de novos produtos. Entre eles, o CANopen é um protocolo muito difundido que proporciona uma grande flexibilidade na implementação, já que várias funcionalidades são opcionais [40]. Não é objetivo do presente trabalho implementar uma camada de aplicação completa, pois são necessárias apenas funcionalidades básicas, como determinação de uma arquitetura de rede, gerenciamento do estado dos nodos e estabelecimento de canais de comunicação. Deste modo, a estratégia adotada foi implementar uma camada de aplicação simplificada, baseada no CANopen, mas apenas com as funcionalidades necessárias. Apresenta-se nesta seção uma breve introdução ao CANopen, restrita aos aspectos relevantes ao trabalho.

A.3.1 Introdução ao CANopen

A estrutura de uma rede CANopen se baseia no modelo mestre – escravo, com capacidade para até 127 escravos. Um dos nodos tem a função de gerenciador da rede (NMT – *Network Management*), enquanto todos os outros são considerados escravos NMT. O mestre controla o estado dos escravos e realiza a checagem da consistência da rede. O modelo mestre – escravo é adotado apenas no gerenciamento da rede. Durante a troca de dados assume-se o modelo produtor – consumidor, onde os nodos produtores enviam seus pacotes de dados de acordo com algum evento, enquanto os nodos consumidores podem pegar os pacotes que desejarem. Esta estratégia é mais adequada à característica *multicast* do barramento CAN.

A.3.2 Modelo de dispositivo

Todo dispositivo CANopen deve ser baseado no modelo apresentado na Figura A-6. O protocolo é baseado no conceito de dicionário de objetos (OD - *Object Dictionary*), que atua como uma interface entre a aplicação e a comunicação em cada dispositivo [41]. O OD faz o mapeamento das variáveis, parâmetros e funções vistos através da rede, usando um esquema de endereçamento padrão onde cada objeto tem um índice de 16 bits. Para dados estruturados utiliza-se ainda um sub-índice de 8 bits para denotar o campo desejado. O espaço de endereçamento do índice é dividido em faixas, sendo algumas padronizadas com parâmetros de comunicação e outras específicas para cada aplicação [42]. A Figura A-7 mostra alguns exemplos de entradas padronizadas do dicionário de objetos.

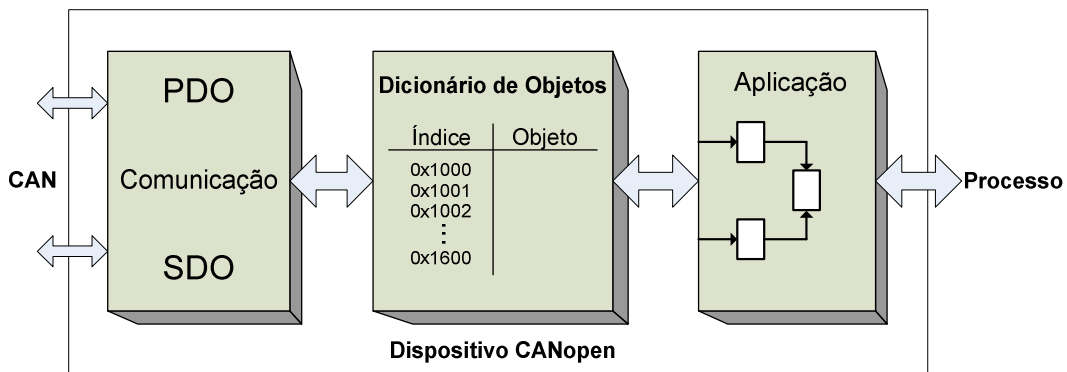


Figura A-6 – Modelo de dispositivo da rede CANopen [41].

Índice	Sub-índice	Tipo	Descrição
0x1000	0	UNSIGNED32	Informação do tipo de dispositivo
0x1001	0	UNSIGNED8	Código de erro
0x1017	0	UNSIGNED16	Intervalo de Heartbeat
0x1018			Identidade do Dispositivo
	0	UNSIGNED8	= 4 (número de sub-índices)
	1	UNSIGNED32	Identificador do fornecedor
	2	UNSIGNED32	Código do produto
	3	UNSIGNED32	Número de revisão
	4	UNSIGNED32	Número serial

Figura A-7 – Exemplo de entradas padronizadas do dicionário de objetos [42].

O protocolo CANopen disponibiliza dois tipos de objetos de comunicação principais: *Process Data Object* (PDO) e *Service Data Object* (SDO). O PDO caracteriza-se por mensagens de alta prioridade, enviadas em *multicast*, sem *overhead* (sobrecarga) de protocolo e com no máximo 8 bytes de dados. Além disso, não dispõe de nenhuma confirmação de recebimento de alto nível, apenas a validação do nível de enlace de dados citada anteriormente. Deste modo, o PDO é utilizado para troca de dados do processo em tempo real. Já o SDO caracteriza-se por mensagens de baixa prioridade, que acessam entradas do dicionário de objetos. Neste caso a comunicação é ponto a ponto, com serviço de confirmação de alto nível. O SDO é usado para configuração e diagnóstico dos dispositivos. Não é tão rápido quanto o PDO, mas proporciona flexibilidade para troca de blocos de dados de tamanhos variados [41].

O mapeamento das variáveis de processo para os PDOs é feito via dicionário de objetos, ou seja, cada PDO possui índices do OD nos quais são lidas as variáveis a serem enviadas. Estes índices usados pelos PDOs também estão mapeados no OD, de forma que o mapeamento pode ser alterado a qualquer momento através de um comando SDO. Portanto, os PDOs têm mapeamento variável, o que proporciona grande flexibilidade [40].

Outros objetos de comunicação também são disponibilizados pelo protocolo CANopen. Mensagens de gerenciamento da rede são enviadas através de objetos NMT (*Network Management Object*), enquanto o sincronismo dos PDOs pode ser realizado através de mensagens SYNC. O tipo do objeto de comunicação vem embutido no identificador da mensagem junto com o identificador do nodo, caso este seja aplicável, como mostra a Figura A-8. Os 7 bits de identificação do nodo restringem o número de escravos a 127. O código do objeto de comunicação determina se a mensagem corresponde a um PDO, SDO, SYNC, NMT ou EMCY (mensagens de emergência que são específicas para cada aplicação) [42].

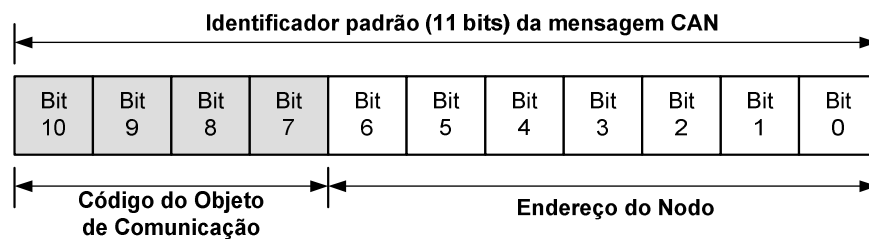


Figura A-8 – Estrutura do identificador da mensagem no protocolo CANopen.

A.3.3 Gerenciamento da rede

O mestre NMT controla o estado de todos os escravos da rede, que seguem uma máquina de estados de comunicação determinada pelo protocolo, mostrada na Figura A-9. Após a inicialização interna, todos os escravos passam automaticamente para o estado pré-operacional, sendo que nessa transição deve ser enviada uma mensagem de *boot-up* para o mestre, indicando que o nodo está disponível e esperando comandos. No estado pré-operacional os escravos são configurados pelo mestre através de mensagens SDO. A utilização de PDOs não é permitida neste estado. Após configurar os nodos o mestre determina a todos que entrem no modo operacional, onde todos os objetos de comunicação são ativos. Caso o mestre determine a um escravo que entre no modo parado, toda a comunicação via PDO e SDO fica interrompida [41].

Como foi dito anteriormente, o mestre NMT também tem a responsabilidade de checar a consistência da rede, que pode ser feita através do método do “nodo guardião” ou da pulsação (*heartbeat*). No primeiro caso, o mestre requisita a cada dispositivo o seu estado atual, periodicamente. Já no caso da pulsação, cada nodo envia um sinal de vida no barramento periodicamente, de forma que qualquer outro nodo pode checar o seu estado corrente [42].

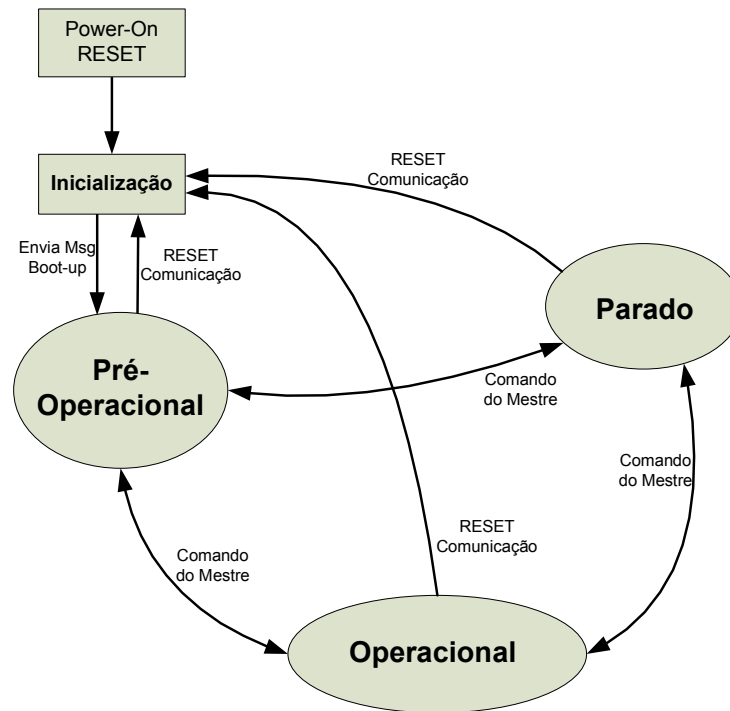


Figura A-9 – Máquina de estados de comunicação dos escravos em uma rede CANopen.

A transmissão dos PDOs pode ser causada por eventos ou por uma mensagem de sincronismo. No caso de eventos o PDO pode ser enviado de acordo com o período de um temporizador, ou sempre que os dados mudarem de valor, sendo que neste caso pode ser configurado um tempo de inibição para evitar que o barramento fique sobrecarregado. Já no segundo caso, o nodo somente envia o PDO quando detecta uma mensagem de sincronismo (SYNC) no barramento [40].

A.3.4 Perfis de dispositivo

Os perfis de dispositivo (*Device Profiles*) descrevem as funcionalidades de uma classe particular de dispositivos no contexto do padrão CANopen. Cada dispositivo deve disponibilizar as funcionalidades mínimas que são definidas para sua classe. Muitos perfis já estão disponíveis para diversas classes. O usuário deve saber se já existe uma classe para o dispositivo que está desenvolvendo. Se existe, a especificação correspondente deve ser utilizada. Na maioria dos casos a especificação define regras para a máquina de estados da aplicação, estrutura básica do OD e uma configuração padrão para os PDOs [40].

Referências Bibliográficas

- [1] ROBERT BOSCH GmbH, Catálogo de componentes 2001-2002. Linha de Injeção e Ignição Eletrônica. Junho 2001.
- [2] DENTON, T. *Automobile Electrical and Electronic System*. Second Edition. Arnold, Londres, 2000.
- [3] MILHOR, C. E. *Sistema de desenvolvimento para controle eletrônico dos motores de combustão interna do ciclo Otto*. Dissertação de mestrado 86p. – EESC/USP. São Carlos, SP. 2002.
- [4] PEREIRA, M. L. *Análise de Gases: Apostila técnica*. Centro de Desenvolvimento de Tecnologia Mecânica – CDTM. Belo Horizonte/MG. Treinamento Técnico Automotivo. 18p. 2001.
- [5] RIBBENS, W. B. *Understanding Automotive Electronics*, Fifth Edition, Butterworth-Heinemann Publishing Co., Woburn, 1998.
- [6] BALENOVIC, M. *Modeling and model-based control of a three-way catalytic converter*. Ph.D. thesis 179p. – Technische Universiteit Eindhoven. Eindhoven, 2002.
- [7] PERKOVIC, P. B. A. *Cylinder Individual Lambda Feedback Control in an SI Engine*. Master's thesis 86p. – Linköping University – Division of Vehicular Systems. Linköping, Sweden, 1996.
- [8] ALIPPI, C.; DE RUSSIS, C.; PIURI, V. *A Neural-Network Based Control Solution to Air-Fuel Ratio Control for Automotive Fuel-Injection Systems*. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics – part C: Applications and Reviews, vol. 33, N° 2, maio 2003.
- [9] WON, M.; CHOI, S. B.; HEDRICK, J. K. *Air to Fuel Ratio Control of a Spark Ignition Engines Using Gaussian Network Sliding Control*. IEEE Transactions on Control Systems Technology, vol. 6, N° 5, setembro 1998.
- [10] VISSER, J. H.; SOLTIS, R. E. *Automotive Exhaust Gas Sensing Systems*. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol 50, N°6, dezembro 2001.
- [11] BRANDT, E. P.; WANG, Y.; GRIZZLE, J. W. *Dynamic Modeling of a Three-Way Catalyst for SI Engine Exhaust Emission Control*. IEEE Transactions on Control Systems Technology, vol. 8, N° 5, setembro 2000.

- [12] NAM, S. K.; CHANG, M. J.; KANG, D. H. *Fuzzy Sliding Control for Low Emission Automotive Engines*. IEEE International Symposium on Industrial Electronics - ISIE 2001, vol. 2, p. 1237-1243.
- [13] JONES, V. K.; AULT, B. A.; FRANKLIN, G. F.; POWELL, J. D. *Identification and Air-Fuel Ratio Control of a Spark Ignition Engine*. IEEE Transactions on Control Systems Technology, vol. 3, N° 1, março 1995.
- [14] WAGNER, J. R.; DAWSON, D. M.; ZEYU, L. *Nonlinear Air-to-Fuel Ratio and Engine Speed Control for Hybrid Vehicles*. IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol 52, N° 1, janeiro 2003.
- [15] 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 148p. Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica - UFMG. Belo Horizonte, MG. 2005.
- [16] DORF, R. C., BISHOP, R. H. *Sistemas de controle modernos*. 8ª Edição. Tradução: Bernardo Severo da Silva Filho, LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., Rio de Janeiro, RJ, 1998.
- [17] BRAGA, G. T. *Desenvolvimento e implementação de um sistema de identificação de detonação em motores de combustão interna de ignição por centelha*. Monografia de Projeto Final de Curso, 83p., Engenharia de Controle e Automação - UFMG. Belo Horizonte - MG. 2004.
- [18] MANGERUCA, L.; FERRARI, A.; VINCENELLI, A. S.; PIERANTONI, A.; PENESSE, M. *System Level Design of Embedded Controllers: Knock Detection, a Case Study in the Automotive Domain*. IEEE Proceedings of the Design, Automation and Test in Europe Conference and Exhibition (DATE'03), 2003, pp. 232-237.
- [19] ADLER, U.; BAUER, H.; RÖDER, J. *Automotive Handbook*, 3rd Edition. Robert Bosch GmbH - Automotive Equipment Business Sector, Department for Technical Information (KH/VDT). Stuttgart, 1993.
- [20] ADLER, U. *Automotive Electric/Electronic Systems*, 1st Edition. Robert Bosch GmbH - Automotive Equipment Product Group. Stuttgart, 1988.
- [21] BOHACZ, R. T. *The Causes of Internal Engine Knock, and How to Eliminate it*. Artigo publicado no site: <http://www.mk3ukr-supra.com/Tech%20Info.htm>, fevereiro 2006.
- [22] SINNERSTAD, K. *Knock Intensity and Torque Control on an SVC Engine*. Master's thesis 80p. – Linköping University – Division of Vehicular Systems. Linköping, Sweden, 2003.

- [23] HERMAN, P.; FRANCKEK, M. *Engine Idle Speed Control Using Actuator Saturation*. IEEE Transactions on Control Systems Technology, vol. 8, N° 1, janeiro 2000.
- [24] YING, H.; FUJUN, Z.; FUSHUI, L.; YUSHAN G.; YEBAO, S. *Gasoline Engine Idle Speed Control System Development Based on PID Algorithm*. IEEE International Vehicle Electronics Conference – IVEC 1999, vol. 1, p. 30 – 33.
- [25] 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*. Dissertação de Mestrado 155p. CEFET-MG. Belo Horizonte, MG. 2001.
- [26] MILLS, J. S. *Multivariable Control of Engine Idle Speed*. SAE 970611, 1997.
- [27] GANGOPADHYAY, A.; MECKEL, P. *Multivariable PI Tuning and Application to Engine Idle Speed Control*. IEEE Proceedings of the American Control Conference 1999, vol. 4, p. 2678-2682.
- [28] MoTeC M400/M600/M800/M880 User's Manual, Novembro 2003.
- [29] MoTeC M4/M48 & M8 User's Manual, Junho 2003.
- [30] DIAO, Y.; PASSINO, K. M. *Adaptive Neural/Fuzzy Control for Interpolated Nonlinear Systems*. IEE Transactions on Fuzzy Systems, vol. 10, N° 5, outubro 2002.
- [31] HOU, Z.; SEN, Q.; WU, Y. *Air Fuel Ratio Identification of Gasoline Engine during Transient Conditions Based on Elma Neural Networks*. IEEE Sixth International Conference on Intelligent Systems Design and Applications – ISDA 2006, p. 32-36.
- [32] WEIGE, Z.; JIUCHUM, J.; YUAN, X.; XIDE, Z. *CNG Engine Air-Fuel Ratio Control using Fuzzy Neural Networks*. IEEE The 2nd International Workshop on Autonomous Decentralized System 2002, pp. 156-161.
- [33] TANENBAUM, A. S. *Redes de Computadores*, tradução da terceira edição, editora Campus, 1997.
- [34] GUIMARAES, A. A. *O Barramento Controller Area Network: Conceituação*. Artigo publicado no site: www.pcs.usp.br/~laa/Grupos/EEM/publicados.htm, fevereiro 2007.
- [35] BARBOSA, L. R. G. *Rede CAN*. Escola de Engenharia da UFMG. Belo Horizonte, 2003.
- [36] FELBINGER, L.; SCHAAL, H. W. *CAN and open protocols in commercial vehicles*. CAN Newsletter, março 2003.
- [37] TEXAS INSTRUMENTS, *TMS320LF/LC240xA DSP Controllers Reference Guide – System and Peripherals*. Literature Number: SPRU357C. Revised May 2006.
- [38] VOSS, W. *CANopen – Higher Layer Protocol Based on Controller Area Network (CAN) Supports Device Profiles for I/O Modules, Motion Control*. esd electronics, Inc., Hatfield,

- MA. Artigo publicado no site: www.canstarterkit.com/PDF/CANopenDeviceProfiles.pdf, outubro 2006.
- [39] HUBERT, M. K. *O protocolo CAN como solução para aplicações distribuídas, baseadas em objetos, entre PCs e microcontroladores*. Projeto de Diplomação, 58p. Universidade Federal de Pelotas. Pelotas, janeiro 2001.
- [40] VECTOR INFORMATIK GmbH. *Getting Started With CANopen*. Version 1.01. Application Note AN-ION-1-1102. 2003.
- [41] VECTOR INFORMATIK GmbH. *Introduction To The CANopen Protocol*. Version 1.1. Application Note AN-ION-1-1100. 2003.
- [42] PFEIFFER, O. *An Introduction to CANopen using CANopen Magic ProDS Eval*. Embedded Systems Academy. Material publicado no site: www.esacademy.com, Julho 2005.
- [43] HEYWOOD, J. B. *Internal Combustion Engine Fundamentals*, McGraw-Hill Publishing Co., New York, 1998.
- [44] VAN BASSHUYSEN, R.; SCHAFER, F. *Internal Combustion Engine Handbook: Basics, Components, Systems and Perspectives*. SAE International, Warrendale, USA, 2004.
- [45] STOTSKY, A.; EGARDT, B.; ERIKSSON, S. *Variable Structure Control of Engine Idle Speed with Estimation of Unmeasurable Disturbances*. IEEE Proceedings of the 38th Conference on Decision & Control. Dezembro 1999.
- [46] SCILLIERI, J. J.; BUCKLAND, J. H.; FREUDENBERG, J. S. *Reference Feedforward in the Idle Speed Control of a Direct-Injection Spark-Ignition Engine*. IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol 54, N° 1, janeiro 2005.
- [47] SEBORG, D. E.; EDGAR, T. F.; MELLICHAMP, D. A. *Process Dynamics and Control*, First Edition. John Wiley & Sons Inc, 1989.
- [48] CLARKE, D. W. *PID Algorithms and their Computer Implementation*. Transactions of the Institute of Measurement and Control, vol. 6, N° 6, 1984.
- [49] wxWidgets. <http://www.wxwidgets.org>, agosto 2005.
- [50] DOEBELIN, E. O. *Measurement Systems: Application and Design*, 4th Edition. McGraw-Hill Publishing Co, 1990.
- [51] PHILLIPS, C. L.; NAGLE, H. T. *Digital Control System Analysis and Design*, Third Edition. Prentice Hall, 1995.

- [52] MIANZO, L.; HASKARA, I. *Transient air-fuel ratio H_∞ preview control of a drive-by-wire internal combustion engine*, IEEE Proceedings of the American Control Conference 2001. Vol. 4, p. 2867-2871.
- [53] STEWART, P.; FLEMING, P. J. *Drive-by-Wire control of automotive driveline oscillations by response surface methodology*. IEEE Transactions on Control Systems Technology, vol. 12, p. 737-741, Setembro 2004.
- [54] GIBSON, A.; KOLMANOVSKY, I.; HROVAT, D. *Application of disturbance observers to automotive engine idle speed control for fuel economy improvement*. IEEE American Control Conference, Junho 2006.
- [55] BOHME, T.; KURDI, O. *Tuning of an PID Based Idle Speed Controller for Heavy Load Rejection using a Model-Based Optimization Methodology*. IEEE International Symposium on Intelligent Control 2006, p. 2665-2670.
- [56] NAGASHIMA, M.; LEVINE, W. S. *Development of an engine idle speed and emission controller*. IEEE American Control Conference, Junho 2006.
- [57] The MathWorks. <http://www.mathworks.com/products/matlab>, março 2007.
- [58] OGATA, K. *Engenharia do controle moderno*, 2ª ed. Prentice Hall do Brasil, São Paulo, 1993.
- [59] STEFANOPOULOU, A. G.; BUTTS, K. R.; COOK, J. A.; FREUDENBERG, J. S.; GRIZZLE, J. W. *Consequences of Modular Controller Development for Automotive Powertrains: A Case Study*. IEEE Conference on Decision and Control 1995, vol. 1, p. 768 – 773, Dezembro 1995.
- [60] STEFANOPOULOU, A. G.; FREUDENBERG, J. S.; GRIZZLE, J. W. *Variable Camshaft Timing Engine Control*. IEEE Transactions on Control System Technology, vol. 8, No. 2, p. 23-34, Janeiro 2000.