



UFSM

Dissertação de Mestrado

**CONTROLADOR NEBULOSO PARA MOTOR DE
IGNIÇÃO POR COMPRESSÃO OPERANDO COM GÁS
NATURAL E ÓLEO DIESEL**

Diego Berlezi Ramos

PPGEE

Santa Maria, RS, Brasil

2006

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**CONTROLADOR NEBULOSO PARA MOTOR DE
IGNIÇÃO POR COMPRESSÃO OPERANDO COM
GÁS NATURAL E ÓLEO DIESEL**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Diego Berlezi Ramos

Santa Maria, RS, Brasil

2006

**CONTROLADOR NEBULOSO PARA MOTOR DE IGNIÇÃO
POR COMPRESSÃO OPERANDO COM GÁS NATURAL E
ÓLEO DIESEL**

por

Diego Berlezi Ramos

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Área de Concentração em Processamento de Energia, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de

Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Felix Alberto Farret, PhD.

Santa Maria, RS, Brasil

2006

© 2006

Todos os direitos autorais reservados a Diego Berlezi Ramos. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita com autorização por escrito do autor.

Endereço: Est. Mun. Angelo Berleze, n. 320, Bairro São José, Santa Maria, RS, 97095-640
Fone (0xx)55 32264509; End. Eletr: dberlezi@mail.ufsm.br

**Universidade Federal de Santa Maria
Centro de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada,
aprova a Dissertação de Mestrado

**CONTROLADOR NEBULOSO PARA MOTOR DE IGNIÇÃO POR
COMPRESSÃO OPERANDO COM GÁS NATURAL E ÓLEO DIESEL**

elaborada por
Diego Berlezi Ramos

como requisito parcial para obtenção do grau de
Mestre em Engenharia Elétrica

COMISSÃO EXAMINADORA:

Felix Alberto Farret, PhD.
(Presidente/Orientador)

Alzenira R. Abaide, Dra. (UFSM)

Jonas Rodrigues Gomes, Dr. CGTEE/ELETROBRÁS

Ricardo Quadros Machado, Dr. (UFSM)

Santa Maria, 24 de fevereiro de 2006.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, creio que é fundamental agradecer a Deus. Não por apenas ter proporcionado as condições suficientes para a conclusão deste trabalho, mas também por ter criado um mundo tão especial, sobre o qual somos extremamente curiosos e estamos sempre procurando respostas para as mais diversas questões. Sejam elas científicas ou espirituais...

Tenho muita gratidão para com meus pais, Pedro e Tânia e também com minha noiva, Clarissa, pois sempre me presentearam com muita paciência e apoio.

Ao meu orientador, o Professor Felix Farret, muito obrigado pela a atenção e dedicação dispensadas ao longo da realização deste trabalho.

Ao Professor Miguel Neves Camargo que foi o real responsável pela centelha inicial deste trabalho. O meu reconhecimento como excelente profissional da área da Engenharia Mecânica, colega de trabalho e, mais que tudo, uma grande amizade.

Aos colegas e amigos que não mencionei diretamente aqui, mas não menos importantes, obrigado pelo apoio.

RESUMO

Dissertação de Mestrado
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
Universidade Federal de Santa Maria

CONTROLADOR NEBULOSO PARA MOTOR DE IGNIÇÃO POR COMPRESSÃO OPERANDO COM GÁS NATURAL E ÓLEO DIESEL

AUTOR: DIEGO BERLEZI RAMOS

ORIENTADOR: FELIX ALBERTO FARRET, PhD.

Data e Local da Defesa: Santa Maria, 24 de fevereiro de 2006.

Uma previsível escassez de petróleo, aliada a uma crescente consciência ecológica, tem levado pesquisadores a procurar fontes alternativas de energia e processos de combustão mais eficientes e menos poluentes. Entre os combustíveis pouco poluentes este trabalho aborda o uso do gás natural, cujo consumo tem aumentado ano a ano. É sabido que os motores de combustão interna convertem energia com baixa eficiência. Com base nisto, este trabalho avalia um motor Diesel, bi-combustível, movido a Diesel e gás natural como forma de encontrar meios de melhorar sua eficiência. No motor usado como protótipo, nessa dissertação a energia origina-se da combustão do gás natural. Sendo o gás o combustível principal, o Diesel presta-se apenas à geração da chama piloto para o processo de combustão. Assim, substitui-se parcialmente o óleo Diesel por gás natural, aumentando o rendimento da combustão. Inicialmente procurou-se estudar o uso do gás natural em motores Diesel através de uma revisão bibliográfica. Em seguida, determinaram-se quais os parâmetros que seriam monitorados a fim de se desenvolver um controlador adequado. Verificou-se que deveriam ser avaliados a rotação do motor e o ângulo de injeção. A performance almejada para a ação da malha de controle deve ser a rotação do motor. Investigaram-se as técnicas de controle mais apropriadas para o gerenciamento da injeção de gás natural. Ao se analisarem as técnicas tradicionais observou-se que estas apresentam algumas desvantagens como a complexidade matemática, limitações na faixa de atuação do controlador, dificuldades de adaptação às condições do motor sempre variáveis com o tempo/temperatura e complicações para implementação prática por parte de operadores não-especializados. Para otimizar o volume de gás natural fornecido ao motor foi desenvolvido um gerenciador eletrônico para injeção deste combustível. Este controlador eletrônico baseia-se em um algoritmo nebuloso para regular a taxa de injeção de combustível implementado através de um microcontrolador. O sistema de injeção eletrônica controla o tempo de injeção do combustível, gerenciando assim o volume de gás fornecido a cada ciclo de injeção. O ângulo de injeção, também monitorado com precisão pelo sistema, é sincronizado com o eixo de comando de válvulas e, tomando-se como referência de posição angular o ponto morto superior do primeiro cilindro. Com poucas alterações, esta topologia, pode ser usada em qualquer motor Diesel que opere no regime bi-combustível. Os resultados desta dissertação devem contribuir para o aumento da eficiência do motor bem como redução do consumo de combustível e emissão de poluentes.

Palavras-chave: Motor bi-combustível, Motor Diesel; Gás natural, controle fuzzy, injeção eletrônica.

ABSTRACT

Dissertação de Mestrado
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
Universidade Federal de Santa Maria

CONTROLADOR NEBULOSO PARA MOTOR DE IGNIÇÃO POR COMPRESSÃO OPERANDO COM GÁS NATURAL E ÓLEO DIESEL

AUTOR: DIEGO BERLEZI RAMOS

ORIENTADOR: FELIX ALBERTO FARRET, PHD.

Data e Local da Defesa: Santa Maria, 24 de fevereiro de 2006.

A foreseeable shortage of petroleum, associated to a growing ecological conscience, demand for alternative sources of energy and more efficient and less pollutant combustion processes. Among the few pollutant fuels this work approaches the combination of natural gas, whose consumption has been increasing year to year, and diesel. It is known that the internal combustion engines convert energy with low efficiency. Based on that, this work evaluates a bi-fuel Diesel engine, power by Diesel and natural gas as means of improving its efficiency. In the engine used as a prototype, the main energy comes from the combustion of natural gas. Being the gas the main fuel, the Diesel is used only to generate the pilot explosion for the combustion process. In this way, the diesel oil is partially substituted by natural gas, increasing the combustion efficiency. Initially it was made a study on the use of the natural gas in Diesel engine through a bibliographical revision. Therefore after, they were certain the parameters that should be monitored to develop an appropriate controller. It was verified that should be appraised the engine rotation and the injection angle. The performance aimed for the action of the loop control should be the rotation of the engine. The more appropriate control techniques were investigated for the management of the natural gas injection. When analyzing the traditional techniques it observed that they present some disadvantages as the mathematical complexity, difficulties in adapt the motor to the ever-changing conditions of the motor with time/temperature, limitations in the grade of controller performance and complications for practical implementation on the part of non-specialized operators. To optimize the volume of natural gas supplied to the engine an electronic manager was developed for injection of this fuel. This electronic controller is based on an adaptive fuzzy algorithm to regulate the rate of injection of fuel, which was implemented through a microcontroller. The electronic injection system controls the timing of fuel injection, so managing the volume of gas supplied to each injection cycle. The injection angle is also accurately monitored by the control system. This topology, with few alterations, can be used in any Diesel engine operating in the bi-fuel mode. Results of this dissertation should contribute to increase the efficiency of Diesel engine as well as reduce the consumption of fuel and emission of pollutants.

Keywords: bi-fuel Engine, Diesel engine; Natural gas, fuzzy control, electronic injection.

SUMÁRIO

RESUMO	vi
ABSTRACT	vii
SUMÁRIO	viii
LISTA DE FIGURAS	xi
LISTA DE QUADROS	xiii
ABREVIATURAS E SIGLAS	xiv
1 INTRODUÇÃO	01
1.1 Considerações iniciais	01
1.2 Justificativa	02
1.3 Definição do problema	03
1.4 Objetivos	03
1.4.1 Objetivo geral	03
1.4.2 Objetivos específicos.....	03
1.5 Metodologia	04
1.6 Organização do trabalho	04
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	06
2.1 Introdução	06
2.2 Motores Diesel usando o GN	06
2.3 Controle e modelagem de motores Diesel	10
2.4 Controladores modernos para motores Diesel	12
2.5 Seleção do tipo de controle	13
2.6 Resumo deste capítulo	15
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
3.1 Introdução	16
3.2 Motores de combustão interna (MCI): Princípios e definições	16
3.2.1 Generalidades	16
3.2.2 Definições.....	17
3.3 Conceitos	19

3.3.1 Relação estequiométrica (ou Relação Ar/Combustível ou relação lambda (λ)).....	19
3.3.2 Número de octanas (N.O.).....	20
3.3.3 Índice de cetanos	20
3.4 Motores Diesel	21
3.4.1 Aspectos gerais dos motores Diesel	24
3.5 Controle da dosagem de combustível para motores Diesel	27
3.6 Lógica nebulosa (ou lógica fuzzy)	29
3.6.1 Conjuntos nebulosos.....	30
3.6.2 Controladores nebulosos baseados em regras	31
3.7 O controlador de Mamdani – descrição e projeto	35
3.8 Resumo deste capítulo	38
4 MATERIAIS E MÉTODOS	39
4.1 Introdução	39
4.2 Estrutura do controlador e caracterização da planta	39
4.3 Desenvolvimento do protótipo	47
4.3.1 Sensores	47
4.3.2 Atuador	50
4.3.3 Potenciômetro do acelerador	51
4.3.4 CPU	51
4.3.5 Interface para o circuito de potência.....	52
4.3.6 Interface para a comunicação serial.....	52
4.3.7 Esquemas elétricos do controlador	52
4.3.8 Componentes do circuito de alimentação de gás.....	54
4.4 Descrição dos programas desenvolvidos	55
4.4.1 Código-fonte do controlador	55
4.4.2 Programa para comunicação serial.....	57
4.5 Resumo deste capítulo	59
5 RESULTADOS EXPERIMENTAIS	60
5.1 Introdução	60
5.2 Ensaio com o sensor indutivo e a roda fônica	60
5.3 Ensaio com o bico injetor	62
5.3.1 Ensaio de acionamento do injetor.....	62
5.3.2 Ensaio de vazão do injetor	62

5.4 Ensaios em malha aberta com o controlador	66
5.5 Ensaios com o motor Agrale	70
5.5.1. Ensaio do motor com combustível Diesel	70
5.5.2 Ensaios com gás natural	70
5.6 Observações finais e avaliação dos resultados	72
5.6.1 Ensaios com os sensores.....	72
5.6.2 Ensaios com o atuador.....	72
5.6.3 Ensaios em malha aberta	72
5.6.4 Ensaios com o motor Agrale	73
5.7 Resumo deste capítulo	74
6 CONCLUSÕES	75
6.1 Principais contribuições desta dissertação	76
6.2 Sugestões para prosseguimento desta dissertação	76
BIBLIOGRAFIA	78
APÊNDICE A – FLUXOGRAMAS	82
APÊNDICE B – ESQUEMAS ELÉTRICOS	102

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Características nominais do motor	09
Figura 2.2 – Curvas de consumo específico para 21° de ângulo de avanço da injeção e 22% de Diesel	09
Figura 2.3 – Curvas de torque para 21° de ângulo de avanço da injeção e 30% de Diesel	09
Figura 3.1 – Geometria básica do cilindro de um motor de combustão interna.....	22
Figura 3.2 – Ciclo de 4 tempos.....	22
Figura 3.3 – Ciclo Diesel teórico em coordenadas (a) p-v e (b) T-S.....	23
Figura 3.4 – Funções de pertinência da variável Rotação (N).....	31
Figura 3.5 – Estrutura geral do controlador nebuloso	32
Figura 3.6 – Conjuntos nebulosos mais comuns em aplicações de engenharia	35
Figura 4.1 – Motor utilizado nos experimentos.....	40
Figura 4.2 – Esquema elementar do atuador eletromagnético.....	41
Figura 4.3 – Mapa do controle ON/OFF+Nebuloso.....	42
Figura 4.4 – Funções de pertinência para (a) E , (b) DE e (c) Tempo de injeção.....	44
Figura 3.5 – Gráfico em 3D do bloco de regras do quadro 3.3	45
Figura 4.6 – (a) Sensor de Rotação Indutivo e (b) Detalhe da montagem do grupo sensor/corôa.....	48
Figura 4.7 – Medição da largura de pulsos.....	49
Figura 4.8 – Montagem do conjunto sensor/roda fônica no motor Agrale.....	49
Figura 4.9 – (a) Foto em corte de uma válvula injetora (b) detalhes dos componentes do injetor.....	50
Figura 4.9 – Injetor instalado na admissão do motor Agrale.....	51
Figura 4.10 – (a) Conexões da CPU, (b) entrada do sensor de rotação, (c) interface de potência.....	53
Figura 4.11 – Válvula redutora/reguladora de pressão usada para baixar e regular a pressão do gás natural.....	54
Figura 4.12 – Fluxograma principal do controlador.....	55
Figura 4.13 – Fluxograma-base para o programa desenvolvido	56
Figura 4.14 – Subrotinas de tomada de decisão de controle	57
Figura 4.15 – Interface de usuário para aquisição dos dados do controlador de injeção	58

Figura 5.1 – Sinal do sensor de rotação com ocorrência de excentricidade.....	61
Figura 5.2 – Sinal do sensor de rotação após o tratamento do sinal.....	61
Figura 5.3 – (a) Ensaio de abertura e fechamento (b) Detalhe do pulso de acionamento	62
Figura 5.4 – Tubo não inflado com a tampa rígida	64
Figura 5.5 – Tubo inflado com gás, sendo medido, durante um teste de verificação de vazão do injetor.....	64
Figura 5.6 – Resultados dos ensaios de vazão para o bico injetor.....	66
Figura 5.7 – Simulação da ação de controle de aceleração do motor com ângulo de 21°.....	67
Figura 5.8 – Simulação da ação de controle de desaceleração do motor com ângulo de 21°.	68
Figura 5.9 – Variações da referência para o motor simulado com rotação constante	69
Figura 5.10 – Ação de controle nebulosa para as variações de referência apresentadas na figura 5.9.....	69
Figura 5.11 – Operação do motor com combustível Diesel	70
Figura 5.12 – Faixa de respostas do motor.....	71
Figura 5.13 – Tempos de injeção corrigidos pelo controlador ON/OFF+nebuloso	71

LISTA DE QUADROS

Quadro 3.1 – Nomenclaturas e definições de termos relacionados à MCI.....	18
Quadro 4.1 – Características técnicas do motor usado nos experimentos.....	40
Quadro 4.2 – Valores limites usados como referência	43
Quadro 4.2 – Bloco de regras para controlador.....	45
Quadro 5.1 – Exemplo de cálculo das larguras de pulso de injeção	63

ABREVIATURAS E SIGLAS

- α_i – Ângulo de injeção
- BDC – Bottom Dead Center
- CO – Monóxido de Carbono
- CO₂ – Dióxido de Carbono
- CoM – Center of Maxima
- DIN – *Deutsche Industrie Normenausschuss*
- GN – Gás Natural
- HC – Hidrocarboneto
- N – Rotação
- NO_x – Óxidos Nitrosos
- PID – Proporcional, Integral, Derivativo
- PMI – Ponto Morto Inferior
- PMS – Ponto Morto Superior
- TDC – Top Dead Center
- T_{INJ} – Largura do pulso de injeção ou tempo de injeção

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 Considerações iniciais

Uma fonte alternativa de geração de energia elétrica, já consolidada no mercado e amplamente utilizada em diversas aplicações, é representada pela presença de geradores movidos por motores Diesel. Estes equipamentos são usados onde a alimentação de energia não deve sofrer interrupções, como em hospitais e empresas, e em regiões não providas da rede pública de energia. Porém, estes geradores têm um alto consumo de óleo Diesel.

Devido às crescentes elevações nos preços do petróleo e derivados está sendo feita uma revisão na política energética nacional. Para nortear esta revisão tem se procurado estabelecer dois parâmetros fundamentais: a substituição do petróleo (parcialmente importado) e a conservação/eficiência energética.

Uma das medidas adotadas pelo governo brasileiro para evitar a dependência do petróleo foi buscar o incremento do consumo de gás natural (GN). O uso de gás como alternativa energética, agregado às suas vantagens ambientais, coloca este combustível em uma posição estratégica importante na matriz energética brasileira.

Como exemplo do estímulo governamental para o uso do gás combustível, pode-se citar as metas de elevação para 12% na sua participação na matriz energética brasileira até o ano 2010. Outros fatores a serem considerados são os acordos para a importação do GN de países vizinhos, como a Argentina e a Bolívia, através de gasodutos. Mesmo a exploração de novas reservas em território nacional é um aspecto a se considerar quando se trata do uso do gás como combustível.

Nos últimos tempos, tem se observado um aumento no mercado de motores diesel bi-combustível em aplicações de geração de energia. Isto resulta da difusão das regulamentações de emissões para plantas estacionárias e o aumento da disponibilidade de GN proveniente de gasodutos.

Os motores bi-combustível também se mostram favoráveis em situações onde o suprimento de gás é mais barato que o combustível Diesel, como em localidades próximas de gasodutos, plataformas marítimas em regiões costeiras, fontes de biogás (locais de aterro, fábricas e outras possíveis proximidades de biodigestores), entre outros. Assim, é crescente o número de situações nas quais o gás está disponível a custos relativamente baixos e em provisões relativamente ininterruptas.

Os motores Diesel bi-combustível se adaptam bem a situações de co-geração, fornecendo calor e energia elétrica com uma única máquina primária de baixas emissões. Uma aplicação onde existe uma verdadeira sinergia entre a máquina e a fonte de combustível é um sistema de tratamento de esgoto. Nestes, além da energia mecânica usada para acionar um gerador elétrico, o motor produz calor, emitido pelo escapamento e pela água de arrefecimento. Este calor pode ser aproveitado para aquecer os biodigestores que irão produzir o gás a ser usado como combustível do próprio motor. O calor recuperado da exaustão do motor e da água circulante do arrefecimento pode ser usado para manter tanques digestores na temperatura adequada para a produção de gás.

Outra aplicação interessante encontra-se nos próprios gasodutos, que devem ter estações de bombeamento a intervalos regulares para manter a pressão do gás. Estas estações muitas vezes estão situadas em locais remotos onde não há disponibilidade de energia elétrica, mas há disponibilidade de gás que pode ser usado como combustível de um grupo gerador.

1.2 Justificativa

Métodos mais modernos, eficientes e racionais para o uso das fontes de energia existentes se fazem necessários. Tais métodos devem aliar o baixo custo e uma implementação simples para permitir a rápida difusão, facilitando o seu acesso para todos os setores da sociedade. Isto é especialmente válido quando há um contexto de crescimento do uso de GN. A busca de mais qualidade, eficiência e precisão no processo de gerenciamento eletrônico da injeção de combustível, bem como a redução de consumo são fundamentais. Para tal, o domínio de técnicas de controle que usam sistemas inteligentes se faz necessário. Tanto para este quanto para trabalhos futuros.

Os aspectos apresentados acima são fatores que motivaram o desenvolvimento deste trabalho.

1.3 Definição do problema

Considerando a aplicação em geradores de motores Diesel operando em regime bi-combustível com gás natural utilizado como combustível principal e o óleo Diesel apenas como promotor da ignição, o problema encontrado é o baixo rendimento destes motores devido à falta de um sistema eletrônico para o gerenciamento da injeção de gás natural.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo geral

Este projeto visa o desenvolvimento de um gerenciador eletrônico de injeção de gás natural para controle de velocidade de motores Diesel que operam simultaneamente com óleo Diesel e gás natural.

1.4.2 Objetivos específicos

Com a realização deste trabalho, procura-se atingir os seguintes objetivos:

1. Desenvolver um injetor eletrônico de gás natural para motores Diesel bi-combustível;
2. Obter um algoritmo de controle de rotação para motores de ignição por compressão baseado em lógica nebulosa, de simples implementação e compreensão, tal que sua adaptabilidade para diferentes plantas seja rápida e de baixo custo, não exigindo avançados conhecimentos técnicos de controle por parte do operador;
3. Produzir um programa-protótipo para abrigar as alterações propostas neste trabalho e obter resultados que venham a comprovar, ou não, a eficiência desta técnica de controle, que ainda não foi devidamente avaliada neste tipo de aplicação;
4. Reunir argumentos que qualifiquem melhor as peculiaridades da injeção de dois combustíveis (gás natural e Diesel) num único motor.

1.5 Metodologia

Para alcançar estes objetivos, realizaram-se as seguintes etapas, no desenvolvimento de um protótipo:

1. Levantamento bibliográfico sobre os princípios básicos de operação de motores Diesel, operando com apenas um combustível e no regime bi-combustível e sobre as técnicas de modelagem e controle tradicionalmente usadas e aceitas por fabricantes e pesquisadores;
2. Estudo sobre lógica nebulosa, com ênfase na metodologia de modelagem heurística para sistemas não-lineares e uso de algoritmos de controle baseados em regras provenientes de conhecimento previamente adquirido;
3. Estabelecimento de uma estratégia mais adequada de controle para injeção de gás natural em motores Diesel operando em regime bi-combustível;
4. Desenvolvimento do programa usado no protótipo para controlar a injeção de gás;
5. Aquisição, análise e avaliação dos dados obtidos através do protótipo;
6. Formulação das observações finais a respeito dos resultados atingidos.

1.6 Organização do trabalho

O capítulo 1 apresenta algumas considerações iniciais sobre a relevância do estudo de novas formas de aproveitamento das fontes de energia já existentes. Também são expostas as justificativas que levaram ao desenvolvimento deste trabalho e os objetivos a serem atingidos com o mesmo. A estrutura e a metodologia sobre as quais se dá o desenvolvimento deste estudo também são apresentadas.

O capítulo 2 faz uma introdução sobre o tema injeção bi-combustível como forma de situar o assunto no panorama da eficiência energética e injeção de gases. Ele também apresenta informações sobre as características básicas dos motores Diesel e os elementos necessários à regulação de velocidade destes motores. A operação destes motores no regime bi-combustível também é discutida, apresentando-se as possibilidades deste recurso. Este capítulo também expõe o uso da modelagem e controle com base em conhecimento heurístico.

No capítulo 3 é apresentado o desenvolvimento de um controlador nebuloso de simples implementação. Este controlador admite modificações em sua estrutura para permitir sua adaptação a diversas plantas para controle de diferentes de motores Diesel. Este capítulo apresenta o desenvolvimento prático do protótipo de injetor eletrônico para gás natural, com base em um algoritmo nebuloso. Este capítulo mostra os sensores e os atuadores utilizados, bem como os programas desenvolvidos.

Apresentam-se no capítulo 4 os resultados obtidos com o protótipo desenvolvido nos capítulos anteriores. Também são apresentados os ensaios prévios, feitos com os sensores e atuadores utilizados. Os problemas do controlador são analisados e os dados adquiridos são comparados com os resultados estudados na literatura.

As conclusões do trabalho são expostas no capítulo 5, onde ocorre o desfecho deste trabalho, apresentando-se as contribuições e sugerindo temas para futuros desenvolvimentos.

Os apêndices A e B, ao final deste trabalho, trazem informações a respeito do protótipo construído. O apêndice A contém, em forma de um fluxograma detalhado, o software desenvolvido para implementação em CPU do injetor desenvolvido. O apêndice B mostra os circuitos eletrônicos, em forma de esquemáticos, construídos para o projeto final.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Introdução

O uso de combustíveis gasosos em motores de combustão não apresenta novidades. Em meados do século XIX, na França, já havia patentes de motores operando com uma mistura de gases similar ao gasogênio. No mesmo período, na Índia e na Inglaterra, motores já operavam com gás de esgoto. Nos anos 1920 a Itália usou o GN extensivamente e na Alemanha, em 1935, surgiu o primeiro veículo alimentado com combustível gasoso. Segundo Barbosa [1], em 1991, a frota mundial de veículos movidos a gás era cerca de 700.000 em todo o mundo. No Brasil, esta quantidade era de 360. Em 1996, a frota mundial havia aumentado para 800.000 e no Brasil assinou-se um decreto presidencial liberando o uso de GN em qualquer veículo. A quantidade de veículos a gás no país subiu para 11.000 em 1996 e estima-se que, de janeiro até setembro de 2005, aproximadamente 153.000 veículos tenham sido convertidos para operar com gás.

Neste capítulo as informações sobre a operação de motores Diesel com GN são discutidas. São apresentados trabalhos sobre motores Diesel bi-combustível usando GN e quais os resultados atingidos pelos autores. São feitas discussões e observações sobre os dados apresentados, bem como uma análise das metodologias adotadas por eles.

2.2 Motores Diesel usando o GN

O GN não precisa ser atomizado para queimar e isso resulta numa combustão limpa, com reduzida emissão de poluentes e melhor rendimento térmico. Assim, se reduzem despesas com manutenção e melhora-se qualidade de vida da população. O GN, devido ao baixo índice de cetanos, não é adequado para ser usado como combustível principal em motores Diesel. A mistura ar/gás oferece dificuldades para iniciar a combustão apenas por compressão. Entretanto, possui facilidade para entrar em combustão por centelha ou por uma

chama já iniciada por outro meio. Isto permite que o GN seja empregado facilmente em motores de ciclo Otto. Segundo Camargo [5], o GN tem sido largamente usado como o combustível principal em motores de ignição por centelha. Estes não requerem muitas alterações estruturais para operarem com gás. Em motores Diesel, o processo de alteração é complexo, descaracterizando totalmente o motor. Assim, o uso do GN (como combustível principal) em motores Diesel torna-se inviável.

Challen [6] considera que, apesar de ser inadequado para o uso direto em motores de ignição por compressão, o GN pode ser usado como combustível secundário em motores bi-combustível. Para Henham [19], em motores Diesel bi-combustível, o mecanismo original de injeção ainda supre certa quantidade de combustível Diesel. Assim, o motor, admite e comprime uma mistura de ar e gás, previamente preparada num dispositivo externo. Esta mistura inflama-se pela energia proveniente da combustão do combustível Diesel, pulverizada dentro do cilindro na fase de compressão. O spray de combustível Diesel gera a centelha inicial do processo de combustão. A quantidade de combustível Diesel necessária para a ignição da mistura ar-gás fica entre 10-20% da quantidade necessária para a operação do motor em condições normais de funcionamento com combustível Diesel somente. Porém, estas proporções na mistura ar-gás poderão variar conforme as características mecânicas e químicas do motor e do combustível usado, respectivamente. Uma mistura adequada pode ser preparada por um equipamento eletrônico, dotado de uma estratégia de controle que garanta a dosagem de combustível de forma precisa e com mínimo nível de desperdícios.

Dessa forma, as características do motor de ignição por compressão não são alteradas. Pode-se, no mesmo motor, se utilizar Diesel + GN ou Diesel puro. Isto possibilita aumentar a autonomia do motor e utilizá-lo em regiões que não possuam postos de abastecimento de gás.

Segundo Bhattacharya [2], com o uso do gás como combustível há uma simplificação mecânica na adaptação do motor, bastando instalar uma câmara de pré-mistura antes do coletor de admissão. Nesta câmara o gás é misturado com uma pequena quantidade de ar, aspirado através da câmara, gerando uma pré-mistura de gás e ar. Esta pré-mistura é diluída em uma quantidade maior de ar dentro do coletor de admissão antes de entrar no cilindro. Algumas outras alterações de menor porte devem ser executadas, como a alteração do ângulo de avanço da injeção, que dependendo do motor, pode ser aumentado, já que o gás tem uma velocidade de propagação de chama menor que o óleo Diesel. Entretanto, poderia ser usado um dispositivo eletrônico para regular a dosagem de gás injetado, aumentando assim a precisão na injeção deste combustível.

Bhattachrya [2] ensaiou um motor Diesel trabalhando em regime bi-combustível com biogás e óleo Diesel. Ele concluiu que um motor de ignição por compressão pode ser modificado para trabalhar em regime bi-combustível. O motor modificado pode partir com Diesel e após suficientemente aquecido passa a operar com dois combustíveis, reduzindo o óleo Diesel e completando a necessidade de energia com gás. No ensaio foi necessário aumentar o avanço da ignição para cerca de 30° . Reduziu-se a potência da ordem de 19% para a máxima relação de gás/Diesel. Cerca de 70% do óleo Diesel foi substituído por gás. O consumo específico do Diesel ao freio caiu significativamente em altas cargas. Mas, neste caso, não se testou dispositivos mais precisos para fazer a dosagem do combustível injetado.

De Zanche [10] testou um trator em regime bi-combustível usando biogás como combustível principal e obteve cerca de 50% de economia no consumo de óleo Diesel apesar do baixo poder calorífico do biogás obtido. Deve-se considerar que, neste experimento, foi necessário purificar o gás, obtido por biodigestão, já que o mesmo apresentava alto teor de impurezas, inclusive gases sulfurosos, que causaram corrosão, principalmente nas peças fabricadas em ligas de cobre.

Silva [37] testou um motor bi-combustível trabalhando com metano e óleo Diesel trabalhando em diversas operações normais de um trator, obtendo de 70% a 80% de redução do consumo de óleo Diesel na média das diversas operações executadas, sendo que para operações que exigiram maior torque do motor a economia de óleo Diesel foi maior. Entretanto Silva [37], diz que poderia ser utilizado apenas 5% de Diesel sem prejudicar o funcionamento do motor. Porém, para evitar o sobreaquecimento dos bicos injetores é recomendado utilizar cerca de 20% de óleo Diesel.

Segundo Delavia [11], em motores cujo combustível é gasoso deve se considerar o volume ocupado pelo gás. Ao se usar combustíveis líquidos o volume não é considerado, por ser muito pequeno, da ordem de 0,1% a 0,2% do volume de admissão. Para combustíveis gasosos, este valor aumenta quase 1000 vezes. Para o GN consumido no Rio Grande do Sul, o volume ocupado é da ordem de 11% do volume da admissão. Em motores Otto isto reduz a potência máxima em alta rotação, pois existe menos oxigênio para reagir com o combustível. Em motores Diesel bi-combustível, a admissão de ar sempre é plena, ou seja, em geral há excesso de ar. Assim, não é sensível a redução de potência em altas rotações.

Camargo [5] estudou o uso de GN em motores Diesel bi-combustível. Investigaram-se os efeitos de diferentes proporções de combustível Diesel e gás sobre a velocidade e o torque do motor. Substituiu-se 60% do óleo Diesel originalmente usado por gás. A partir de ensaios obteve-se, um acréscimo de 14% sobre a potência e o torque do motor ao operar com GN.

Estes acréscimos são comparados com os valores obtidos para o motor operando somente com óleo Diesel. Atingiu-se uma redução do consumo específico de 46%. Foi utilizado no experimento um motor Agrale monocilindro. As curvas da figura 2.4 apresentam os ensaios realizados com o motor em condições normais de operação, apenas com combustível Diesel. As figuras 2.2 e 2.3 ilustram alguns dos resultados alcançados por Camargo. As condições de ensaio seguiram as recomendações de normas específicas, validando os dados obtidos. Não foram usadas técnicas de controle de injeção avançadas. A dosagem de gás neste trabalho foi feita de forma mecânica e não se utilizaram métodos precisos para regular esta dosagem.

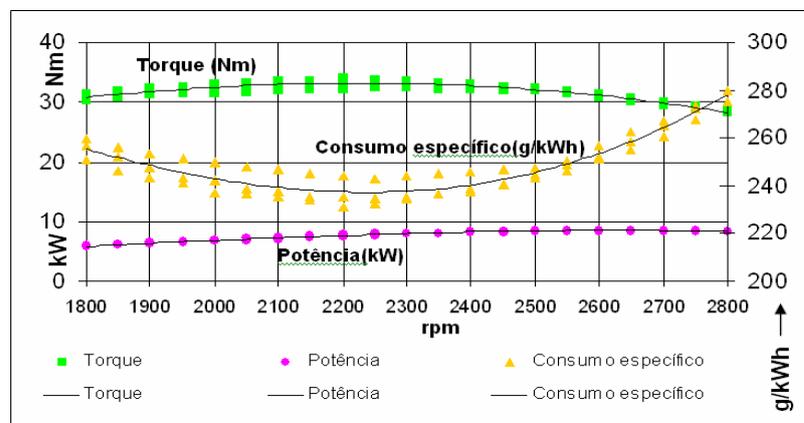


Figura 2.1 - Características nominais do motor

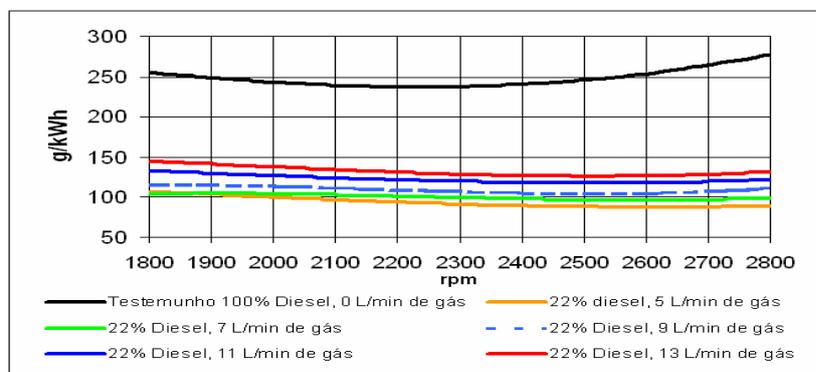


Figura 2.2 - Curvas de consumo específico para 21° de ângulo de avanço da injeção e 22% de Diesel

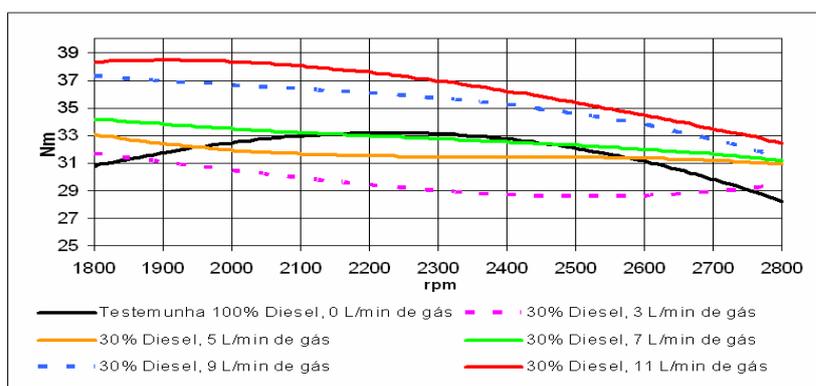


Figura 2.3 - Curvas de torque para 21° de ângulo de avanço da injeção e 30% de Diesel

2.3 Controle e modelagem de motores Diesel

Os trabalhos analisados demonstram as vantagens e os requisitos necessários para o uso do GN em motores Diesel. Porém, ainda procura-se aprimorar os métodos de controle para a injeção do GN. Normalmente, a mistura de ar e gás na admissão é feita por dispositivos mecânicos, imprecisos, limitando o aproveitamento do gás injetado.

Challen [6] define o sistema de gerenciamento como um dispositivo mecânico ou eletromecânico para controle automático da velocidade pela regulação da entrada de combustível. O controlador deve manter a performance do motor Diesel dentro dos limites (de velocidade) especificados, para garantir o funcionamento adequado do motor. Para Guzella [18], o objetivo de um controle eletrônico é prover o torque requerido do motor com o mínimo consumo de combustível. Deve-se respeitar ainda a legislação relativa aos níveis de emissões e ruídos produzidos.

Para motores de grupos Diesel-gerador, a regulação de velocidade representa um aspecto crítico. A frequência da tensão gerada deve ser mantida constante. Para isso o motor deve operar com rotação constante, independente das variações de carga. Isso implica na correção da quantidade de combustível injetada, realizada pelo regulador, feita de tal forma que não permita variações da rotação. Isso exige um tempo de resposta muito rápido por parte do controlador, difícil de ser obtido de um sistema mecânico.

Um estudo realizado por Karray [21] mostrou que motores Diesel são inerentemente não-lineares, com suas características variando com a temperatura ambiente, velocidade de operação e potência de saída. Para controle de motores Diesel, deve-se considerar as relações expressas pelas equações 2.1 e 2.2 e 2.3.

$$T_{INJ} = f(\alpha_i, N) \quad (2.1)$$

$$N = f(Q_i, T_{INJ}) \quad (2.2)$$

$$Q_i = f(T_{INJ}) \quad (2.3)$$

onde T_{INJ} é a largura do pulso de injeção, α_i é o ângulo correto de injeção, N é a rotação do motor e Q_i é a quantidade de combustível injetada.

As equações 2.1 e 2.2 e 2.3 mostram que o início da injeção de combustível e a cronometragem do tempo de injeção dependem da velocidade do motor que, por sua vez, depende da quantidade de combustível injetada durante a largura de pulso de tempo iniciada

após o começo do processo de injeção. A demonstração exata das relações entre estas grandezas é demasiado complexa e foge ao escopo deste trabalho.

Zweiri [47] modela o motor Diesel analisando as forças atuantes. Este modelo permite o estudo de transientes e em regime permanente sobre o torque e a velocidade e trata o motor como um sistema não-linear. Mas, desconsidera grandezas importantes ao funcionamento do motor. Desprezam-se as temperaturas internas do pistão decorrentes da combustão, variações de pressão, alterações do tipo de combustível e outros valores. Tal modelo oferece restrições ao desenvolvimento de um regulador preciso e confiável e reserva-se a simulações aproximadas.

Challen [6] modela matematicamente o sistema termodinâmico do motor. É feita uma série de aproximações baseadas nos fundamentos da termodinâmica, dinâmica de fluidos, equacionamentos da mecânica dos motores Diesel e outros princípios. Estuda-se a resposta aos transitórios e em regime permanente, consumo de combustível, pressão interna do cilindro, temperatura dos gases de exaustão e outros. Esta estratégia de modelagem resulta em um sistema matemático complexo para análise, e dificulta o desenvolvimento de um controlador com base nesta abordagem.

Outra metodologia é abordada pelo modelo do atuador. Em reguladores modernos é freqüente o uso de atuadores eletromagnéticos para o controle preciso da cremalheira. Li [25] propõe um controlador híbrido PID/Nebuloso para resolver o problema da regulação da injeção. Obtém-se uma combinação de controlador nebuloso com um controlador PID baseado em mapa (MBPID – Map-Based PID), isto é, um controlador PID cujos ganhos são mapeados previamente e armazenados em uma tabela de dados. Estes se originam de ensaios experimentais com o motor a ser usado. Mas este trabalho possui as seguintes limitações: (1) modela-se o atuador da cremalheira, ignorando-se as características globais do motor; (2) o controle é feito para motores operando apenas com Diesel, e não prevê a operação com GN; (3) o algoritmo de controle, que usa tabelas para determinar os ganhos PID, é limitado, e exige grande tempo de processamento por parte do microcontrolador. Isto limita a faixa de usuários deste sistema.

Um regulador de velocidade baseado em controle PID é proposto por Karray [21]. Este regulador trata o motor de forma global. A planta do motor é considerada como um todo e o controlador processa uma gama maior de dados do sistema. Os dados do sistema (parâmetros das funções de transferência) são coletados para várias condições de operação. Os ganhos são selecionados a partir de levantamentos experimentais para dar ao sistema uma resposta otimizada em termos de sobre velocidade ("overshoot") e tempo de subida. Para

implementar o controlador PID usaram-se 28 funções de transferência de 6ª Ordem. Utilizou-se um algoritmo nebuloso para aprimorar a seleção dos ganhos mais adequados. Resultou-se em um sistema de controle estável para várias faixas de operação do motor. Também se obteve ações de controle suaves enquanto o motor transitava entre diferentes condições de operação. Mas o controle foi implementado em um microcomputador PC, por intermédio de uma placa de aquisição de dados. Isto se deve à necessidade de um processamento mais poderoso, em função da complexidade do modelo adotado.

2.4 Controladores modernos para motores Diesel

Um estudo feito por Guzella [17] mostra a técnica de mapeamento dos sinais de entrada e saída. Esta é tradicionalmente usada para fazer o controle da injeção em motores de combustão interna. O mapeamento consiste no seguinte:

1. O motor é previamente ensaiado, e levantam-se tabelas e curvas para registrar os pontos ótimos de funcionamento, para cada condição de entrada;
2. Estes dados são armazenados, na forma de mapas, na memória de uma CPU que faz o processamento matemático requerido para gerenciar eletronicamente o motor. Assim, diz-se que o motor foi mapeado;
3. Com o motor em funcionamento, os sinais provenientes dos sensores conectados ao motor são processados e cruzados com os mapas de memória. Os dados de entrada e saída são processados e comparados, através de interpolações matemáticas, com os valores previamente levantados e armazenados na memória da CPU;
4. Os valores de saída destes mapas são determinantes para as ações de controle a serem tomadas pelos atuadores existentes no motor.

O uso (somente) do mapeamento limita as condições de operação do motor às situações previstas nos ensaios. A adaptabilidade é restringida e pode haver perda da capacidade de antever situações adversas, como o desgaste gradual dos diversos componentes do motor. Mas esta técnica é realizada pelos principais fabricantes de centrais de injeção eletrônica, tais como Bosch, Magneti-Marelli e Motec.

Existe considerável literatura a sobre o uso de controle nebuloso e neuro-fuzzy para gerenciar a injeção de combustível em motores Diesel. Li ([23], [24] e [25]), Karray [21] e

Challen [6] trazem uma série de trabalhos e ensaiam diversas topologias de controladores híbridos PID/Nebuloso. Nestes, obtiveram-se excelentes respostas, tanto para o degrau quanto para o regime permanente. Mas foi feito uso de modelos matemáticos, aumentando a complexidade e demandando tempos maiores de processamento por parte do controlador. São apresentadas comparações entre controladores PID comuns e híbridos e consegue-se demonstrar os benefícios de se usar o controle nebuloso em motores Diesel.

Weige [43] utilizou algoritmos nebulosos para controlar a razão ar-combustível em um motor de ignição por centelha alimentado por GN. Este controlador foi desenvolvido sem o uso de modelagem do motor. Este trabalho combinou redes neurais (com base em algoritmos nebulosos) e controle PI. Este esquema híbrido manteve a razão ar/combustível praticamente constante durante a operação do motor. Os resultados em malha fechada apresentaram uma resposta precisa e estável, mesmo na ocorrência de transientes. O desenvolvimento necessitou de diversas experiências com o motor para avaliação dos pontos ótimos para sintonia do controlador híbrido. Contudo, demonstrou-se que os algoritmos nebulosos representam uma estratégia de controle promissora na área de gerenciamento de injeção de combustível.

Analisaram-se as dificuldades enfrentadas por autores de outros trabalhos para o desenvolvimento de controladores fundamentados em modelos analíticos para motores Diesel. Optou-se então por se utilizar modelos heurísticos para o desenvolvimento do regulador de velocidade proposto nesta dissertação.

2.5 Seleção do tipo de controle

A disponibilidade de conhecimento prévio sobre o objeto a ser modelado e a quantidade de dados mensurados sobre o processo são fatores que definem a estratégia de controle. A partir disso, deve-se escolher a ferramenta mais apropriada para resolver um dado problema. Geralmente, a decisão fica entre as redes neurais ou algoritmos nebulosos. Redes neurais são usadas quando o processo é do tipo caixa-preta e totalmente desconhecido, mas existem referências sobre o mesmo (medições, registros, pares de dados ou amostras). Quando a solução do problema é conhecida, isto é, há conhecimento humano estruturado (experiência, perícia, heurística) sobre o processo, prefere-se o uso de algoritmos nebulosos.

Autores como Challen [6], Guzella [18] e Li ([23], [24] e [25]) propõem o uso de modelos tipo "caixa-preta" para o controle de motores Diesel. Estes modelos são capazes de reproduzir o comportamento da entrada e da saída da planta que está sendo

experimentalmente analisada. Esta aproximação oferece a possibilidade de redução das dificuldades enfrentadas com as grandes não-linearidades presentes nos motores Diesel.

Para Shaw [36] o método heurístico de modelagem consiste em se realizar uma tarefa de acordo com conhecimento prévio, estabelecendo-se regras práticas e estratégias já frequentemente utilizadas. Assim, uma regra heurística para uma ação de controle possui a forma apresentada na equação 2.4.

$$\text{SE } \langle \text{condição} \rangle \text{ ENTÃO } \langle \text{ação} \rangle \quad (2.4)$$

O método heurístico é similar ao método de construção de uma tabela de entradas e saídas. Para cada linha da tabela, têm-se uma relação entre a(s) variável(is) de entrada(s) e a(s) de saída(s). Pode-se escrever uma linha de regra heurística como na equação 2.5.

$$\text{SE ERRO} = 100 \text{ rpm ENTÃO } T_{\text{INJEÇÃO}} = 1,2 \text{ ms} \quad (2.5)$$

O resultado da substituição dos valores numéricos da equação 2.13 por variáveis nebulosas (valores lingüísticos) é expresso pela equação 2.6.

$$\text{SE ERRO} = \text{GRANDE ENTÃO } T_{\text{INJEÇÃO}} = \text{MÉDIO} \quad (2.6)$$

onde *GRANDE* e *MÉDIO* definem funções de pertinência que descrevem a imprecisão da entrada e da saída.

A restrição da linearidade não é mais necessária ou mesmo relevante, uma vez que a função de entrada e saída é descrita ponto-a-ponto. A vantagem do método heurístico está na possibilidade da construção de uma função de entrada versus saída, não matemática, e útil na descrição de uma planta do processo. Isso pode ser feito quando um modelo matemático equivalente for muito difícil ou complexo de se obter.

Dentre as estratégias mais comuns de controle nebuloso estão o controlador de Mamdani e de Takagi-Sugeno. Para o controle da injeção de gás no motor Diesel, a alternativa mais apropriada é o uso do método de Mamdani. Este se adapta melhor às técnicas de desenvolvimento baseadas em metodologias heurísticas adotadas nesta dissertação. Este controlador é mais flexível ao uso de conhecimento humano previamente adquirido e processamento de dados experimentalmente obtidos da planta. O controlador de Mamdani

dispensa o uso de modelos matemáticos, suporta o tratamento da planta como se fosse um modelo tipo caixa-preta e é maleável ao uso da metodologia heurística de modelagem. São possíveis novos ajustes, caso seja necessário fazer novas sintonias no controlador para otimização da resposta da planta.

2.6 Resumo deste capítulo

Este capítulo identificou algumas das principais características de operação dos motores Diesel com GN. Dentre as vantagens destes motores sobre os demais, destacam-se o alto rendimento e a baixa emissão de poluentes. Foram evidenciadas também as características gerais do gás como combustível. A dosagem de combustível injetada é o principal elemento que interfere no desempenho geral dos motores Diesel.

Destacam-se neste capítulo as vantagens do uso do GN como combustível para motores Diesel e que é preciso um segundo combustível (óleo Diesel) para iniciar a combustão. O restante da energia fornecida ao motor vem da queima do próprio gás. Isto caracteriza o regime bi-combustível em motores Diesel. Os trabalhos apresentados exemplificam as vantagens do uso deste regime. A economia de Diesel é elevada, mesmo com as limitações das técnicas de controle de injeção usadas nos trabalhos apresentados.

Os requisitos para fazer um motor Diesel operar com GN foram apresentados. As características estruturais do motor não são alteradas, mas torna-se necessária a implementação de um dispositivo externo específico para realizar a dosagem do gás.

As técnicas de controle comumente usadas para regular a velocidade em motores Diesel foram abordadas. Verificou-se que técnicas de controle com base em algoritmos nebulosos estão entre as mais aceitas e bem recebidas atualmente. Apresentou-se como alternativa o controlador de Mamdani para regulação da injeção de GN em um motor Diesel.

CAPÍTULO 3

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Introdução

Neste capítulo são apresentados os aspectos teóricos referentes aos motores de combustão interna. Expõem-se definições e conceitos importantes para a compreensão das grandezas envolvidas com os princípios físicos relacionados aos motores de combustão interna. Informações sobre a operação de motores Diesel com GN são discutidas. São apresentados trabalhos sobre motores Diesel bi-combustível usando GN e quais os resultados atingidos pelos autores. São feitas discussões e observações sobre os dados apresentados, bem como uma análise das metodologias adotadas por eles.

Apresentam-se conceitos teóricos para uma melhor compreensão da lógica nebulosa. É feita uma introdução sobre as vantagens do uso de modelos heurísticos sobre os modelos matemáticos tradicionais. Apresenta-se uma revisão dos princípios de modelagem, seleção e desenvolvimento do projeto de um controlador nebuloso. Tais conceitos são apresentados a fim de elucidar com mais clareza a terminologia e as idéias iniciais a respeito de algoritmos nebulosos. Encontram-se neste capítulo os princípios teóricos usados para o desenvolvimento do controlador desenvolvido neste trabalho.

3.2 Motores de combustão interna (MCI): Princípios e definições

3.2.1 Generalidades

Giacosa [17] define MCI (ou endotérmicos) como máquinas térmicas que transformam energia calorífica em energia mecânica útil. Esta energia calorífica pode ser oriunda de várias fontes primárias. Nos MCI ela provém da queima de algum tipo de combustível. Assim, a energia química é transformada em energia mecânica (ou trabalho) útil. Este trabalho é obtido

a partir do movimento alternativo dos componentes, que sofrem a ação de forças internas, provenientes da liberação da energia da combustão.

Os MCI alternativos possuem um cilindro dentro do qual um êmbolo (pistão) desloca-se em movimento alternativo. Este se conecta a um sistema de biela-manivela, transformando o movimento alternativo em rotativo. Durante o funcionamento, o motor desenvolve um ciclo relacionado com o movimento do pistão. Este se divide em fases caracterizadas pela aspiração, compressão, expansão e descarga do fluido operante. Estas fases podem estar distribuídas em 4 tempos de 180° ou agrupadas em apenas 2 tempos de 180°.

Os MCI podem ser classificados de diversas maneiras de acordo com a aplicação, desenho do motor, ciclo, desenho e localização das válvulas, combustível, método de preparação da mistura, desenho da câmara de combustão, método de ignição, entre outros. Este trabalho visa estudar um motor de ignição por compressão (motor Diesel), ciclo de quatro tempos, operando simultaneamente com combustível Diesel e GN.

3.2.2 Definições

A nomenclatura utilizada por fabricantes de motores, normalmente encontrada na documentação técnica relacionada, obedece à notação adotada pela norma DIN 1940. Existem normas americanas, derivadas das normas DIN, que adotam notações ligeiramente diferenciadas, porém com os mesmos significados. Esta nomenclatura é apresentada resumidamente no quadro 3.1.

Notação	Nomenclatura	Definição
D	DIÂMETRO DO CILINDRO	Diâmetro interno do Cilindro
s	CURSO DO PISTÃO	Distância percorrida pelo pistão entre os extremos do cilindro, definidos como Ponto Morto Superior (PMS) e Ponto Morto Inferior (PMI).
s/D	CURSO/DIÂMETRO	Relação entre o curso e o diâmetro do pistão.
n	ROTAÇÃO	Número de revoluções por minuto da árvore de manivelas
c_m	VELOCIDADE	Velocidade média do Pistão = $2 \cdot s \cdot n / 60 = s \cdot n / 30$
A	ÁREA DO PISTÃO	Superfície eficaz do Pistão = $\pi \cdot D^2 / 4$
P_e	POTÊNCIA ÚTIL	É a potência útil gerada pelo motor, para sua operação e para seus equipamentos auxiliares
z	NÚMERO DE CILINDROS	Quantidade de cilindros que o motor dispõe.
V_h	VOLUME DO CILINDRO	Volume do cilindro = $A \cdot s$
V_c	VOLUME DA CÂMARA	Volume da câmara de compressão.

V	VOLUME DE COMBUSTÃO	Volume total de um cilindro = $V_h + V_c$
V_H	CILINDRADA TOTAL	Volume total de todos os cilindros do motor = $z.V_h$
e	RELAÇÃO DE COMPRESSÃO	Também denominada de razão ou taxa de compressão. Relaciona o volume total do cilindro, no início da compressão e o volume do fim da compressão. Constitui uma relação significativa para os diversos ciclos dos motores de combustão interna. Pode ser expressa por: $(V_h + V_c)/V_c$. ($\epsilon > 1$).
P_i	POTENCIA INDICADA	É a potência dentro dos cilindros. Também denominada de IHP (Indicated Horse Power). Consiste na soma das potências efetiva e de atrito nas mesmas condições de ensaio.
P_l	POTÊNCIA DISSIPADA	Potência dissipada sob carga, inclusive engrenagens internas.
P_{sp}	DISSIPAÇÃO	Dissipação de potência pela carga.
P_r	CONSUMO DE POTÊNCIA	Consumo de potência por atrito, bem como do equipamento auxiliar para funcionamento do motor, à parte a carga. $P_r = P_i - P_e - P_l - P_{sp}$
P_v	POTÊNCIA TEÓRICA	Calculada por comparação com máquina ideal. Hipóteses de cálculo: ausência de gases residuais, queima completa, paredes isolantes, sem perdas hidrodinâmicas, gases reais.
p_e	PRESSÃO MÉDIA EFETIVA	Pressão hipotética constante que seria necessária no interior do cilindro, durante o curso de expansão, para desenvolver uma potência igual à potência no eixo.
p_i	PRESSÃO MÉDIA NOMINAL	Pressão hipotética constante que seria necessária no interior do cilindro, durante o curso de expansão, para desenvolver uma potência igual à potência nominal.
p_r	PRESSÃO MÉDIA DE ATRITO	Pressão hipotética constante que seria necessária no interior do cilindro, durante o curso de expansão, para desenvolver uma potência igual à potência de atrito.
B	CONSUMO	Consumo horário de combustível.
b	CONSUMO ESPECÍFICO	Consumo específico de combustível = B/P . Com o índice e , refere-se à potência efetiva e com o índice i refere-se à potência nominal.
η_m	RENDIMENTO MECÂNICO	É a razão entre a potência medida no eixo e a potência total desenvolvida pelo motor, ou seja: $\eta_m = e/P_i = P_e/(P_e + P_r)$ ou então, $\eta_m = P_e/(P_e + P_r + P_l + P_{sp})$.
η_e	RENDIMENTO ÚTIL	Ou rendimento econômico é o produto do rendimento nominal pelo rendimento mecânico = $\eta_i \cdot \eta_m$.
η_i	RENDIMENTO INDICADO	É o rendimento nominal. Relação entre a potência indicada e a potência total desenvolvida pelo motor.
η_v	RENDIMENTO TEÓRICO	É o rendimento calculado do motor ideal.
η_g	EFICIÊNCIA	É a relação entre os rendimentos nominal e teórico; $\eta_g = \eta_i/\eta_v$.
λ_i	RENDIMENTO VOLUMÉTRICO	Relaciona a massa de ar efetivamente aspirada e a teórica.

Quadro 3.1 – Nomenclatura e definições de termos relacionados à MCI

3.3 Conceitos

3.3.1 Relação estequiométrica (ou Relação Ar/Combustível ou relação lambda (λ))

Para a combustão completa do combustível, é necessário formar uma mistura adequada deste combustível com o oxigênio. A proporção de ar nesta mistura depende da composição do combustível. Esta quantidade de ar é chamada de ar teórico (ou ideal) necessário (Ar_{min}). A falta de ar (mistura rica) produz, em geral, um consumo alto de combustível e a formação de CO (monóxido de carbono) ou fuligem. A relação entre a quantidade de ar (Ar_{real}) e a teórica (Ar_{min}) resulta na equação 3.1.

$$\lambda = \frac{\text{razão ar / combustível presente no coletor (real)}}{\text{razão ar / combustível estequiométrica (teórico)}} = \frac{Ar_{real}}{Ar_{min}} \quad (3.1)$$

O fator λ é usado para caracterizar os diferentes tipos de misturas. Assim:

- $\lambda = 1$: indica mistura estequiométrica (ideal)
- $\lambda > 1$: indica misturas pobres (excesso de ar)
- $\lambda < 1$: indica misturas ricas (excesso de combustível)

Motores Diesel operam melhor com $\lambda > 1$ (misturas pobres). Contudo, o tempo para formação da mistura é menor, pois, para garantir a combustão completa, deve existir excesso de ar. Caso não haja este excesso, ocorrerá emissão de fuligem (CO e HC) por combustão incompleta. No motor Diesel a plena carga, normalmente λ não é inferior a 1,3 e com o aumento da carga pode subir muito. Depende da qualidade da mistura, do combustível, da forma da câmara de combustão, do estado térmico e de outras circunstâncias. O volume de ar teórico pode ser calculado pela composição química do combustível. Filtros de ar, tubulações, passagens e turbo compressor são dimensionados em função do volume de ar necessário à combustão e devem estar desobstruídos, para não comprometer o funcionamento do motor.

Sabendo-se a fórmula química de um combustível é possível determinar matematicamente a sua relação estequiométrica com o ar. Deve-se considerar sempre que o ar tem aproximadamente 21% de oxigênio em volume (Giacosa [17]).

3.3.2 Número de octanas (N.O.)

Comprimindo-se uma mistura estequiométrica de ar e combustível, haverá uma determinada taxa de compressão e na qual a mistura entra espontaneamente em combustão. Isto é, a pressão e o conseqüente aumento de temperatura provocam a queima do combustível independentemente da centelha. Como toda a massa de ar e combustível está submetida às mesmas condições, a combustão se dá quase instantaneamente em toda a mistura provocando uma detonação. O número de octanas se refere à capacidade máxima de pressão que o combustível suporta sem detonar. O N.O. é medido com relação à unidade e calculado baseado em um combustível específico padronizado, operando em um motor de referência, também padronizado.

Para o GN, é complexa a medição do número de octanas, pois o seu N.O. é superior a 100. Para este usa-se um método chamado de número de metano (N.M). Este método se resume a encontrar uma composição de metano (atribuído valor 100) e hidrogênio (atribuído valor 0) que tenha um comportamento similar à amostra do combustível a ser testado.

3.3.3 Índice de cetanos

Em um motor de ignição por compressão, desde o momento em que o combustível é injetado na câmara de combustão até o momento em que se inicia a ignição, ocorre um período de tempo chamado retardo da ignição. Quanto maior o retardo, maior é a quantidade de combustível acumulado na câmara antes que comece a queima. Quando se inicia a combustão, toda a massa de combustível depositada na câmara entra em ignição. Isto causa um gradiente de pressão tão forte que produz um golpe. Neste caso, no motor Diesel, ocorre um efeito semelhante à detonação de um motor Otto.

Um combustível Diesel é tanto melhor quanto menor o retardo da ignição que produz. Neste caso se diz que o combustível tem boa facilidade de ignição. A medida da facilidade de ignição de um óleo Diesel é dada por um índice empírico chamado índice de cetano (N.C.). A facilidade de ignição é função de muitas características, tais como, a temperatura de ignição, a viscosidade, o calor específico e outros e varia com a variação da composição química.

Para Giacosa [17], índice de cetano é um índice empírico que relaciona o combustível usado com uma mistura de um hidrocarboneto parafínico de ótima facilidade de ignição chamado “Cetano” ($C_{16}H_{35}$) ao qual foi dado o índice 100 e um hidrocarboneto de baixa

facilidade de ignição, chamado Alfametilnaftaleno, ao qual foi dado o índice zero. O índice de cetano é determinado por comparação, com uma mistura de cetano e alfametilnaftaleno.

3.4 Motores Diesel

Os MCI dividem-se em dois grandes grupos: motores de ignição por faísca (ou centelha) e de ignição por compressão. Os motores de ignição por centelha funcionam segundo o ciclo Otto e usam gasolina ou combustíveis gasosos. Nestes, a energia necessária para iniciar a combustão é fornecida através de uma faísca dos eletrodos de uma vela.

Nos motores de ignição por compressão (ou motores Diesel), o combustível usado é o óleo Diesel ou outro mais pesado (menos refinado). O ar introduzido na câmara de combustão (cilindro) sofre uma compressão muito superior à que ocorre nos motores Otto. A temperatura atinge um valor suficientemente elevado para iniciar a combustão de uma forma espontânea.

No motor Diesel, o deslocamento do pistão aspira, pela abertura da válvula de admissão, o ar que será comprimido. Este ar pode ser aspirado normalmente ou sofrer o efeito de um turbo-compressor que irá favorecer o preenchimento do cilindro aumentando a taxa real de compressão (e) e o volume de oxigênio (ar) admitido pelo cilindro. O cilindro é preenchido apenas com ar, sem combustível. Durante a compressão, as válvulas se fecham, mas apenas o ar é comprimido. Assim, o ar é aquecido por compressão dentro do cilindro. No final da compressão o Diesel é injetado dentro de uma pré-câmara ou da câmara de combustão (volume residual do cilindro no final da fase de compressão) e sofre ignição espontânea causada pela alta temperatura do ar. Na fase seguinte, a pressão resultante da combustão empurra o pistão através do cilindro, produzindo um deslocamento linear, o qual, pela biela, é transformado em movimento rotativo no virabrequim. A última etapa consiste na expulsão dos gases resultantes do processo de combustão, pela válvula de escape. Após esta etapa, o processo reinicia-se.

A figura 3.1 apresenta a geometria interna do cilindro de um motor. A figura 3.2 ilustra o ciclo de 4 tempos. Este ciclo varia em 720° do ângulo de manivela.

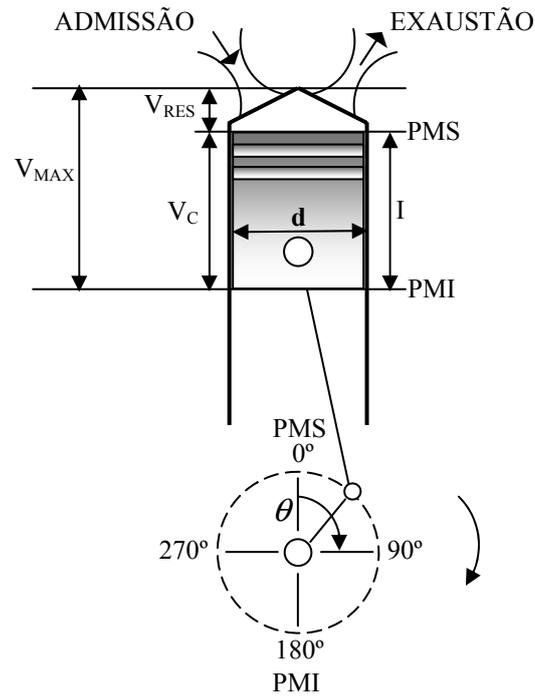


Figura 3.1 – Geometria básica do cilindro de um motor de combustão interna

onde d é o diâmetro da câmara de combustão, I é o curso do êmbolo, V_C é a cilindrada, V_{MAX} é o volume máximo da câmara de combustão, V_{RES} é o volume residual, PMS é o ponto morto superior (ou TDC – Top Dead Center), PMI é o ponto morto inferior (ou BDC – Bottom Dead Center) e θ é o ângulo de manivela.

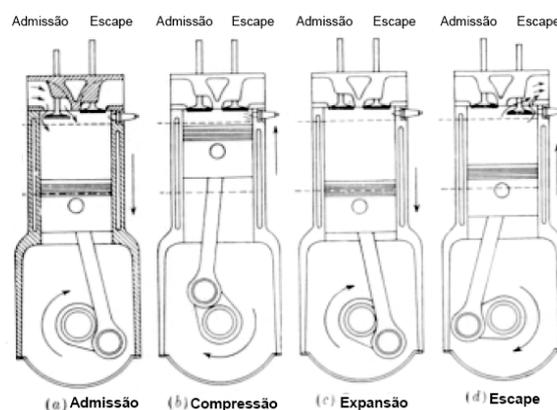


Figura 3.2 – Ciclo de 4 tempos

Fonte: Bosch [3]

A figura 3.3 apresenta os diagramas para o ciclo Diesel teórico. Os diagramas da figura 3.3, permitem visualizar o processo de transferência de energia do combustível para o motor. Com diagrama da figura 3.3(a) pode-se determinar a potência total desenvolvida

dentro do cilindro pelas forças produzidas pelo fluido de trabalho. A pressão compreendida entre os pontos 1-2-3-4 é chamada de *pressão indicada* (p_i). Esta é desenvolvida no cilindro como resultado do processo de combustão e variação do volume da câmara de combustão (cilindrada). Esta pressão é a entrada dinâmica do motor e, a partir dela, pode-se obter as forças geradas pela combustão. Estas forças são representadas, de acordo com Rizzoni [33] pelo torque indicado ($\tau_i(t)$) relacionado com $p_i(t)$ através da equação 3.3.

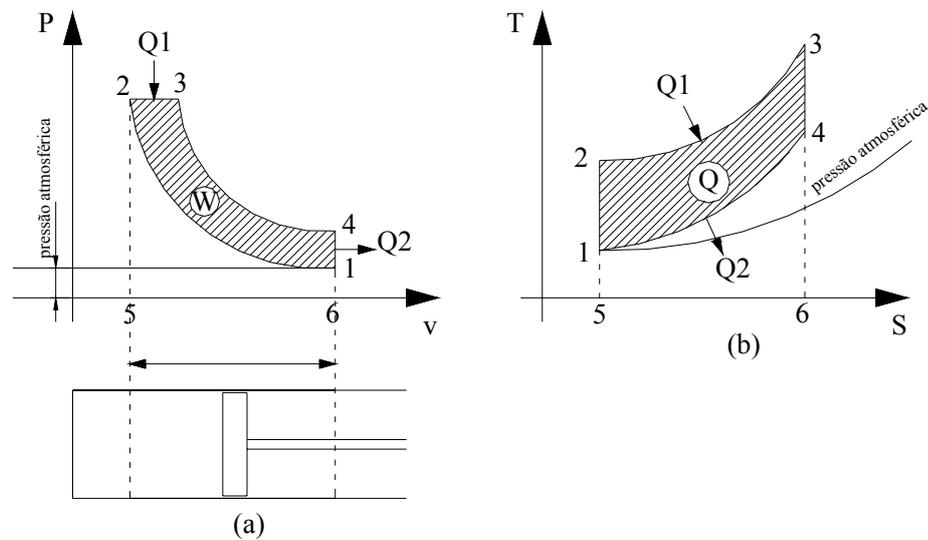


Figura 3.3 – Ciclo Diesel teórico em coordenadas (a) p-v e (b) T-S

onde P é a pressão, v é o volume, T é a temperatura, W é o trabalho produzido pelo fluido operante, Q_1 é o calor introduzido à pressão constante, Q_2 é o calor retirado a volume constante e S é a entropia interna do sistema.

$$\tau_i(\theta) = p_i(\theta) \cdot g(\theta) \quad (3.2)$$

onde $g(\theta)$ é função da posição angular, levando em conta a geometria do motor e θ é a variação do ângulo de manivela sendo $0 \leq \theta \leq 4\pi$.

Em geral, $p_i(\theta)$ e $\tau_i(\theta)$ são funções do tempo. Mas, a geometria do motor impõe uma periodicidade relativa ao ângulo de manivela (indicado pela função $g(\theta)$). Pesquisas freqüentemente relacionam os processos vinculados à combustão em motores de explosão com a variação do ângulo de manivela (θ). Isto permite uma análise ponto-a-ponto do

resultado de todas as reações dentro do motor. Comumente, nas referências bibliográficas, encontram-se gráficos como $p \times \theta$, $\alpha \times \theta$, $T \times \theta$, $P \times \theta$ e (taxa de transferência de calor) $\times \theta$.

A equação 3.3 apresenta a determinação de $p_i(\theta)$ a partir dos gráficos da figura 3.3.

$$p_i = \frac{\int p \cdot dv}{V_{cilindrada}} = \frac{\int dW}{V_{cilindrada}} \quad (3.3)$$

onde $\int dW$ representa o trabalho em um ciclo de 720°.

O trabalho fornecido pelo motor pode ser avaliado pela equação 3.4.

$$\dot{W} (kW) = \frac{p_i (bar) \cdot V_{cilindrada} (m^3) \cdot N (rev / s) \cdot n}{2 \times 10^{-2}} \quad (3.4)$$

onde n é o número de cilindros do motor.

Para fins de controle, o monitoramento da posição angular do motor é indispensável. Esta determina o momento exato de injeção de combustível e em função dela são calculadas e avaliadas as principais condições do motor.

3.4.1 Aspectos gerais dos motores Diesel

Os motores Diesel são os mais eficientes MCI. Bosch [4] salienta que motores Diesel podem apresentar um alto rendimento (em alguns casos, acima de 50%). Seu consumo é reduzido e têm baixa emissão de poluentes quando comparados com os motores à gasolina. Podem operar com vários combustíveis, que vão desde o óleo de carvoaria (remanescente do refino do Diesel e da gasolina) e, até mesmo, óleos vegetais. Existem dois fatores para a boa atuação dos motores Diesel:

- A eficiência térmica aumenta com o aumento da taxa de compressão e . Com a compressão, a temperatura do fluido de trabalho é aumentada, mas existe um limite natural para cada combustível inflamável. O motor Diesel evita os problemas de auto-

ignição do combustível (como "pancadas" oriundas da combustão que ocorrem antes do ponto morto superior (PMS) e problemas decorrentes da queima detonante) pela compressão do ar, que ocorre dentro dos cilindros. O combustível é injetado somente no ângulo desejado e a ignição ocorre espontaneamente e (quase) imediatamente.

- O torque é controlado pela mudança da relação ar/combustível (relação estequiométrica (λ)) da mistura a ser queimada. Devido ao extremo calor gerado pela compressão do ar no cilindro, várias razões de mistura ar/combustível são permitidas (variando de 1,4 a 7), tal que o estrangulamento do ar na admissão possa ser evitado.

O rendimento relativamente elevado, a economia de combustível e uma baixa emissão de poluentes, são fatores que estimulam pesquisas relacionadas a estes motores.

A equação 3.5 ilustra, conforme Giacosa [17], o rendimento de um motor de combustão interna.

$$\eta_i = \eta_m \cdot \eta_t \cdot \lambda_i \quad (3.5)$$

onde η_i é o rendimento total, η_m é o rendimento mecânico, η_t é o rendimento termodinâmico e λ_i é o rendimento volumétrico.

Para motores Diesel, o rendimento total é dado pela equação 3.6.

$$\eta_i = 1 - \left(\frac{1}{1 - e^{(k-1)}} \right) \cdot \left(\frac{\tau'^k - 1}{k(\tau' - 1)} \right) \quad (3.6)$$

onde k é a relação entre o calor específico à pressão constante e o calor específico a volume constante, τ' é a relação entre o volume inicial e o volume final da fase de combustão à pressão constante e e é a taxa de compressão.

Guzzella [18] chama a atenção para o fato de o ciclo de trabalho realizado pelo motor Diesel não diferir muito do ciclo termodinâmico ideal. Esta proximidade do ciclo ideal gera altos picos de temperaturas causando a geração de óxidos nitrosos (NO_x) na exaustão.

Para determinar a eficiência real do motor, os engenheiros costumam usar o consumo específico de combustível na frenagem (bsfc – break specific fuel consumption). Esta

grandeza é preferível, pois, segundo Ferguson [12], existem controvérsias quanto à aceitação universal de uma definição para rendimento térmico. O valor de bsfc é dado pela equação 3.7.

$$bsfc = \frac{\dot{m}_f}{P_b} \quad (3.7)$$

onde \dot{m}_f é a taxa de fluxo de combustível que flui para a câmara de combustão (g/s) e P_b é a potência de frenagem (W).

Assim, o torque é fornecido pela equação 3.8.

$$\tau = P_b \cdot \frac{30}{\pi N} \quad (3.8)$$

onde τ é o torque fornecido pelo motor ($N.m$) e N é a rotação do motor (rpm).

Com as equações 3.7 e 3.8 observa-se que a rotação depende do volume de combustível fornecido e da carga aplicada sobre o virabrequim. Controla-se a rotação máxima de operação, com relação à velocidade média do pistão. Isto é fundamental a fim de se evitarem esforços que superem os limites de resistência mecânicos dos componentes do motor. As velocidades de abertura e fechamento das válvulas também devem ser monitoradas, pois a partir de determinados níveis de rotação, começam a surgir efeitos indesejáveis. Em altas velocidades, em virtude da dinâmica dos fluidos, o enchimento dos cilindros é dificultado, reduzindo o rendimento volumétrico.

Um estudo de Garret [16] mostra que motores Diesel e à gasolina produzem as mesmas emissões, principalmente monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂), hidrocarbonetos não-queimados (HC), NO_x e outros particulados, mas em diferentes proporções. O CO presente nas emissões resulta da combustão incompleta de uma mistura rica de ar-combustível. A potência do motor Diesel é controlada pela quantidade de combustível injetada, sem alterar o fluxo de ar na admissão. Assim, o nível de CO na exaustão é, aproximadamente, zero. De acordo com Challen [6], as emissões de CO, para estes motores, estão normalmente bem abaixo dos limites previstos em algumas legislações.

Bosch [4] não considera o CO₂ presente na emissão como poluente, por ser um componente natural do ar atmosférico. Mas, é um dos principais agravantes do efeito estufa. O CO₂ nas emissões é proporcional ao consumo de combustível e o seu controle se dá pelo uso de combustíveis padronizados e pela redução do consumo. A redução do consumo pode ser obtida com um controle de injeção que gerencie a dosagem de combustível de forma mais adequada e precisa.

Os níveis de NO_x, HC e demais particulados são os principais alvos das legislações referentes à emissão dos motores Diesel. Outros particulados provêm do carbono não queimado, misturado com componentes sulfurosos e são considerados cancerígenos.

Um dos principais problemas do motor Diesel é o fato de a câmara de combustão não ser totalmente preenchida de ar durante a admissão, reduzindo a eficiência do motor. Outro problema reside na purificação dos gases de saída. O primeiro problema é minimizado com o turbo compressor, forçando-se mais ar para dentro do cilindro fazendo com que mais combustível seja queimado no mesmo volume. O segundo problema é resolvido através da recirculação dos gases de saída.

Deve-se observar que o uso de técnicas mais avançadas para o gerenciamento de injeção de combustível é capaz de aumentar o desempenho do motor, reduzindo ainda mais o consumo e a emissão de poluentes.

3.5 Controle da dosagem de combustível para motores Diesel

A quantidade de combustível Diesel é função das grandezas apresentadas nas equações 2.1, 2.2 e 2.3. O regulador de velocidade deve operar uma válvula injetora durante o tempo adequado e no momento adequado. Duas grandezas são fundamentais para controlar a injeção de combustível: o T_{INJ} e o α_i .

Quando o motor opera com um único combustível, a injeção é feita no final da compressão, alguns graus antes do PMS e no início da fase de combustão. O α_i depende do projeto do motor. No regime bi-combustível é necessário outro sistema injetor para o GN. Porém, a injeção de GN no motor Diesel é feita durante a admissão. O gás é misturado com o ar que entra na câmara de combustão. O injetor de gás comporta-se da mesma forma que o injetor de combustível normal. A injeção deve se iniciar pouco antes da fase de admissão (prevendo o intercruzamento das válvulas) e o tempo de duração é o necessário para manter o

funcionamento do motor ou levá-lo para o ponto de operação desejado. O T_{INJ} e o α_i corretos são determinados experimentalmente.

A literatura é ampla sobre a resolução dos problemas de controle e regulagem de motores Diesel. Em geral, a discussão limita-se a reguladores operando com um único combustível. Soluções para um controle mais eficaz do GN são pouco abordadas, apesar desse processo ser muito similar à injeção normal de combustível Diesel.

A maioria dos reguladores modernos de injeção para motores Diesel é projetada para operar sobre o atuador da cremalheira. Para os motores de ignição por compressão, injetores eletrônicos como os existentes para os motores a gasolina e álcool ainda são relativamente raros. Particularmente, o controle da velocidade apresenta grandes dificuldades devido aos problemas relativos à má injeção e a combustão durante a operação do motor a vazio. A dinâmica lenta é outro fator agravante para um bom dimensionamento de um controlador para motores Diesel.

Para exemplificar o problema da dinâmica, a equação 3.9 mostra uma síntese das componentes de torque envolvidas no funcionamento do motor.

$$T_e(\theta) = T_i(\theta) + T_{fp}(\theta) + T_r(\theta) \text{ para } 0 \leq \theta \leq 4\pi \quad (3.9)$$

onde T_e é o torque efetivo, que atua sobre o virabrequim, T_{fp} é a componente de perdas por atrito e na bomba e T_r é a contribuição de torque devido à inércia total do motor.

Ainda, deve-se considerar, na equação 3.12 que cada um dos termos é composto de uma componente média e outra variante no tempo, de acordo com a equação 3.10.

$$T_x(\theta) = T_x + \tau_x(\theta) \quad (3.10)$$

onde T_x é a componente constante, $\tau_x(\theta)$ é a componente variável no tempo e x é o sub-índice da componente em questão.

Cada uma das componentes da equação 3.9 tem suas próprias dependências de outras grandezas e, portanto, quanto maior a precisão desejada na modelagem, maior será a complexidade desta. Desenvolver controladores de injeção, a partir dos métodos tradicionais, requer uma modelagem matemática criteriosa e bastante sofisticada. Existem duas formas

para projetar um regulador para motores Diesel: através da modelagem matemática do motor ou pelo levantamento experimental dos parâmetros do motor e implementação de um controlador baseado nestes parâmetros. Resultados de trabalhos utilizando estas técnicas de modelagem foram apresentados no capítulo 2.

3.6 Lógica nebulosa (ou lógica fuzzy)

Em 1973, Zadeh apresentou o princípio da incompatibilidade:

À medida que a complexidade de um sistema aumenta, nossa habilidade para fazer afirmações precisas e que sejam significativas acerca desse sistema diminui até que um limiar é atingido além do qual precisão e relevância tornam-se características mutuamente exclusivas. Weber [43]

Mendel [27] resume da seguinte forma: "ao se fechar os olhos para os problemas do mundo real, o nebuloso torna-se a solução".

Tradicionalmente, a modelagem é feita matematicamente, usando-se equações algébricas, diferenciais e outros métodos de cálculo. A maioria das formas intuitivas de se modelar um processo analiticamente usa os princípios fundamentais da física. Tal modelagem, entretanto, requer um excelente domínio do aspecto físico e matemático do processo, o que pode não ser tão simples de se obter. Outro modo é realizar a identificação do sistema usando dados reais da planta para produzir um modelo caixa-preta (ou "black-box"). A estrutura dos modelos tipo caixa-preta normalmente não possuem conexão com a estrutura do sistema real e os parâmetros do modelo não têm significado físico.

Outro problema é que muitos algoritmos foram desenvolvidos para sistemas lineares. Entretanto, a maioria dos processos reais é não-linear (como é o caso de motores Diesel) e podem ser aproximados apenas localmente por modelos. Em outros casos, são feitas suposições simplificadoras que acabam por distorcer a realidade do processo. Por outro lado, existem casos em que a informação existente é imprecisa ou de qualidade insuficiente e não pode ser usada de modo efetivo pelas aproximações tradicionais de modelagem. Isto implica em que muitos processos ou não podem ser descritos matematicamente de forma adequada, ou suas descrições são muito complexas para ser de qualquer utilidade prática. Isto estimula o uso de técnicas de controle que não requeiram obrigatoriamente modelos matemáticos da planta, como é o caso dos controladores nebulosos ou das redes neurais.

3.6.1 Conjuntos nebulosos

Para Shaw [36], em sistemas com m terminais de entrada e p terminais de saída, pode-se aplicar certos sinais nas entradas e obter as respectivas saídas. A determinação das saídas do sistema implica em combinações desses $m \times p$ sinais, que são definidas por conjuntos.

A teoria de análise de sistemas e sinais estuda como as entradas afetam as saídas, isto é, como a entrada é mapeada pela saída. O sistema transforma a combinação de m conjuntos de entradas em p conjuntos de saídas. O mapeamento entrada-saída é fornecido por operações da teoria de conjuntos e o seu processo de obtenção é análogo às funções de transferência da teoria de sistemas lineares.

A pertinência de um elemento x em um conjunto A , simbolizada por \in é um dos princípios da teoria de conjuntos. Para se indicar esta pertinência usa-se a equação 3.14, cujo valor indica se o elemento x pertence ou não ao conjunto A . No caso da equação 3.11, $\mu_A(x)$ representa uma função bivalente.

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 1 & \text{se } x \in A \\ 0 & \text{se } x \notin A \end{cases} \quad (3.11)$$

onde $\mu_A(x)$ representa o grau de pertinência de x em A .

Na teoria dos conjuntos nebulosos, os conjuntos existentes no mundo real não possuem limites precisos. Assim, a transição da não-pertinência para a pertinência ocorre de forma gradual. Isso torna o conjunto nebuloso um agrupamento impreciso e indefinido.

A figura 3.4 apresenta um exemplo da transição de pertinências para a variável rotação (N) nos conjuntos nebulosos "baixa", "média" e "alta". Pode-se ver que a variável rotação não transita imediatamente de um estado para o próximo (ou de um conjunto para o outro). Pelo contrário, ela varia gradualmente o valor da sua pertinência em um estado, enquanto vai alterando o seu valor dentro do próximo estado.

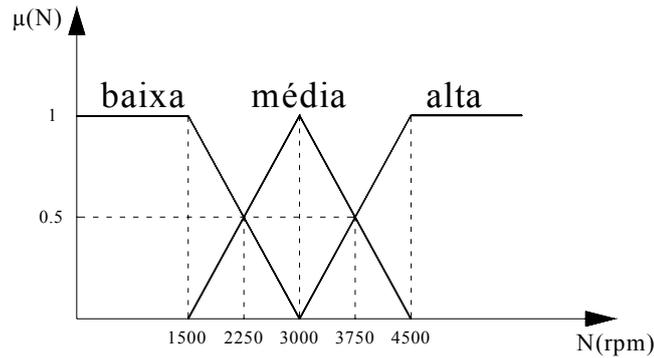


Figura 3.4 – Funções de pertinência da variável Rotação (N)

Na figura 3.4, iniciando-se em 1500 rpm, pode-se afirmar que a rotação vai tornando-se menos "baixa" e mais "média" até atingir 3000 rpm. Daí em diante, a rotação fica menos "média" e mais "alta" até atingir 4500 rpm, onde passa a ter um grau de pertinência $\mu_{alta}(N) = 1$. Seguindo este raciocínio, chega-se à definição básica de conjuntos nebulosos:

Se X é uma coleção de objetos denotada genericamente por x , então um conjunto nebuloso \tilde{A} em X é um conjunto de pares ordenados: $\tilde{A} = \{(x, \mu_{\tilde{A}}(x)) \mid x \in X\}$; onde $\mu_{\tilde{A}}(x)$ é chamado de função de pertinência ou grau de pertinência (também grau compatibilidade ou grau de verdade) de x em \tilde{A} o qual mapeia X no espaço de pertinência M (quando M contém somente os dois pontos "0" e "1", \tilde{A} é não-nebuloso e $\mu_{\tilde{A}}(x)$ é idêntico à função característica de um conjunto não-nebuloso) Zimmermann [46]

A faixa de variação da função de pertinência é um subconjunto dos números Reais não-negativos finitos. Elementos com grau zero de pertinência normalmente não são listados. Observa-se que os conjuntos nebulosos estabelecem uma conexão entre o raciocínio humano aproximado e a lógica executada pela máquina.

3.6.2 Controladores nebulosos baseados em regras

A principal característica do controle nebuloso é a geração de decisões de controle apropriadas, criadas através de descrições lingüísticas. Estas são representadas por regras baseadas em heurística, onde conhecimento e experiência são usados para controlar um determinado processo. Esta base de conhecimento é usada em conjunção com um

conhecimento do estado do processo por meio de um mecanismo de inferência capaz de determinar a ação de controle numa taxa adequadamente rápida.

Os sistemas nebulosos operam, simultaneamente, com dados numéricos e conhecimentos lingüísticos. O resultado é um mapa não-linear de um vetor de dados de entrada em uma saída escalar. Isto significa o mapeamento de números em números.

Os controladores nebulosos são simples. Eles consistem, basicamente, de três estágios:

1. Fuzzificador: que transforma os dados numéricos de entrada em informações nebulosas correspondentes;
2. Máquina de inferência fuzzy: composta de uma base de conhecimento (regras) e tomador lógico de decisões, integrado por mecanismos nebulosos de inferência e funções de aglutinação;
3. Defuzzificador: transforma a saída nebulosa do sistema em uma informação numérica.

A figura 3.5 apresenta a estrutura geral de um controlador nebuloso. A interface de fuzzificação, na entrada do controlador, mapeia os sensores (que usam números reais) ou outros tipos de entradas no domínio do mundo real para o domínio nebuloso, que usa números nebulosos. O mapeamento é realizado pelas pertinências da variável real nos conjuntos nebulosos, dentro de uma faixa de valores definidos pelo universo de discurso desta variável.

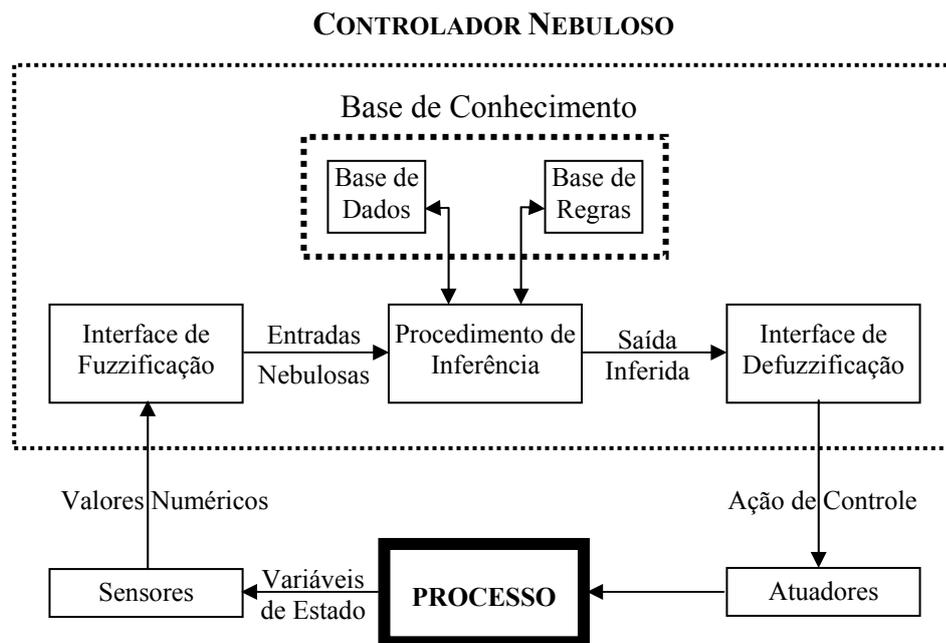


Figura 3.5 – Estrutura geral do controlador nebuloso

As regras nebulosas, conforme Kecman [22] possuem vários operadores, como E, OU e NÃO (AND, OR e NOT), que representam, respectivamente, as funções de intersecção, união e complemento de conjuntos. Os operadores composicionais MIN (representado pelo AND lógico) e MAX (representado pelo OR lógico) são usados com mais frequência em engenharia. Estes, junto com a regra composicional de inferência, realizam o mapeamento entre as variáveis de entrada (premissas) e as variáveis de saída (lei de controle). Muitas versões de operadores são possíveis, mas o mais conhecido é o operador MAX-MIN.

Para aplicar a lei de controle, é necessária uma defuzzificação do resultado. Existem vários métodos de defuzzificação, entre os mais usados estão o Centro de Área (CoA – Center of Area) ou Centro de Gravidade (CoG – Center of Gravity), Centro dos Máximos (Center of Maximum) e Média dos Máximos (MoM – Mean of Maxima).

O CoA calcula o centróide da área composta que representa o termo de saída nebulosa (μ_{OUT}). Essa saída nebulosa é composta pela união de todas as contribuições de regras. O centróide é um ponto que divide a área μ_{OUT} em duas partes iguais. A equação 3.12 descreve este método, que calcula a área do centróide composto, ao qual contribuem as respectivas funções de pertinência.

$$u^{CoA} = \frac{\sum_{i=1}^N u_i \mu_{OUT}(u_i)}{\sum_{i=1}^N \mu_{OUT}(u_i)} \quad (3.12)$$

onde μ_{OUT} é a área de uma função de pertinência, modificada pelo resultado da inferência nebulosa e u_i é a área do centróide da função de pertinência individual.

O método CoA apresenta alguns problemas como: (1) o fato de não se ter um único centro de área quando as funções de pertinência não possuem sobreposição; assim, o centro geométrico resultante não tem significado físico; (2) quando mais de uma regra tiver a mesma saída nebulosa com sobreposição de áreas, uma das regras não será devidamente contabilizada.

O método CoM é capaz de gerar uma ação de controle obtida pelo valor ponderado de todas ações de controle locais. As áreas não são calculadas e uma média é feita sobre o grau de pertinência das variáveis obtidas e seus valores. Neste método, os picos das funções de

pertinência, representados no universo de discurso da variável de saída são usados. As contribuições das regras são consideradas conforme a equação 3.13.

$$u^{CoM} = \frac{\sum_{i=1}^N u_i \cdot \sum_{k=1}^n \mu_{0,k}(u_i)}{\sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^n \mu_{0,k}(u_i)} \quad (3.13)$$

onde $\mu_{0,k}(u_i)$ são os pontos onde ocorrem os máximos das funções de pertinência de saída.

O MoM seleciona o valor mais plausível entre os obtidos e despreza os demais, desconsiderando o formato das funções de pertinência da saída. MoM realiza a média de todos os máximos, conforme a equação 3.14.

$$u^{MoM} = \sum_{m=1}^M \frac{u_m}{M} \quad (3.14)$$

onde u_m é o m-ésimo elemento do universo de discurso, onde a função $\mu_{OUT}(u_i)$ tenha um máximo e M , é o número total destes elementos.

CoM e CoA resultam na solução com o "melhor ajuste", MoM resulta na solução "mais plausível". Em controle, CoM é mais usado pois sua saída representa o melhor ajuste dos resultados inferidos. MoM é usado em padrões de reconhecimento e aplicações de classificação, onde soluções mais plausíveis são mais apropriadas.

Funções de pertinência complexas não implicam em resultados melhores para os valores de saída. A figura 3.10 mostra os conjuntos nebulosos mais usados em engenharia. Na figura 3.11, com exceção da Gaussiana, é possível observar que todas as funções de pertinência são casos específicos das equações 3.15a e 3.15b.

Para Kecman [22] qualquer função do tipo $\mu(x) \rightarrow [0,1]$ pode descrever uma função de pertinência associada a algum conjunto nebuloso.

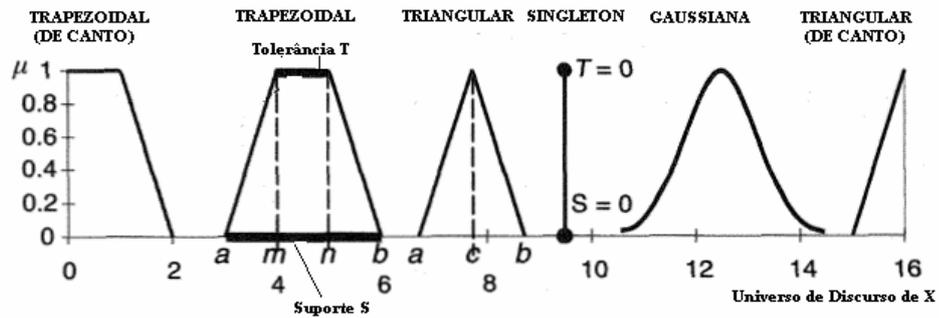


Figura 3.6 – Conjuntos nebulosos mais comuns em aplicações de engenharia

$$\mu(x) = \begin{cases} 0 & \text{se } x < a \\ \frac{x-a}{c-a} & \text{se } x \in [a, c] \\ \frac{b-x}{b-c} & \text{se } x \in [c, b] \\ 0 & \text{se } x > b \end{cases} \quad (3.15a)$$

$$\mu(x) = \begin{cases} 0 & \text{se } x < a \\ \frac{x-a}{m-a} & \text{se } x \in [a, m] \\ 1 & \text{se } x \in [m, n] \\ \frac{b-x}{b-n} & \text{se } x \in [n, b] \\ 0 & \text{se } x > b \end{cases} \quad (3.15b)$$

onde a e b denotam os limites inferior e superior (isto é, as "coordenadas" do suporte S), c é o centro do triângulo, m e n denotam as "coordenadas" da tolerância.

3.7 O controlador de Mamdani – descrição e projeto

O controlador de Mamdani descreve os estados de um processo usando variáveis lingüísticas como entradas, que servem para controlar as regras. O método de raciocínio nebuloso de Mamdani é baseado em operadores de inferência MAX-MIN.

O desenvolvimento deste tipo de controlador inicia-se com a definição dos termos para as variáveis de entrada. A variável base é uma entrada, medida ou derivada a partir de um sinal medido ou uma variável de saída do controlador. Por exemplo, as variáveis bases podem ser: a rotação lida no eixo da máquina, rotação de referência, diferença (erro) entre a rotação lida e a referência, taxa de variação do erro, e assim por diante. Os termos das variáveis lingüísticas são conjuntos nebulosos com um determinado formato. É comum usar conjuntos nebulosos triangulares ou trapezoidais, face a sua eficiência computacional.

Deve-se descrever os termos de cada variável lingüística $VL_1 \dots VL_n$ por suas funções de pertinência $\mu_i^j(x)$ onde i indica a variável lingüística, $i = 1 \dots n$; j indica o termo da variável lingüística i , $j = 1, \dots, m(i)$, e $m(i)$ é o número de termos da variável lingüística i . A quantidade de variáveis lingüísticas e o número de termos de cada variável lingüística determinam o número de regras possíveis. Na maioria das aplicações, certos estados podem ser desprezados, tanto por causa de sua impossibilidade de ocorrência quanto pelo fato de que uma ação de controle não seria útil. É suficiente, descrever regras que cubram apenas as partes do espaço de estado que realmente interessam.

As regras conectam as variáveis de entrada com as de saída e baseiam-se na descrição de estado nebulosa que é obtida pela definição das variáveis lingüísticas. Formalmente, as regras podem ser descritas como na equação 3.16.

$$\text{Regra } r : \text{SE } x_1 \text{ é } S_1^{j_1} \text{ E } x_2 \text{ é } S_2^{j_2} \text{ E } \dots \text{ E } x_n \text{ é } S_n^{j_n}, \text{ ENTÃO } u \text{ é } S^j \quad (3.16)$$

onde $S_n^{j_n}$ é o j -ésimo termo da variável lingüística, i corresponde à função de pertinência $\mu_i^j(x)$, S^j corresponde à função de pertinência e $\mu^j(u)$ representa um termo da variável da ação de controle.

A base de regras em sistemas com duas entradas e uma saída pode ser visualizada em uma tabela onde as linhas e as colunas são divididas de acordo com os termos das variáveis de entrada (antecedentes). Os índices (entradas) da tabela são os conseqüentes, resultantes das associações das entradas. As entradas vazias referem-se a estados sem regras explicitamente definidas. Shaw [36] sugere que as entradas sem decisões podem ser tratadas com base na regra "cuja vizinhança está mais próxima", onde regras próximas das imediatas são utilizadas.

As definições de variáveis lingüísticas e de regras são as principais etapas quando da implementação do controlador de Mamdani. Antes da última etapa do projeto, que é a escolha do procedimento para a defuzzificação, apresenta-se como acionar os valores de entrada para computar a ação e controle. O processo pode ser descrito por três etapas:

1. Determinação do grau de pertinência da entrada sobre o antecedente da regra;
2. Computação dos conseqüentes das regras;

3. Agregação dos conseqüentes das regras para associá-las ao conjunto nebuloso da "ação de controle".

Na primeira etapa calculam-se os graus de pertinência das variáveis de entrada, com relação aos antecedentes das regras. Usando-se o operador mínimo (MIN) como modelo para o "AND", o grau de participação da regra r é apresentado na equação 3.17.

$$\alpha_r = \min_{i=1,\dots,n} \{\mu_i^{j_i}(x_i^{entrada})\} \quad (3.17)$$

A equação 2.13 permite obter a validade dos conseqüentes da regra. Assume-se que regras com baixo grau de pertinência nos antecedentes também tenham pequeno grau de validade sobre os conseqüentes e cortem os conjuntos nebulosos conseqüentes na altura correta da função de pertinência antecedente. Isto é explicitado pela equação 3.18.

$$\mu_r^{conseq}(u) = \min\{\alpha_r, \mu^j(u)\} \quad (3.18)$$

O resultado desta avaliação é obtido pela agregação de todos os conseqüentes, com o operador MAX. A ação de controle do conjunto nebuloso é fornecida pela equação 3.19.

$$\mu^{conseq}(u) = \max_r \{\mu_r^{conseq}(u)\} \quad (3.19)$$

Este cálculo é um caso especial do processo de inferência. Outros métodos de inferência podem ser aplicados. A metodologia de Mamdani considera todas as regras em um único estágio e que nenhum encadeamento ocorre. A inferência no controle nebuloso é mais simples que na maioria dos sistemas especialistas.

Desde que processos técnicos requeiram ações de controle exatas, um procedimento que gera um valor exato fora de um conjunto nebuloso é necessário. Os métodos de defuzzificação baseiam-se em idéias heurísticas como "tome a ação que corresponde à máxima pertinência" ou "tome a ação que fique a meio-caminho entre dois picos ou ao centro do platô". Para aplicações em malha fechada, a propriedade de continuidade é importante, pois se a saída do controlador nebuloso controla uma variável do processo, falhas na saída do controlador podem gerar instabilidades e oscilações. Logo, é prudente fazer a opção pelo

método CoM de defuzzificação. Este método garante a continuidade da saída, possui fácil implementação matemática e é compatível com funções de pertinência triangulares.

3.8 Resumo deste capítulo

Este capítulo procurou fornecer os elementos teóricos necessários à compreensão dos processos dinâmicos operacionais dos motores de combustão interna e, particularmente, dos motores Diesel. Os princípios teóricos que cercam os controladores para motores Diesel também foram abordados.

Estudaram-se neste capítulo os preceitos fundamentais para a construção de um controlador baseado em um algoritmo nebuloso.

CAPÍTULO 4

MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Introdução

Neste capítulo é apresentada a modelagem, seleção e desenvolvimento do projeto do controlador nebuloso para gerenciar a injeção de GN. Este é usado para o acionamento do atuador de um sistema injetor para motor Diesel operando no regime bi-combustível. O controlador processa os valores numéricos de entrada e saída e das regras lingüísticas nebulosas SE-ENTÃO (IF-THEN). A idéia principal é gerar regras nebulosas a partir dos pares de entrada-saída. Após, reúnem-se estas regras e os termos lingüísticos em uma única base de regras nebulosas e constrói-se um sistema lógico nebuloso final, estruturado sobre este conjunto de regras desenvolvidas.

Estão presentes neste capítulo informações referentes a planta estudada, aos algoritmos e programas desenvolvidos e aos equipamentos utilizados.

4.2 Estrutura do controlador e caracterização da planta

Estudaram-se os princípios básicos de operação dos motores Diesel, a fim de se determinarem as variáveis a serem monitoradas para o gerenciamento destes equipamentos. Observa-se que é suficiente gerenciar o tempo de injeção (T_i) e o ângulo de injeção (α_p). Controlando-se estas variáveis, a ignição se dá por intervalos de tempos regulares. É dispensado o controle da massa de ar e da temperatura do ar de entrada em motores Diesel.

O ângulo de injeção de combustível Diesel é uma característica de projeto do motor. Alterações no ângulo de injeção podem incorrer em aumento ou redução da performance do mesmo, mas o tempo de injeção ainda é prioritário. Estas alterações podem não surtir bons efeitos na operação do motor. O ângulo de injeção de combustível Diesel que produza os melhores resultados de desempenho e consumo pode ser verificado experimentalmente. Neste

trabalho, optou-se em manter o ângulo de injeção de combustível Diesel fixo. O ângulo mais adequado para injeção de GN é obtido a partir de ensaios experimentais.

O protótipo do controlador apresentado destina-se a ser de fácil adaptação para diferentes motores. Como referência, tomou-se um motor Diesel, cujas características são dadas no quadro 4.1.

Marca do motor	Agrale
Modelo	M90
Número e disposição dos cilindros	1 (um), vertical
Diâmetro nominal do cilindro	90 mm
Curso do pistão	105 mm
Ciclo	Diesel
Número de tempos	4 tempos
Relação de compressão	19 : 1
Cilindrada total	668 cm ³ (0,668 litros)
Sistema de combustão	injeção indireta
Peso	140 kg
Sistema de partida	manivela
Sistema de arrefecimento	a ar forçado, com turbina no volante.
Rotação normal (STD):	1800 a 2750 rpm
Potência máxima nominal	8,826 kW (12 cv) a 2750 rpm
Torque máximo nominal	34.58 Nm (3,63 kgf.m) a 1800 rpm

Quadro 4.1 - Características técnicas do motor usado nos experimentos



Figura 4.1 – Motor utilizado nos experimentos

Este motor possui uma bomba com pistão dosador de fabricação BOSCH, modelo PFR 1K 70 A152/2. Esta é acionada por um came existente na árvore de comando de válvulas. Os controles de injeção de combustível Diesel e de rotação deste motor baseiam-se em um sistema mecânico de cremalheira e contrapesos. O sistema mecânico de injeção de

combustível Diesel não foi alterado, pois o foco deste trabalho é somente o gerenciamento do gás fornecido ao motor.

O controle do volume de gás injetado e o tempo de injeção são feitos através de um microcontrolador que comanda um atuador. A partir de análises teóricas e experimentos de outros autores (Fulks [13], Li [23], Passarini [30] e outros), observou-se que o atuador, quando usado em motores Diesel, apresenta não-linearidades, possuindo características variáveis com o tempo e sendo afetado pela variação de temperatura. A equação 4.1 representa o atuador da figura 4.2.

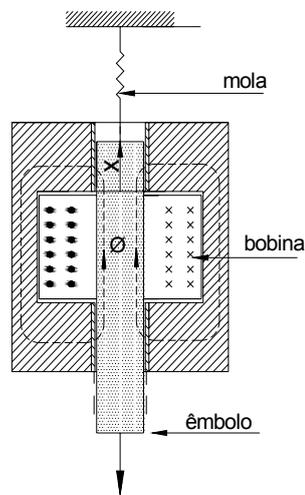


Figura 4.2 – Esquema elementar do atuador eletromagnético

$$m\ddot{x} + b\dot{x} + kx + f(x, \dot{x}) = u \quad (4.1)$$

onde m é a massa das partes móveis, b é coeficiente de amortecimento, k é o coeficiente de elasticidade da mola, x é a posição (deslocamento linear do êmbolo do injetor), $f(x, \dot{x})$ inclui a fricção e outras forças não-modeladas e u é força magnética do solenóide.

A força magnética do solenóide é representada pela equação 4.2.

$$u = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL(x)}{dx} \quad (4.2)$$

onde u é a força eletromagnética do solenóide, i é a corrente circulante e $L(x)$ é a indutância do núcleo eletromagnético.

As forças não-modeladas do termo $f(x, \dot{x})$ impõem restrições à implementação de um modelo analítico. Para este caso, um controlador PID poderia ser usado, mas experiências

apresentadas por outros autores (Fulks [13], Li [23], Passarini [30] e outros) indicam que o controlador PID: (1) ou não seria capaz de vencer as não-linearidades do motor e (2) se pudesse vencê-las, a resposta seria muito longa no caso de ocorrência de um sobre-estágio ou aumentos da escala da ação de controle. Portanto, um método de controle ON/OFF+Nebuloso é apresentado aqui.

Como a faixa de ação do atuador é muito grande, para se obter uma melhora na precisão optou-se pela implementação de um controlador ON/OFF+nebuloso, onde uma regra de chaveamento é usada. Se o desvio (ERRO) é grande, usa-se o controle ON/OFF, caso contrário, usa-se a ação de controle nebulosa. A ação de controle nebulosa baseia-se no controlador de Mamdani. A determinação dos parâmetros do controlador foi feita de forma heurística, aliada aos ensaios experimentais. A arquitetura do controle ON/OFF+Nebuloso é mostrada na figura 4.3. A regra de chaveamento, que determina a ação de controle (ON/OFF ou Nebulosa) é expressa de acordo com os critérios apresentados na equação 4.4.

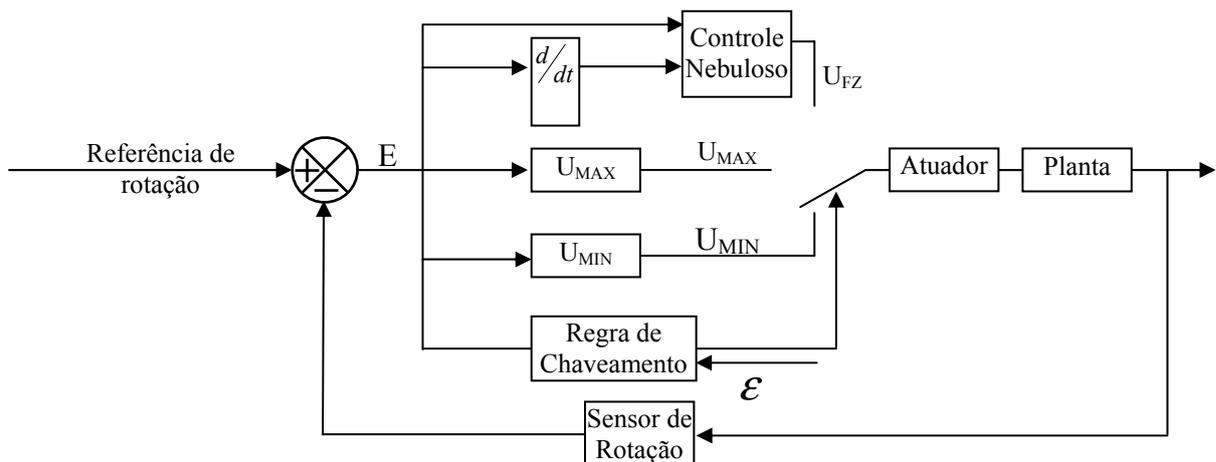


Figura 4.3 – Mapa do controle ON/OFF+Nebuloso

SE	$ E \leq \varepsilon$		ENTÃO	$u = U_{FZ}$	(4.3)
SE	$ E > \varepsilon$	E	$E > 0$ ENTÃO	$u = U_{MAX}$	
SE	$ E < \varepsilon$	E	$E < 0$ ENTÃO	$u = U_{MIN}$	

onde E é o erro, ε é a constante de chaveamento, u representa a saída do controlador, U_{MAX} é o valor máximo de saída do controlador, U_{MIN} é o valor mínimo de saída do controlador e U_{FZ} é a saída processada pela ação de controle nebulosa.

Neste trabalho, as duas entradas, erro (E) e variação do erro (DE ou dE/dt), e a saída do controlador nebuloso (U) são definidas de acordo com os conjuntos da equação 4.4.

$$\begin{aligned}
E &= \{VN, N, SN, Z, SP, P, VP\} \\
DE &= \{VN, N, SN, Z, SP, P, VP\} \\
U &= \{HD, D, SD, S, SI, I, HI\}
\end{aligned} \tag{4.4}$$

onde E é o erro, DE é a variação do erro, U é a saída do controlador (tempo de injeção), VN (very negative), N (negative), SN (small negative), Z (zero), SP (small positive), P (positive) e VP (very positive) são as variáveis lingüísticas usadas para classificar as entradas, HD (high decrement), SI (small increment), D (decrement), I (increment), SD (small decrement), HI (high increment) e S (steady) são as variáveis lingüísticas usadas para classificar a saída.

O uso de 7 funções lingüísticas para cada uma das variáveis de entrada possibilita a geração de até 49 regras de agregação diferentes. Estas regras podem ser adaptadas de acordo com as necessidades de controle da planta. Isso confere uma flexibilidade maior no desenvolvimento do controlador. O controlador depende da determinação heurística das ações de controle, obtidas a partir de ensaios realizados e conhecimento prévio da planta.

Com o motor do quadro 4.1 como referência, adotaram-se os limites de operação apresentados no quadro 4.2. O tempo de injeção mínimo e a rotação mínima são os valores referentes ao regime de marcha lenta do motor.

N_{\min}	$\cong 1800 \text{ rpm}$
N_{\max}	$\cong 2800 \text{ rpm}$
$T_{INJ \min}$	$\cong 1 \text{ ms}$
$T_{INJ \max}$	$\cong 11 \text{ ms}$
α_i	$\cong 180^\circ$ antes do PMS (Durante a fase de admissão e determinado experimentalmente)

Quadro 4.2 – Valores limites usados como referência

A equação 4.5 apresenta as faixas de operação do controlador. Nesta equação o valor da constante de chaveamento foi considerado $\varepsilon = 120 \text{ rpm}$. Estes valores foram obtidos a partir de conhecimento prévio da planta e de ensaios realizados. As referências do comportamento do motor originam-se dos resultados alcançados por Camargo [5].

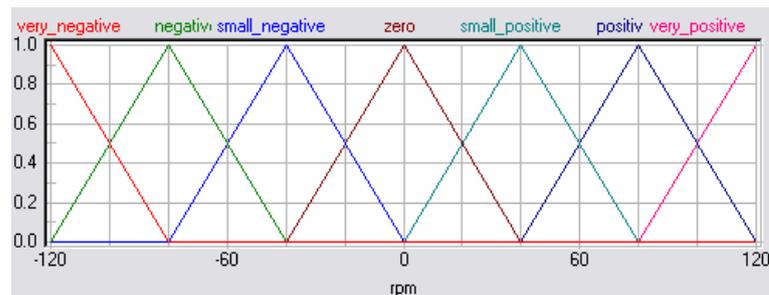
$$\begin{array}{llll}
\text{SE } |E| \leq 120 \text{ rpm} & & \text{ENTÃO} & u = U_{FZ} \\
\text{SE } |E| > 120 \text{ rpm} & \text{E} & E > 0 \text{ ENTÃO} & u = 11 \text{ ms} \\
\text{SE } |E| < 120 \text{ rpm} & \text{E} & E < 0 \text{ ENTÃO} & u = 1 \text{ ms}
\end{array} \tag{4.6}$$

A equação 4.7 apresenta as faixas de variação admissíveis para E e DE .

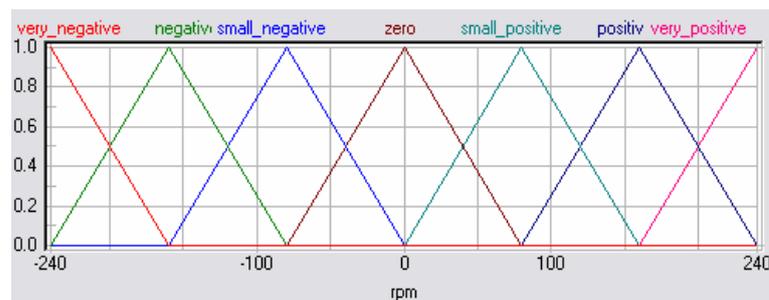
$$\begin{aligned} -120 \text{ rpm} &\leq E \leq 120 \text{ rpm} \\ -240 \text{ rpm} &\leq DE \leq 240 \text{ rpm} \end{aligned} \quad (4.7)$$

Estas faixas de variação para E e DE facilitam a implementação em um microcontrolador de 8 bits. Com estes limites de E e DE podem-se determinar os conjuntos nebulosos para estas entradas. Estes conjuntos nebulosos são apresentados na figura 4.4.

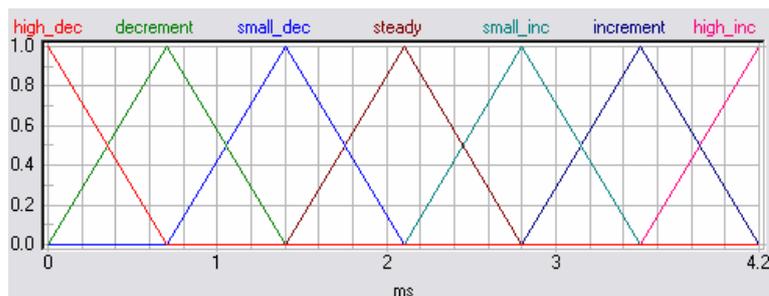
O bloco de regras, gerado heurísticamente para este controlador, pode ser visualizado no quadro 4.3. Este bloco foi determinado com uma análise prévia, baseado em testes do comportamento do motor. Este bloco pode ser modificado de acordo com as necessidades de ajustes da planta, conforme o comportamento apresentado durante sua operação. O quadro 4.2 apresenta o bloco de regras nebulosas. As definições dos termos usados neste quadro são apresentadas na equação 4.2.



(a)



(b)



(c)

Figura 4.4 – Funções de pertinência para (a) E , (b) DE e (c) Tempo de injeção

		<i>E</i>						
		<i>VN</i>	<i>N</i>	<i>SN</i>	<i>Z</i>	<i>SP</i>	<i>P</i>	<i>VP</i>
<i>DE</i>	<i>VN</i>	<i>SD</i>	<i>SD</i>	<i>SD</i>	<i>SD</i>	<i>SI</i>	<i>I</i>	<i>HI</i>
	<i>N</i>	<i>D</i>	<i>SD</i>	<i>SD</i>	<i>SD</i>	<i>SI</i>	<i>I</i>	<i>HI</i>
	<i>SN</i>	<i>HD</i>	<i>D</i>	<i>SD</i>	<i>SD</i>	<i>HI</i>	<i>I</i>	<i>HI</i>
	<i>Z</i>	<i>S</i>						
	<i>SP</i>	<i>SD</i>	<i>SD</i>	<i>SD</i>	<i>SI</i>	<i>I</i>	<i>I</i>	<i>HI</i>
	<i>P</i>	<i>SD</i>	<i>D</i>	<i>D</i>	<i>SI</i>	<i>SI</i>	<i>SI</i>	<i>I</i>
	<i>VP</i>	<i>HD</i>	<i>HD</i>	<i>HD</i>	<i>SI</i>	<i>SI</i>	<i>I</i>	<i>SI</i>

Quadro 4.3 – Bloco de regras para o controlador

A figura 4.5 apresenta o gráfico tridimensional da máquina de inferência deste controlador. Este gráfico foi construído com base no bloco de regras do quadro 4.3. Nesta figura, as unidades de E e DE estão em rotações por minuto e T_{INJ} está em milissegundos. A barra abaixo do gráfico em 3D representa a graduação dos valores de saída.

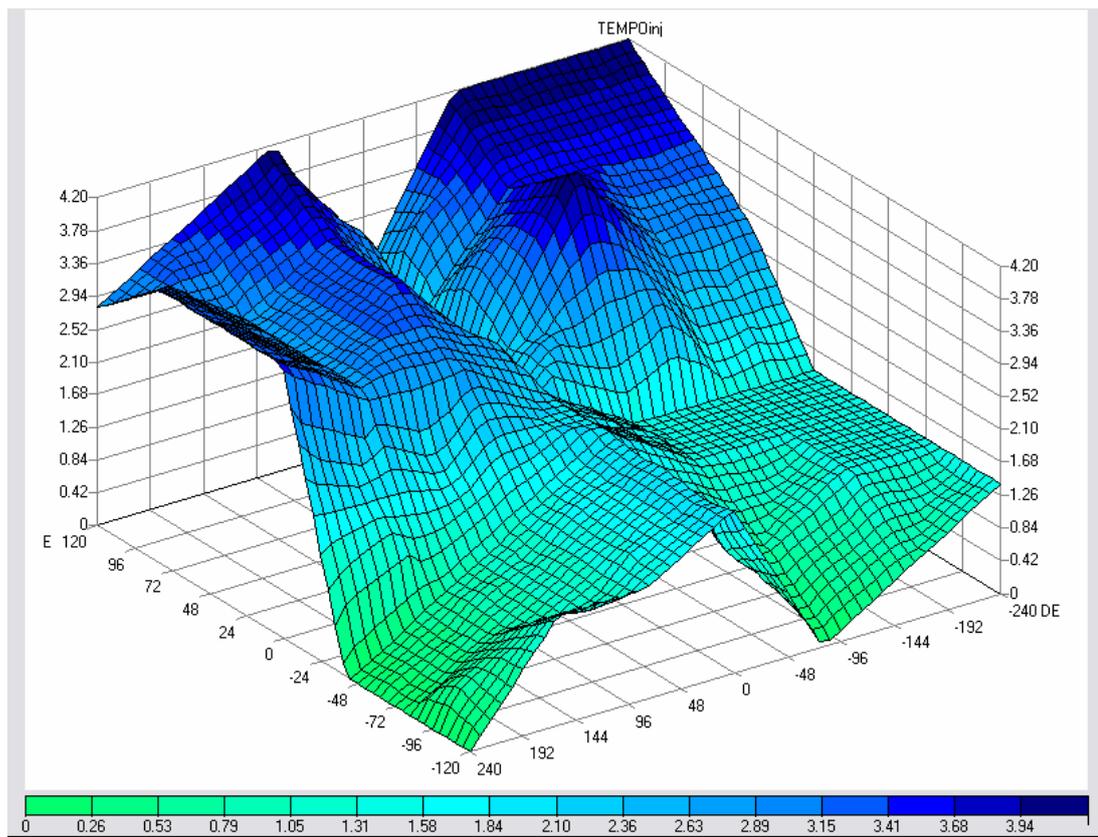


Figura 4.5 – Gráfico em 3D do bloco de regras do quadro 4.3

Para a aplicação no microcontrolador usado neste trabalho, foram feitos ajustes no modo de entrada de dados do controlador nebuloso. A faixa de valores de entrada do erro e da variação do erro foi compatibilizada com a capacidade de processamento do

microcontrolador. Para facilitar o processamento de cálculos com números negativos, adotaram-se os critérios apresentados na equação 4.8.

$$\begin{aligned} -120 \text{ rpm} \leq ERRO \leq 120 \text{ rpm} &\rightarrow 0 \leq ERRO \leq 255 \\ -240 \text{ rpm} \leq DERRO \leq 240 \text{ rpm} &\rightarrow 0 \leq DERRO \leq 255 \end{aligned} \quad (4.8)$$

Assim, transferiu-se a faixa de valores do erro e da variação do erro do conjunto dos números reais para o conjunto dos números reais positivos e inteiros. Adotaram-se valores de 8 bits para facilitar a manipulação dos dados dentro do microcontrolador. É possível a obtenção de maiores resoluções usando-se valores superiores a 8 bits, mas o processamento se torna mais complexo. Para fins experimentais, mantiveram-se as variáveis na faixa de 0 a 255.

Outros valores que necessitam de adaptações para o processamento no microcontrolador são os graus de pertinência dos conjuntos nebulosos. Uma vez observada a dificuldade para a realização de cálculos com números não-inteiros na linguagem em assembler, optou-se pela conversão representada pelas equações 4.9 e 4.10. A equivalência para os graus de pertinência usados matematicamente e implementados no microcontrolador são apresentados na equação 4.10. Nesta equação, o grau de pertinência, tradicionalmente compreendido entre 0 e 1 na teoria de conjuntos nebulosos, passa ser compreendido entre 0 e 255. Os graus de pertinência passam a ser ZERO (0) para valores totalmente não-membros da função de pertinência e 255 para valores totalmente membros da função.

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 255 & \text{se } x \in A \\ 0 & \text{se } x \notin A \end{cases} \quad (4.9)$$

$$0 \leq \mu_A(x) \leq 1 \leftrightarrow 0 \leq \mu_A(x) \leq 255 \quad (4.10)$$

O método de defuzzificação adotado é CoM, representado pela equação 4.11. Este método se adapta às necessidades do controlador e também é de simples implementação matemática.

Outros detalhes do algoritmo de controle encontram-se no apêndice A. Neste apêndice, todas as sub-rotinas executadas pelo controlador são apresentadas e discutidas, quando necessário.

$$u^{CoM} = \frac{\sum_{i=1}^N u_i \cdot \sum_{k=1}^n \mu_{0,k}(u_i)}{\sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^n \mu_{0,k}(u_i)} \quad (4.11)$$

onde $\mu_{0,k}(u_i)$ são os pontos onde ocorrem os máximos das funções de pertinência de saída.

4.3 Desenvolvimento do protótipo

Este item apresenta o protótipo e os programas desenvolvidos para a prototipagem do controlador híbrido (ON/OFF+nebuloso) para o motor de ignição por compressão que opera no regime bi-combustível, usando óleo Diesel e Gás Natural.

4.3.1 Sensores

Para que seja fornecida a quantidade adequada de combustível e na posição angular correta do motor, a CPU deve obter a rotação do motor e a posição de cada cilindro.

O sensor de rotação e PMS (sensor indutivo) gera o sinal de rotação do motor e fornecer a posição angular da árvore de manivelas. O sensor gera uma tensão alternada quando a roda fônica (ou coroa dentada ou roda dentada) gira. Esta tensão é de aproximadamente 200 mV quando a rotação do motor está abaixo de 60 rpm e 120 V quando a rotação do motor está acima de 6000 rpm. A roda possui 58 dentes (60-2) com um espaço vazio, onde faltam dois dentes. O vazio indica o ponto morto superior (PMS) do pistão. A amplitude da tensão gerada depende da distância da roda em relação ao sensor. O cabo do sensor é blindado e aterrado à unidade de comando para limitar as interferências. As características do conjunto sensor/roda fônica usados neste trabalho são:

- Fabricante: Magnetti-Marelli, Modelo SEN8D3-3;
- Distância entre sensor e roda fônica: 0,5 a 1,5 mm (regulável);
- Resistência enrolamento: 1150 a 1400 Ω a 20°C (dados de fábrica).

Na figura 4.6(b) pode-se ver a sinal de saída do sensor indutivo. A falha dos 2 dentes da roda fônica gera uma distorção que indica a passagem do 1º cilindro pelo PMS.

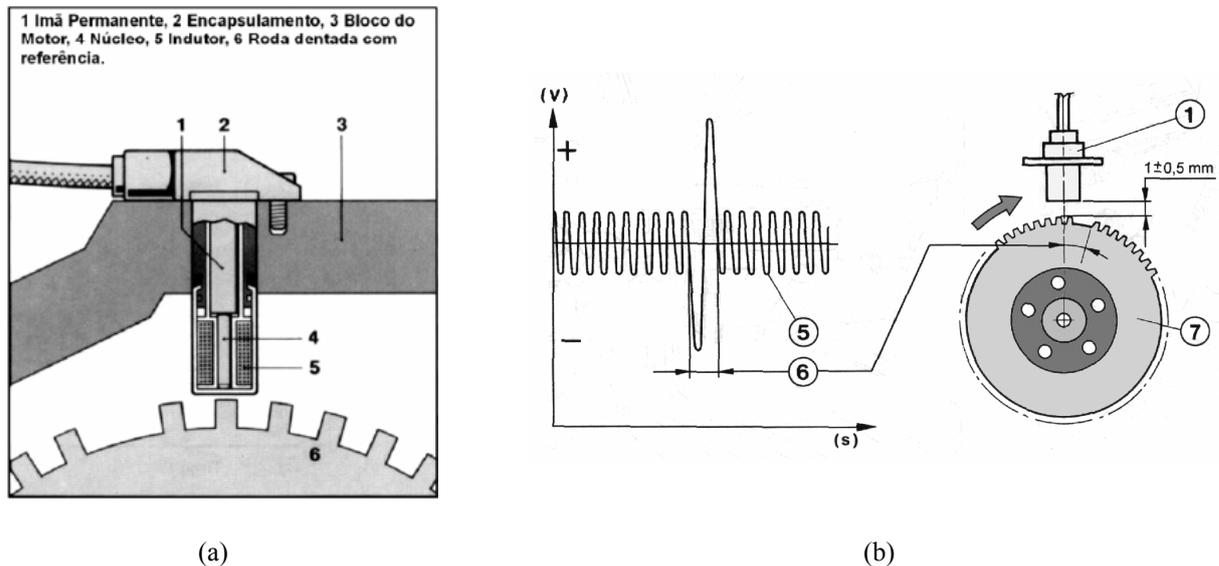


Figura 4.6 - (a) Sensor de Rotação Indutivo e (b) Detalhe da montagem do grupo sensor/corona

Fonte: Bosch [3]

O sinal senoidal fornecido pelo sensor indutivo é convertido para uma forma de onda quadrada e submetido a um processo de digitalização para ser usado pela CPU. Este sinal de onda quadrada é processado da seguinte forma:

1. A CPU detecta a transição positiva do sinal e registra a ocorrência do pulso;
2. Na transição positiva do pulso seguinte, a CPU armazena o tempo de duração do pulso anterior e inicia uma nova contagem de tempo. Com o intervalo de tempo registrado determina-se a frequência do sinal de entrada.
3. Para determinar a ocorrência da falha na roda, a CPU identifica se a largura do pulso atual é maior que o dobro da largura do pulso anterior.

Para garantir maior precisão, neste trabalho a CPU calcula a média das 4 últimas larguras de pulso, conforme apresentado na figura 4.7 e equação 4.12. Assim, se obtém a rotação do motor em rotações por minuto (rpm) ou em Hertz (Hz).

Cada pulso indica a variação de 6° da posição angular do eixo. Com o resultado da equação 4.12 obtém-se o valor (em graus) da posição angular do motor e a variação angular (em °/s ou rad/s). Este resultado fornece com precisão a posição exata do ângulo de injeção.

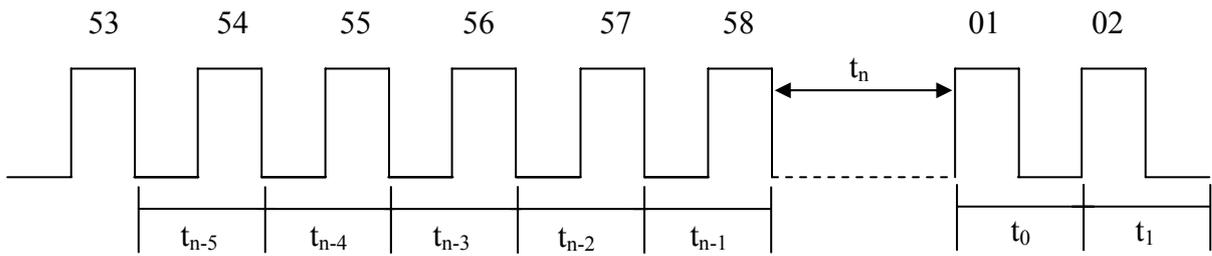
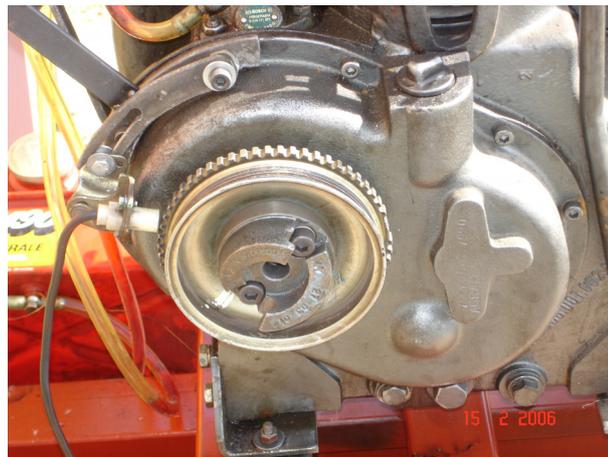


Figura 4.7 - Medição da largura de pulsos

$$t_{\text{médio}} = \frac{t_{n-3} + t_{n-2} + t_{n-1} + t_n}{4} \quad (4.12)$$

onde $t_{\text{médio}}$ é a média das 4 últimas larguras de pulso e t_n é a largura do último pulso registrado.

A figura 4.8 apresenta a montagem do conjunto sensor/roda fônica no motor Agrale.



(a)



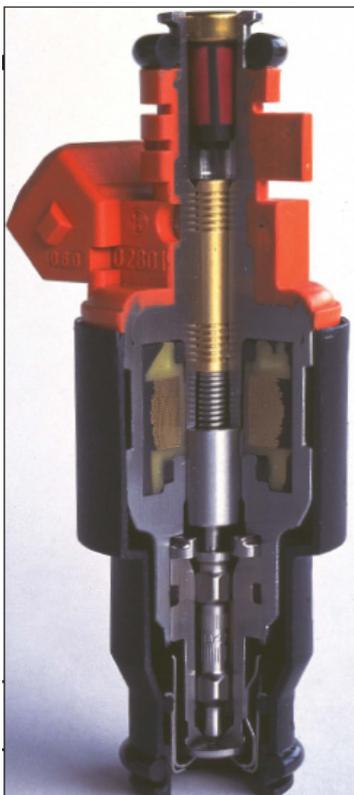
(b)

Figura 4.8 – Montagem do conjunto sensor/roda fônica no motor Agrale

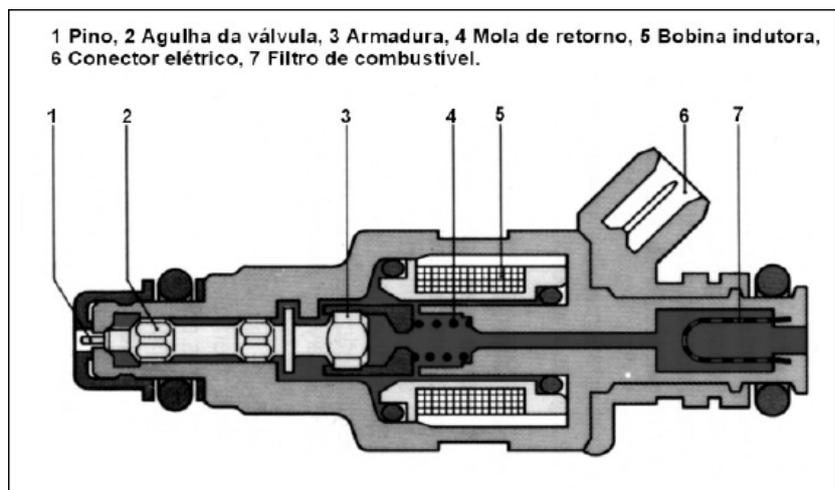
4.3.2 Atuador

A injeção (ou dosagem) do combustível se dá através do atuador eletromagnético (bico injetor ou válvula injetora). A figura 4.9 mostra os detalhes de um injetor similar ao utilizado neste trabalho. Trata-se de um injetor projetado para veículos à gasolina. O deslocamento do êmbolo (agulha injetora) varia entre 60 a 100 μm . Em função do tipo de injeção, rotação do motor e carga, o tempo de ativação é variável, da ordem de milissegundos e a frequência de ativação pode estar na faixa de 3 a 125 Hz, variável de acordo com o comportamento do motor. As alterações feitas no injetor consistiram da remoção do atomizador existente na extremidade do injetor e do filtro de combustível na entrada e no alargamento do canal de saída de combustível. As características técnicas da válvula usada neste trabalho são:

- Fabricante: Bosch, Modelo: 0280150975 (amarelo);
- Medições: $V_{ACIONAMENTO} = 12V$, $I_{ACIONAMENTO} = 0,28A$, $R_{BOBINA} = 16\Omega$ e $L = 8,25mH$ (para $F = 1kHz$).



(a)



(b)

Figura 4.9 - (a) Foto em corte de uma válvula injetora (b) detalhes dos componentes do injetor

Fonte: Bosch [3] e Thompson [40]

A figura 4.9 apresenta o bico injetor instalado no canal de admissão do motor Agrale.

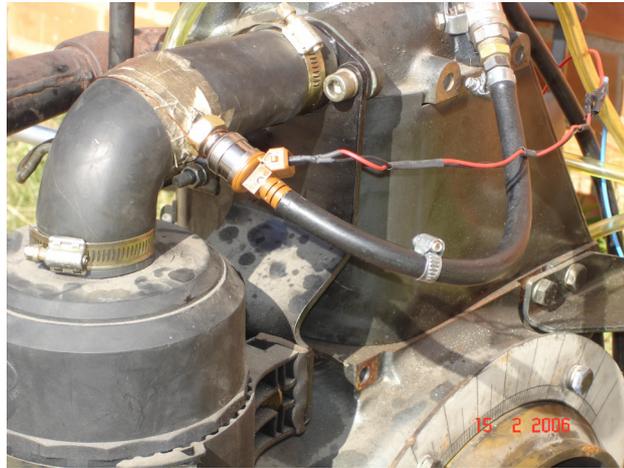


Figura 4.9 – Injetor instalado na admissão do motor Agrale

4.3.3 Potenciômetro do acelerador

A referência de aceleração é dada por um potenciômetro de 10 k Ω . O conversor A/D da CPU converte o sinal de tensão proveniente do potenciômetro e transforma esta referência em um valor de rotação equivalente para o qual se deseja levar o motor. Comercialmente, os automóveis atuais também usam um potenciômetro no pedal do acelerador sendo estes, no entanto, de muito maior precisão e robustez do que o usado neste trabalho.

A relação de referência para a leitura do conversor A/D do microcontrolador é dada pela equação 4.13.

$$N_{ref} = (leitura \text{ do conversor } A/D).6 \quad (4.13)$$

onde N_{ref} é a rotação de referência fornecida pela leitura da tensão do potenciômetro e leitura do conversor A/D é compreendida entre 0 para 0 V e 1023 contagens para 5 V.

4.3.4 CPU

A CPU utilizada é um microcontrolador modelo PIC18F452, fabricado pela Microchip Technology Inc. Este microcontrolador possui os seguintes recursos:

- Frequência de operação de até 40 MHz (cristal de 10 MHz com PLL interno de 4x);
- Memória de programa de 32 kbytes;
- 17 fontes de interrupções;
- 5 portas de entrada/saída (A,B,C,D e E);
- 4 timers, 2 módulos CCP (Capture/Compare/PWM);
- Módulo USART (comunicação serial);
- 8 canais de entrada para o conversor A/D de 10 bits;
- 75 instruções;
- Encapsulamento tipo DIP de 40 pinos.

4.3.5 Interface para o circuito de potência

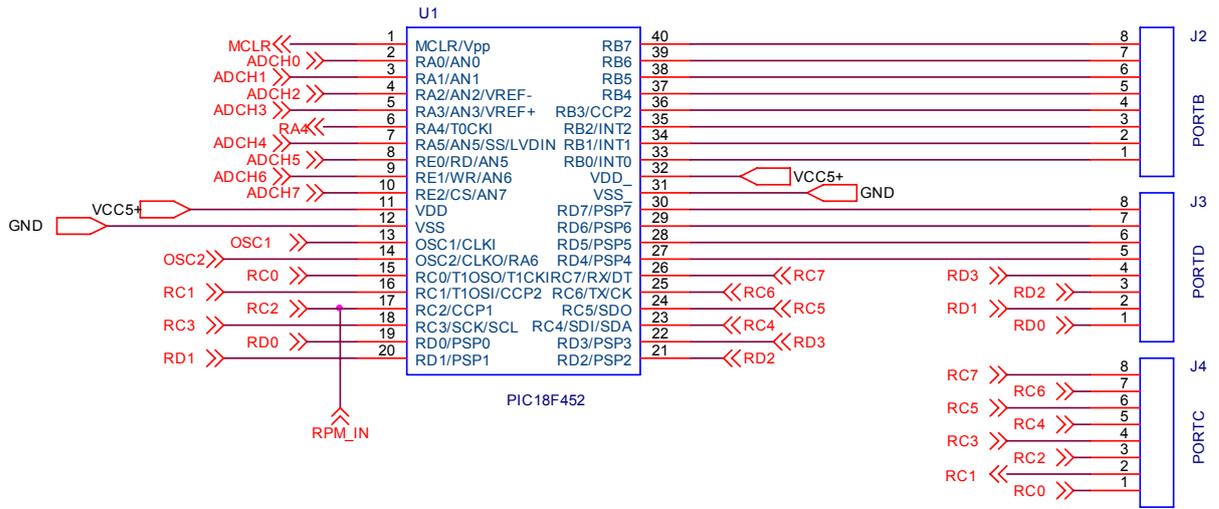
O circuito de potência para o injetor consistem de uma chave de potência do tipo MOSFET IRFZ46N e de um circuito integrado UC3708. O UC3708 é um controlador para circuitos de potência, não-inversor, com dois canais de entrada e saída. A chave IRFZ46N é capaz de suportar correntes de dreno de até 53 A. Tanto o controlador quanto a chave de potência são capazes de suportar altas frequências de funcionamento, o que permite a operação para chaveamento PWM, caso desejado. Neste trabalho, não se utilizou o acionamento PWM para o comando do injetor.

4.3.6 Interface para a comunicação serial

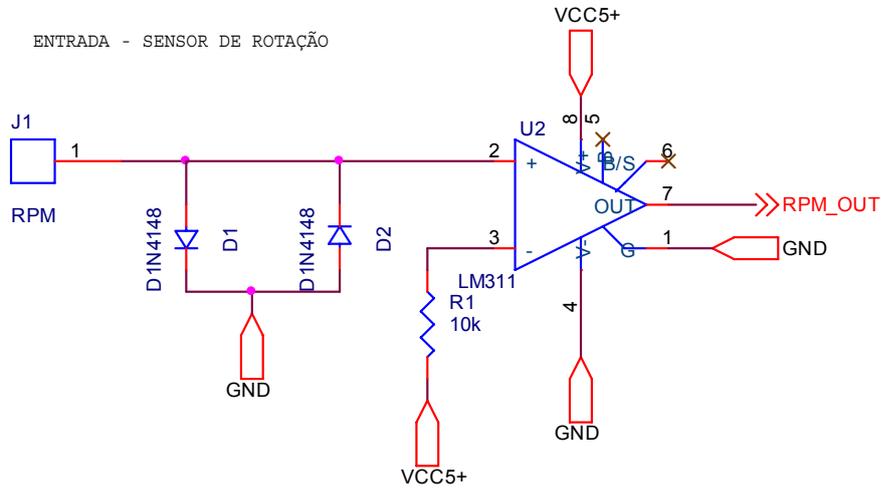
A interface de comunicação serial para a transmissão de dados da CPU para o computador utiliza um circuito integrado MAX232.

4.3.7 Esquemas elétricos do controlador

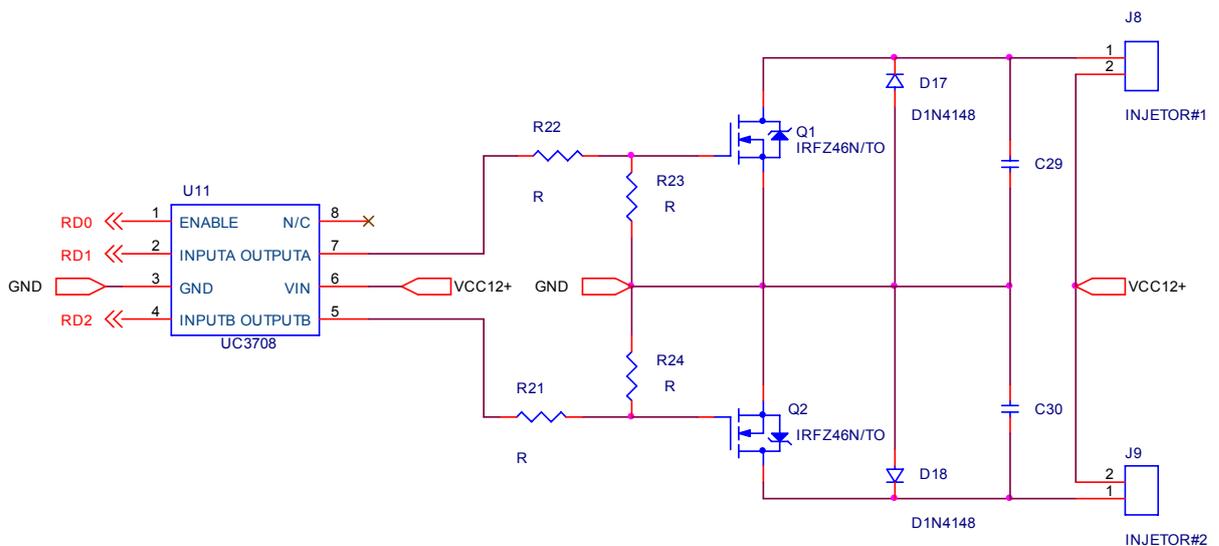
Os esquemas elétricos completos do controlador são encontrados no apêndice B desta dissertação. A figura 4.10 mostra os esquemas para as conexões da CPU, do circuito de entrada do sensor de rotação e do circuito de potência.



(a)



(b)



(c)

Figura 4.10 – (a) Conexões da CPU, (b) entrada do sensor de rotação, (c) interface de potência

4.3.8 Componentes do circuito de alimentação de gás

Para fornecer GN ao motor foram instalados os seguintes acessórios:

- Cilindro de gás: foi usado um cilindro de GN de fabricação nacional, marca CILBRAS. Este atende as exigências das normas NBR 11353 e NBR 12790 NBR e foi dotado de válvulas de segurança também especificadas na norma NBR 11353;
- Registro de alta pressão: atendendo as exigências da norma NBR 11353, junto com a válvula de segurança também foi instalado um registro alta pressão;
- Tubulação de alta pressão: entre a válvula de alta pressão e a válvula redutora de pressão, foi empregado um tubo de aço, com diâmetro interno igual a 3mm em conformidade com as normas NBR 8476 e NBR 5590;
- Válvula redutora/reguladora de pressão: para reduzir e regular a pressão foi empregada uma válvula redutora de duplo estágio, marca White Martins, acoplada a um regulador com manômetros indicadores da pressão de entrada (alta pressão) e pressão de saída (baixa pressão). Esta válvula é apresentada na figura 4.4;
- Registro de baixa pressão: após a válvula redutora de pressão foi instalado um registro de baixa pressão, com a finalidade de interromper o fluxo de gás entre os ensaios sem necessidade de alterar a pressão previamente regulada;
- Tubulação de baixa pressão: como tubulação de baixa pressão foi utilizada uma mangueira plástica com diâmetro interno de 15 mm.



Figura 4.11 – Válvula redutora/reguladora de pressão usada para baixar e regular a pressão do gás natural

4.4 Descrição dos programas desenvolvidos

4.4.1 Código-fonte do controlador

O código-fonte do controlador foi totalmente escrito em "assembler", usando o programa MPLAB[®] IDE.

A lógica de funcionamento segue os fluxogramas apresentados no apêndice A deste trabalho. Como a CPU é capaz de executar 1 instrução a cada 0,1 μ s para um relógio de 40 MHz, o tempo aproximado de execução do programa de controle é de, aproximadamente, 21 ms, incluindo os procedimentos para tratamento de interrupções, processamento e cálculo das variáveis de entrada e rotinas de tomada de controle. Este tempo poderá ser maior, em função do tipo de controlador a ser usado e do tempo que a ação de controle (tempo de injeção) levará para ser executada. Como a rotina de transmissão serial é uma opção do programa, o seu tempo de execução não foi contabilizado.

A figura 4.12 apresenta o fluxograma principal do controlador desenvolvido

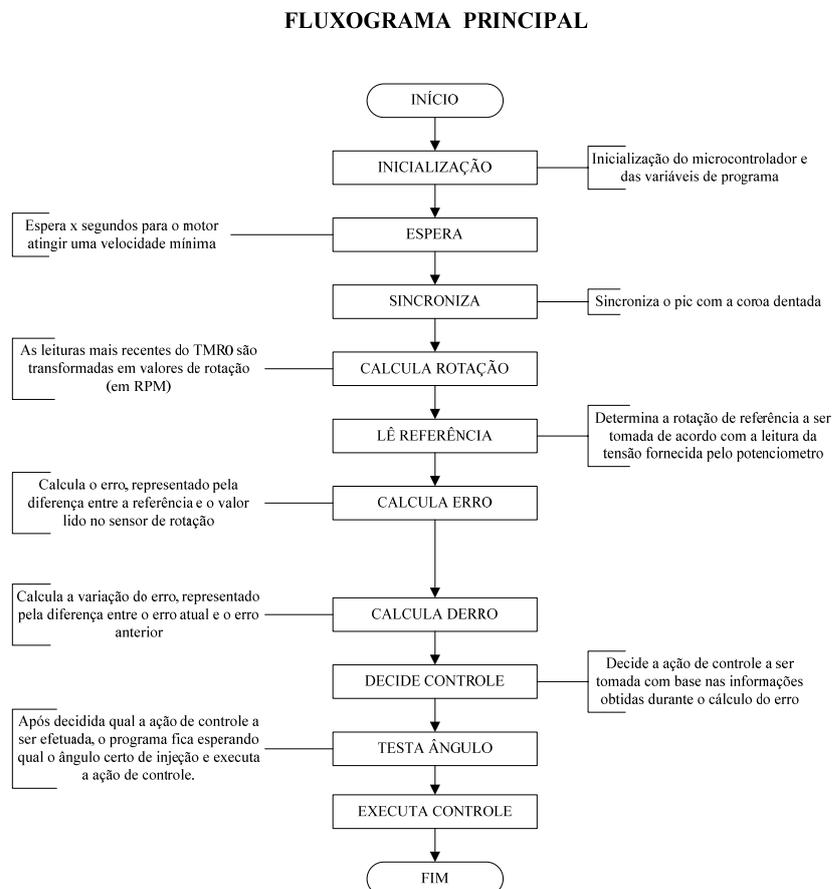


Figura 4.12 – Fluxograma principal do controlador

Na figura 4.13 pode-se visualizar o fluxograma básico, com as etapas do processo de decisão utilizadas no programa desenvolvido. Na figura 4.14 encontram-se os procedimentos para tomada de decisão sobre qual ação de controle será usada (se ON/OFF ou nebulosa).

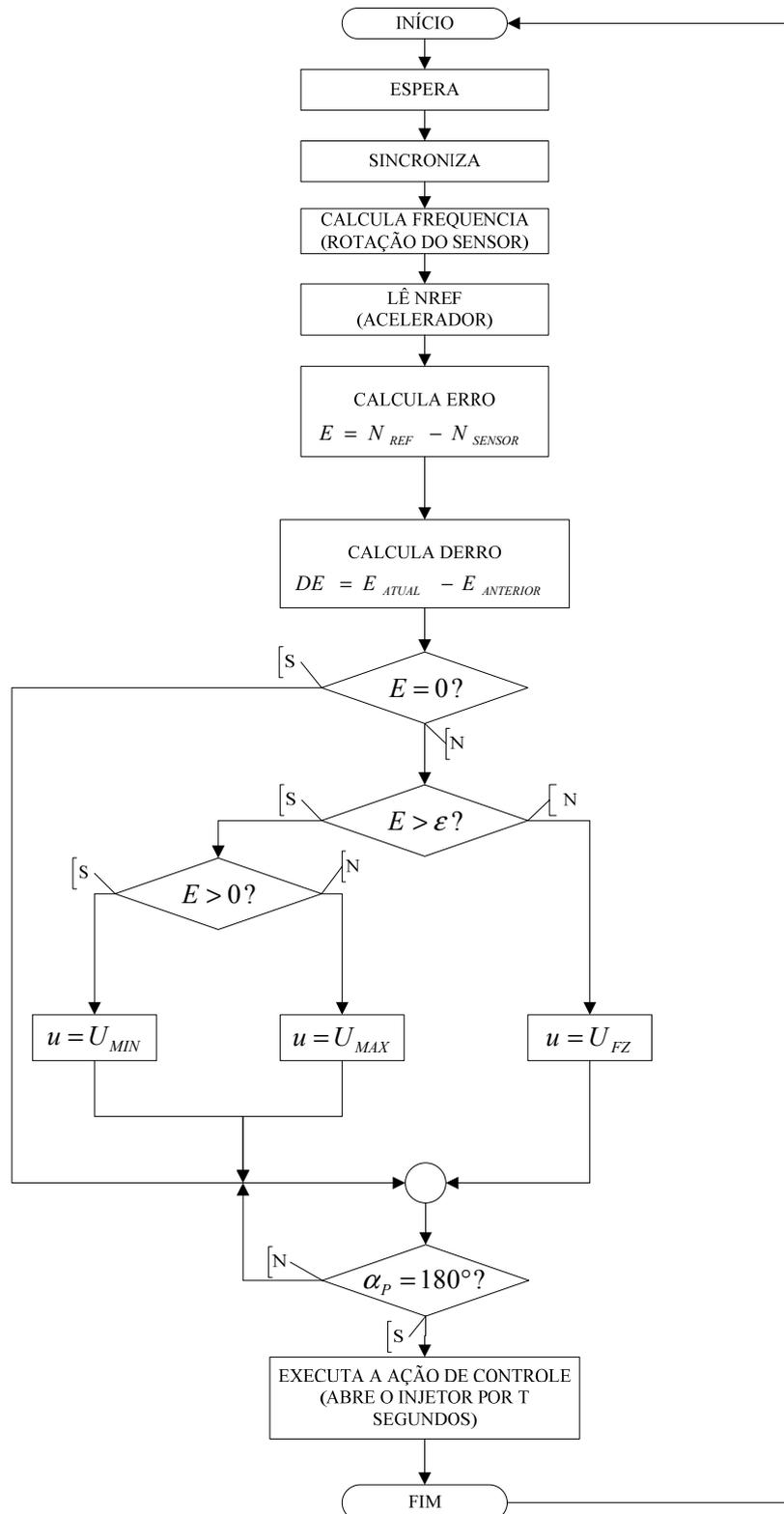
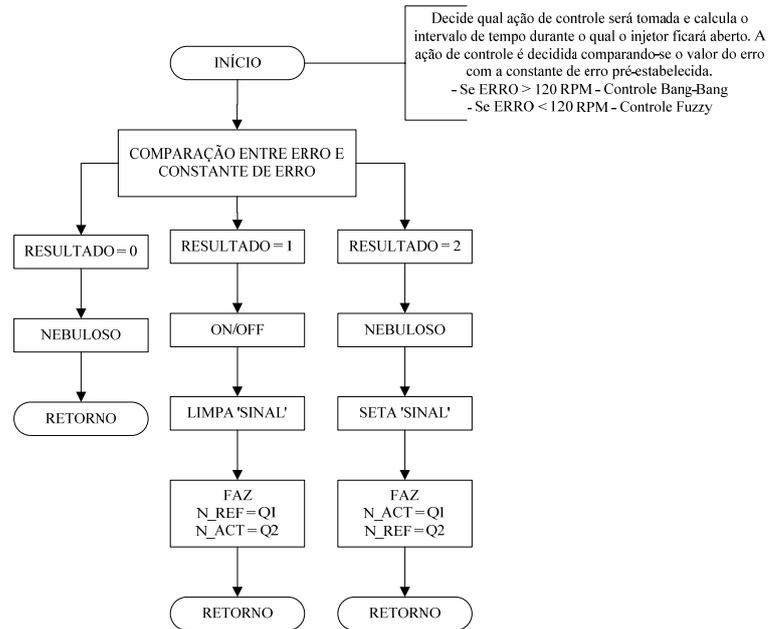


Figura 4.13 – Fluxograma-base para o programa desenvolvido

SUB-ROTINA DE DECISÃO DA AÇÃO DE CONTROLE



SUB-ROTINA ON/OFF E NEBULOSA

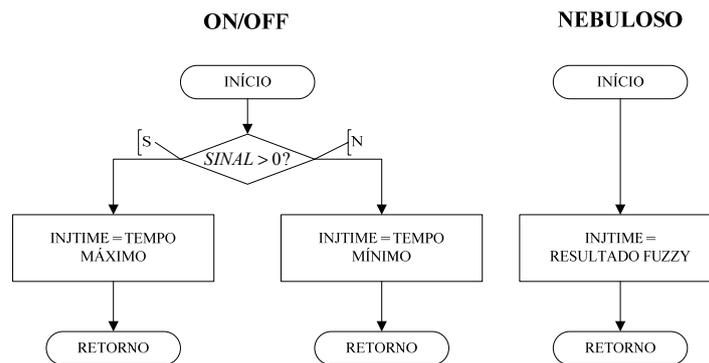


Figura 4.14 – Subrotinas de tomada de decisão de controle

Os detalhes dos procedimentos de fuzzificação, inferência e defuzzificação encontram-se no Apêndice A desta dissertação.

4.4.2 Programa para comunicação serial

A interface para aquisição de dados serial foi desenvolvida em LabVIEW™. Esta interface realiza as seguintes tarefas:

- Captura e apresentação dos valores de rotação do motor, rotação de referência (acelerador), erro, variação do erro, tempo de injeção e os índices das regras disparadas quando a ação de controle nebulosa for executada;

- Captura e salvamento em arquivo dos dados citados no item anterior e das imagens dos gráficos traçados no painel frontal do software;
- Seleção e configuração da porta serial e taxa de transmissão de dados.

A figura 4.16 apresenta o painel frontal da interface de aquisição virtual desenvolvida em LabVIEW™. A transmissão serial assíncrona dos dados da CPU para o PC ocorre numa taxa de 115200 bps.

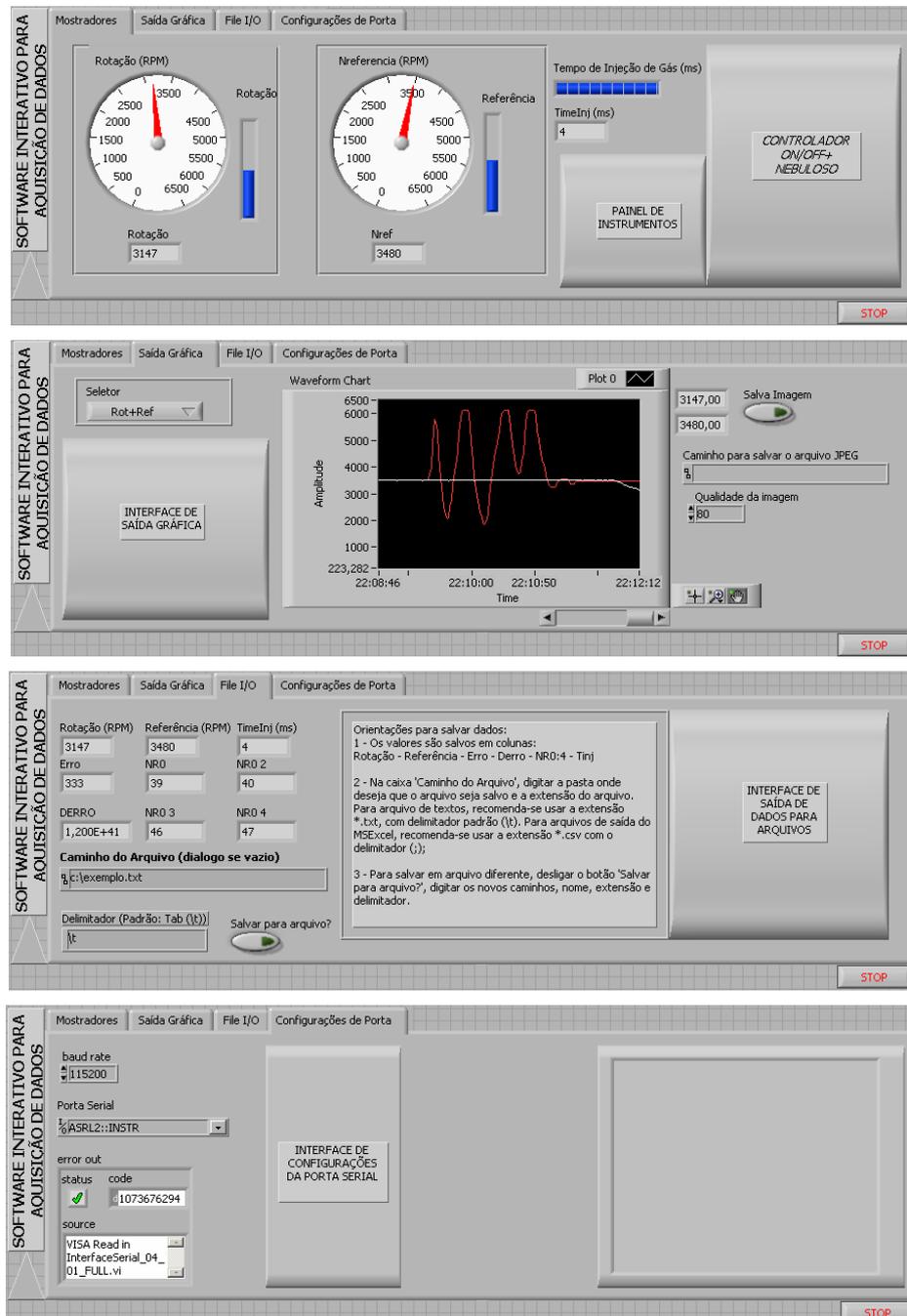


Figura 4.15 - Interface de usuário para aquisição dos dados do controlador de injeção

4.5 Resumo deste capítulo

Este capítulo aborda os requisitos para o controle de injeção de combustível em motores Diesel. O controle tradicional é de difícil aplicação em motores Diesel. Deve-se isto à grande quantidade de não-linearidades presentes.

Este capítulo apresentou as vantagens da modelagem heurística frente às técnicas de modelagem tradicional. A primeira, mais versátil, é capaz de suportar alterações com base em conhecimento adquirido experimentalmente por operadores humanos. A segunda, mais ortodoxa, exige fidelidade com princípios físicos básicos do processo, que nem sempre podem ser obtidos com precisão ou com a qualidade necessária.

O tratamento da planta não-linear como um modelo do tipo caixa-preta facilita a seleção da estratégia de controle mais adequada. Usando heurística, é possível obter um controlador que supere as não-linearidades do sistema.

Desenvolveu-se um controlador adaptável que, se necessário, permite modificações em sua estrutura. Tais modificações podem ser feitas por operadores que não possuem avançados conhecimentos matemáticos, exigindo apenas domínio sobre a dinâmica comportamental do processo controlado.

Desenvolveu-se um controlador para um motor Agrale monocilindro. Este controlador usa um algoritmo ON/OFF+nebuloso para gerenciar a injeção de gás no motor. Analisaram-se os parâmetros de controle necessários, a base de regras desenvolvida e os princípios usados para implementar do controlador.

Foi apresentado o equipamento e os programas necessários para o desenvolvimento do controlador híbrido usado para gerenciar eletronicamente a injeção de gás natural em um motor Diesel. As condições de construção e implementação em microcontrolador também foram discutidas e justificadas. Os sensores e o atuador foram explicados e sua importância para o gerenciamento do motor foi abordada. Outros detalhes a respeito do processamento dos programas podem ser encontrados no Apêndice A.

A interface de aquisição desenvolvida em LabVIEW™ foi apresentada e suas características foram discriminadas.

CAPÍTULO 5

RESULTADOS EXPERIMENTAIS

5.1 Introdução

Neste capítulo encontram-se os resultados práticos obtidos com a implementação do controle de injeção de GN usando o algoritmo e o protótipo desenvolvidos e apresentados no capítulo 3. Dentre os resultados práticos, estão os ensaios individuais realizados com os componentes usados neste trabalho.

O desenvolvimento do controlador ocorre em três etapas: (1) elaboração de um controle ON/OFF+Nebuloso adaptável a vários motores Diesel, (2) seleção, adaptação e ensaios com o bico injetor (atuador) para se analisar a capacidade de vazão do mesmo e (3) ensaios com protótipo operando diretamente sobre o motor Diesel bi-combustível para o estudo da resposta do protótipo.

Antes de proceder aos ensaios com o motor, foram ensaiados individualmente o sensor de rotação e o bico injetor. Estes ensaios se fizeram necessários para a análise comportamental destes componentes. Foram coletados gráficos e tabelas de dados para os equipamentos ensaiados. Dentre os ensaios realizados para o bico injetor, estão compreendidos também os ensaios de vazão. Estes são necessários para a aferição dos componentes e verificação de sua capacidade de fornecimento de gás na taxa de vazão requerida pelo motor.

5.2 Ensaios com o sensor indutivo e a roda fônica

Quando a distância entre o sensor e a roda fônica não é uniforme, em virtude de excentricidades da roda com o eixo em que está instalada, ocorrem variações na amplitude do sinal do sensor. Isto foi comprovado em ensaios com o conjunto sensor e a roda fônica usados neste trabalho. A figura 5.1 apresenta um exemplo dessa distorção.

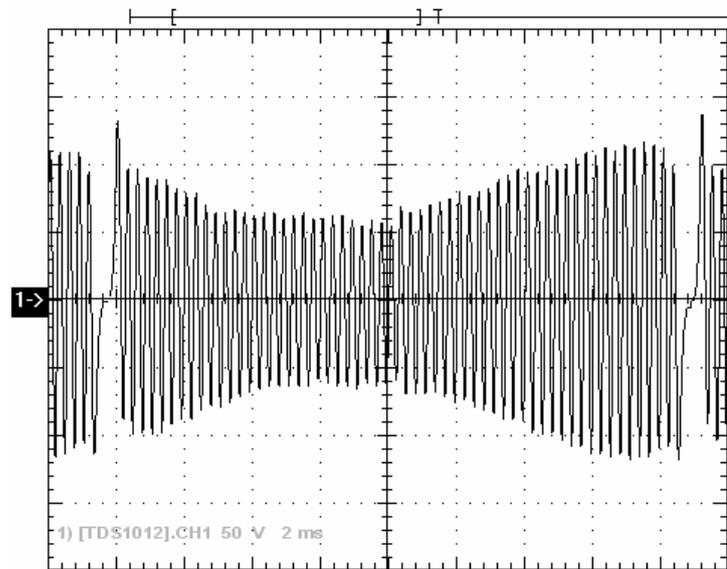


Figura 5.1 - Sinal do sensor de rotação com ocorrência de excentricidade

Apesar da não-uniformidade do sinal de saída do sensor, apresentada na figura 5.1, não houve irregularidades no funcionamento do protótipo com o uso do sinal tratado. A CPU identificou com precisão a rotação e a fase do motor. A figura 5.2 apresenta o sinal após o estágio de tratamento.

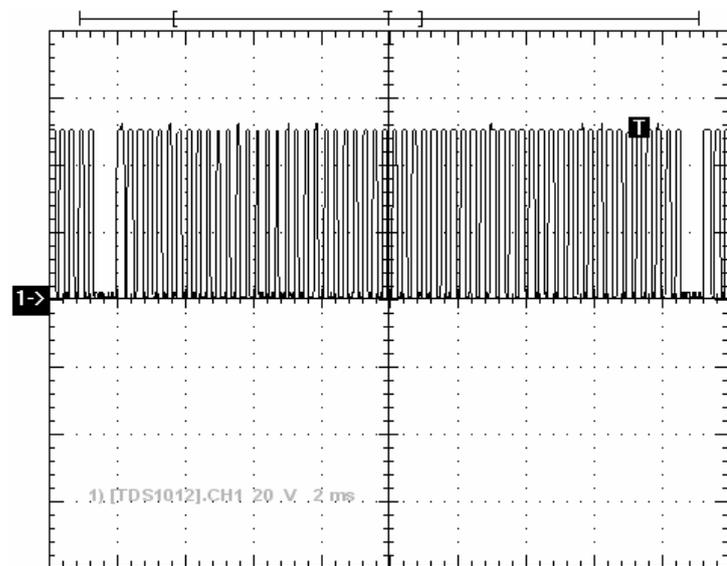


Figura 5.2 - Sinal do sensor de rotação após o tratamento do sinal

5.3 Ensaio com o bico injetor

5.3.1 Ensaio de acionamento do injetor

Ensaio das características elétricas de operação com o injetor usado neste trabalho, resultaram no gráfico apresentado na figura 5.3. Observam-se os tempos de resposta para abertura e fechamento do dispositivo, durante os ensaios realizados, com larguras de pulsos de 4 ms e alimentação de 12 V (C.C.). Os sinais elétricos de abertura e fechamento do injetor eletromagnético conferem com a literatura. Visualiza-se um pico reverso de tensão durante o fechamento. Este pode ser corrigido usando-se um acionamento PWM, a fim de minimizar danos na chave de potência.

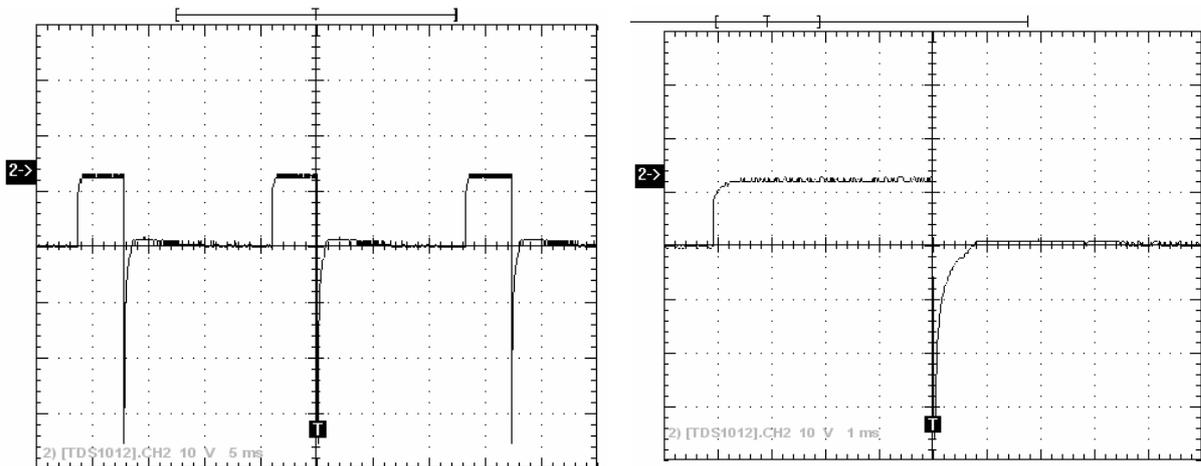


Figura 5.3 - (a) Ensaio de abertura e fechamento (b) Detalhe do pulso de acionamento

5.3.2 Ensaio de vazão do injetor

Estes ensaios têm por finalidade determinar a capacidade de vazão do injetor. Procura-se averiguar se esta vazão é suficiente para alimentar com gás natural o motor Diesel. Este ensaio permite a determinação dos tempos mínimo e máximo para a injeção de gás no motor.

Inicialmente, para verificar a capacidade de vazão de gás do bico injetor devem-se tomar como referência os limites de rotação mínimo e máximo do motor a ser controlado. No caso do motor usado neste estudo os limites de rotação encontram-se entre 1800 rpm (marcha lenta) e 2800 rpm (rotação máxima). Estas rotações são medidas no eixo do motor. Como a referência de rotação para o controlador provém do eixo de comando de válvulas, deve-se

considerar metade deste valor, pois 720° de giro do virabrequim equivalem à 360° do eixo de comando de válvulas. Outra consideração necessária é o fato de que a injeção de gás ocorre na fase de admissão, aproximadamente à 180° do PMS do cilindro. Com estas considerações é possível calcular para o motor os valores aproximados (quadro 5.1) para as larguras de pulso de injeção de combustível.

Rotação (rpm)	1800	2800
Rotação (Hz)	30	46,66
Rotação (eixo de comando de válvulas)	15	23,33
Largura de pulso (ms)	16	10,71

Quadro 5.1 – Exemplo de cálculo das larguras de pulso de injeção

O estudo realizado por Camargo [5] determinou que, para o motor usado neste experimento, a máxima vazão de gás necessária é de 15 l/min. Portanto, deve-se verificar se o bico injetor é capaz de fornecer gás nesta vazão, para uma rotação de 2800 rpm e larguras de pulsos de injeção de, aproximadamente, 10,71 ms.

Devido à indisponibilidade de um fluxômetro adequado à medição de vazão para um regime intermitente, foi necessária a adoção de um método alternativo.

Para fazer a aferição experimental do bico injetor foi utilizado o seguinte artifício: Tomou-se um tubo de filme de polietileno flexível, porém considerado inelástico para a pressão ambiente. Selecionou-se um tubo, com uma parede suficientemente fina, para que o efeito do seu peso não causasse deformação significativa na secção quando cheio de gás. Este tubo plástico tinha uma secção transversal conhecida igual a $127,32 \text{ cm}^2$. Em uma das extremidades do tubo foi fixada uma tampa rígida, na qual foram feitos dois pequenos furos. Em um deles adaptou-se uma conexão ligada a mangueira de gás proveniente de um cilindro com nitrogênio. O outro orifício foi bloqueado, pois era destinado à realização de outra experiência. Usou-se o nitrogênio devido a suas características físicas serem próximas às do gás natural. Além disso, o uso deste gás preservaria a integridade do injetor, pelo fato de ser livre de impurezas e umidade. A pressão regulada na válvula foi mantida em 5 kgf/cm^2 , próxima a pressão utilizada em sistemas de injeção de gás comerciais.

Antes de cada teste, o tubo era esvaziado e enrolado sobre um cilindro, eliminando-se a ar no seu interior, a não ser por um pequeno volume junto à tampa. Este volume foi medido e depois descontado do volume total.



Figura 5.4 – Tubo não inflado com a tampa rígida



Figura 5.5 – Tubo inflado com gás, sendo medido, durante um teste de verificação de vazão do injetor

Para executar o teste de aferição foi medido o tempo de enchimento do tubo plástico com um cronômetro. Durante o enchimento, o tubo ia sendo desenrolado para evitar que a pressão interna ultrapassasse a pressão atmosférica. Ao se completar o tempo pré-determinado no cronômetro o gás era fechado e o restante do tubo não enchido de gás era novamente enrolado, observando-se para que a pressão não fosse maior que a pressão atmosférica.

Uma vez cheio o tubo, na pressão atmosférica, media-se o comprimento do mesmo, e como o diâmetro era conhecido calculava-se o volume contido no tubo. Neste cálculo eram descontados: o volume residual no início do tubo e o volume final junto ao cilindro de enrolamento onde o tubo sofria a mudança de secção, passando de cilíndrico para apenas uma lâmina dupla sem espaço interno.

Para garantir a confiabilidade da medição foram feitos ensaios com o injetor simulando-se variações de rotação do motor com um gerador de sinais. Simularam-se variações de rotação de 200 em 200 rpm entre 1800 e 2800 rpm. Para cada rotação simulada,

foram feitas três medições para várias larguras de pulso de injeção. Foram adotadas larguras de pulso entre 3 e 10 ms, manipulando-se o ciclo de serviço (duty cycle) do sinal gerado.

Os gráficos resultantes dos ensaios de vazão podem ser visualizados na figura 5.6.

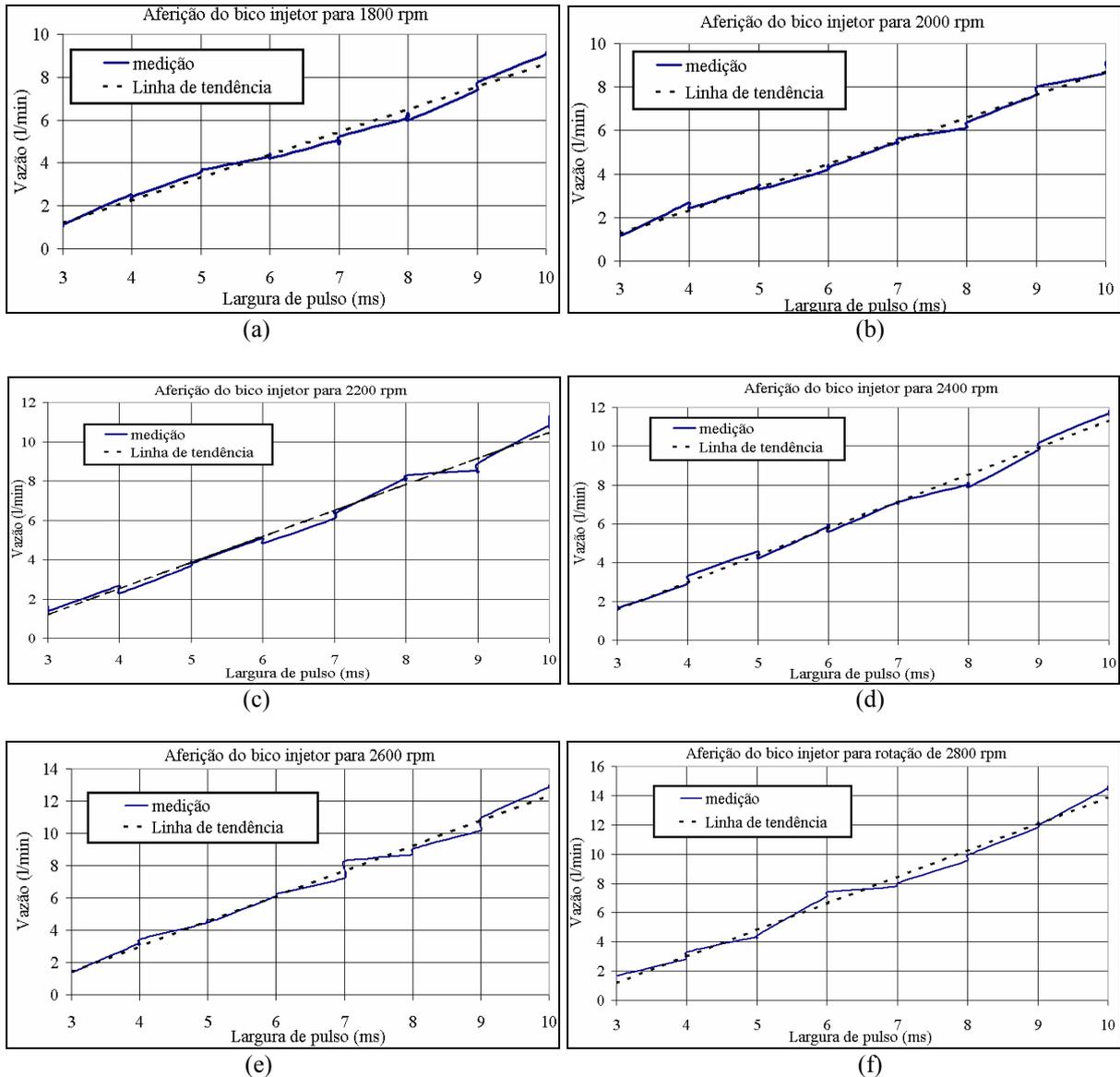


Figura 5.6 – Resultados dos ensaios de vazão para o bico injetor

As vazões medidas nos ensaios, quando plotadas em um gráfico, apresentaram pontos que geraram curvas de tendência em forma de linha reta. As equações destas retas foram determinadas e foram assim calculados tempos mais precisos de vazão. As linhas de tendência para as figuras 5.6a a 5.6f, obtidas estatisticamente, usando-se o MS-Excel são representadas, respectivamente, pelas equações 5.1 a 5.6.

$$y_{2800\text{rpm}} = 1,8194x - 4,2875 \quad (5.1)$$

$$y_{2600\text{rpm}} = 1,5647x - 3,2477 \quad (5.2)$$

$$y_{2400\text{rpm}} = 1,3904x - 2,5656 \quad (5.3)$$

$$y_{2200\text{rpm}} = 1,3268x - 2,7778 \quad (5.4)$$

$$y_{2000\text{rpm}} = 1,0671x - 1,928 \quad (5.5)$$

$$y_{1800\text{rpm}} = 1,065x - 1,9997 \quad (5.6)$$

onde x representa a largura de pulso de injeção (ms) e y é a vazão do injetor (l/min)

Estes tempos servem de base para aferir a saída do controlador nebuloso utilizado. Assim, os valores empíricos assumidos para o controlador nebuloso apresentado no capítulo 3 puderam ser corrigidos para valores adequados ao motor usado neste trabalho. Este procedimento de aferição poderia ser utilizado em outros modelos de motores. Isto permite uma otimização do controlador para uma larga faixa de modelos de motores.

Observou-se que ensaios para larguras de pulso inferiores a 3 ms não forneciam resultados adequadamente mensuráveis.

Os gráficos da figura 5.6 demonstram a capacidade linear do bico injetor em fornecer gás para toda a faixa de operação do motor.

Ensaio preliminares demonstraram que o bico injetor, em seu estado original, não era capaz de atingir a vazão necessária. Para resolver este problema, foi realizada uma manipulação de natureza mecânica no bico. Aumentou-se o orifício de saída e retirou-se o filtro de combustível, localizado na entrada do injetor. O curso do êmbolo foi mantido o mesmo. Os resultados mostrados na figura 5.6 demonstram que estas alterações no injetor comercial foram suficientes para a adequação ao processo de controle desejado.

5.4 Ensaio em malha aberta com o controlador

Estes ensaios foram realizados com o intuito de aferir a capacidade de execução das ações de controle desenvolvidas. O motor Diesel foi "simulado" montando-se a roda fônica e o sensor de rotação sobre um motor elétrico de velocidade constante de, aproximadamente, 3500 rpm. Como o motor elétrico não produz uma resposta proporcional à ação de controle efetuada, estes ensaios em malha aberta prestaram-se apenas ao fornecimento de resultados utilizados para calibrar a instrumentação e os programas desenvolvidos.

Inicialmente, com o motor elétrico em rotação nominal de, aproximadamente 3500 rpm ($\pm 1\%$), o potenciômetro foi ajustado de tal forma que o controlador devesse acelerar o motor. A figura 5.4 apresenta o resultado desta ação de controle. O acelerador forneceu uma referência de 6000 rpm ($4,9 \text{ V} \pm 0,01\%$). Experimentalmente, o sistema foi ajustado para um ângulo de injeção de 21° do PMS. Os tempos máximo e mínimo de injeção nos ensaios de malha aberta foram fixados entre 1 e 4 ms. Como o motor elétrico não responderia a ação de controle, os valores de tempo e ângulo neste ensaio são indiferentes, apesar de servirem de base para verificar a precisão do controlador.

O ensaio apresentado na figura 5.7 permite verificar o sinal de saída fornecido pelo controlador para a largura de pulso de injeção. No caso do efeito de aceleração do motor, a CPU interpretou a execução de uma ação de controle ON/OFF, mantendo o bico injetor aberto pelo máximo tempo possível, isto é, 4 ms. É possível notar a precisão da largura de pulso da saída do controlador. Como o ensaio da resposta do injetor já foi apresentado, tomou-se o cuidado de se considerar neste ensaio apenas a largura de pulso medida diretamente sobre a porta de saída de sinal do microcontrolador.

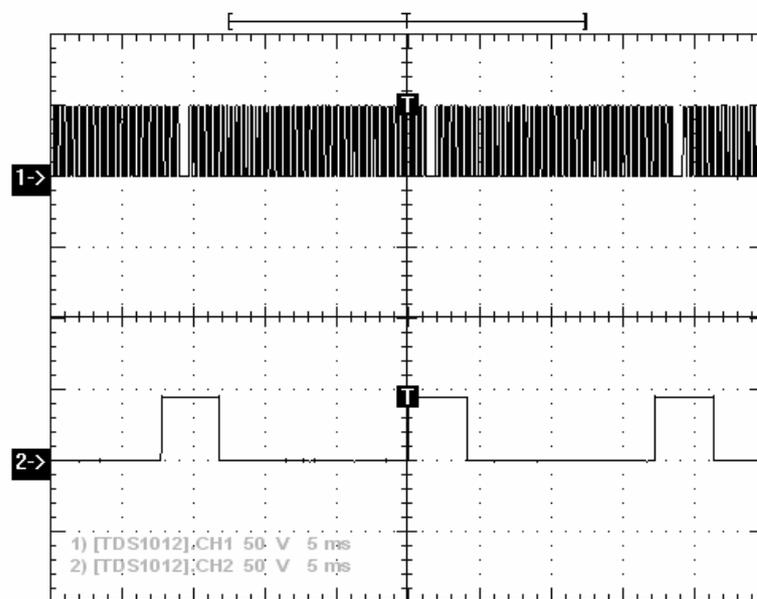


Figura 5.7 – Simulação da ação de controle de aceleração do motor com ângulo de 21°

A figura 5.8 apresenta o resultado da ação de desaceleração executada pelo microcontrolador. A referência foi calibrada para o valor mínimo de 0 rpm (0 V). Com isso foi possível a visualização da ação de controle ON/OFF ao tentar retardar a rotação do motor.

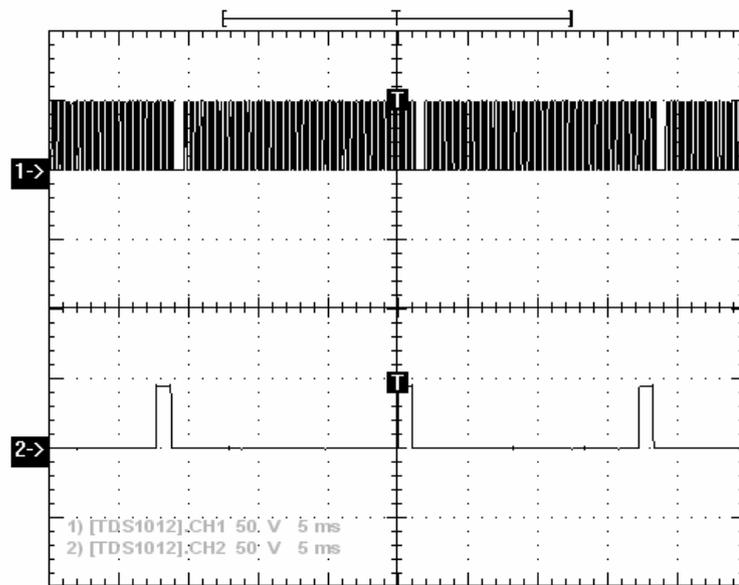


Figura 5.8 - Simulação da ação de controle de desaceleração do motor com ângulo de 21°

É importante observar que, mesmo com a ação de controle ON/OFF, a taxa de injeção de combustível não pode ser reduzida a zero durante a desaceleração. Isto é explicado porque, ao cortar-se o combustível totalmente, o motor entraria numa situação de operação anômala com resultados indesejáveis. Deve-se prever a ocorrência da entrada do motor na operação de marcha lenta. A ação de desaceleração deve garantir simultaneamente o retardo do motor e a injeção mínima de gás necessária para que não ocorram efeitos prejudiciais, tais como "trancos", elevação do ruído e aumento na emissão de resíduos causada por uma má queima de combustível. As transições nas condições operacionais do motor devem ocorrer de forma suave.

Os ensaios em malha aberta para a verificação da ação de controle nebulosa ficam mais claros ao se visualizar os resultados obtidos com a interface serial feita em LabVIEW™. Neste programa podem-se salvar em arquivo os valores da rotação do motor, da rotação de referência, regras disparadas e as larguras dos pulsos de injeção.

A figura 5.9 apresenta um exemplo da ação de controle nebulosa em malha aberta. Nesta figura, o motor simulado teve sua rotação mantida constante e variou-se a referência. Os resultados podem ser visualizados nos gráficos apresentados pelas figuras 5.9 e 5.10.

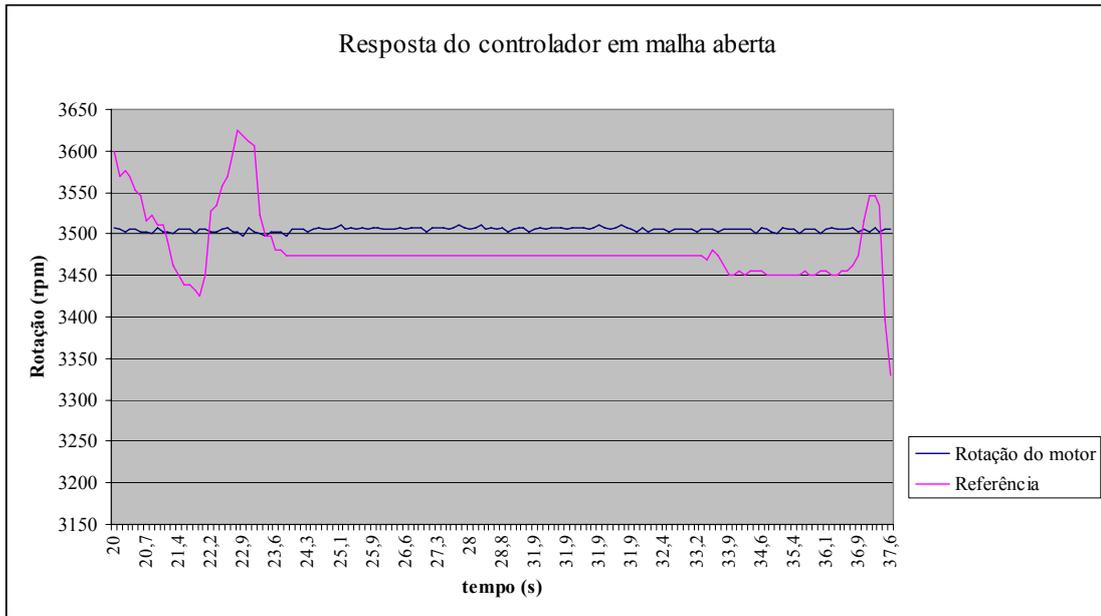


Figura 5.9 – Variações da referência para o motor simulado com rotação constante

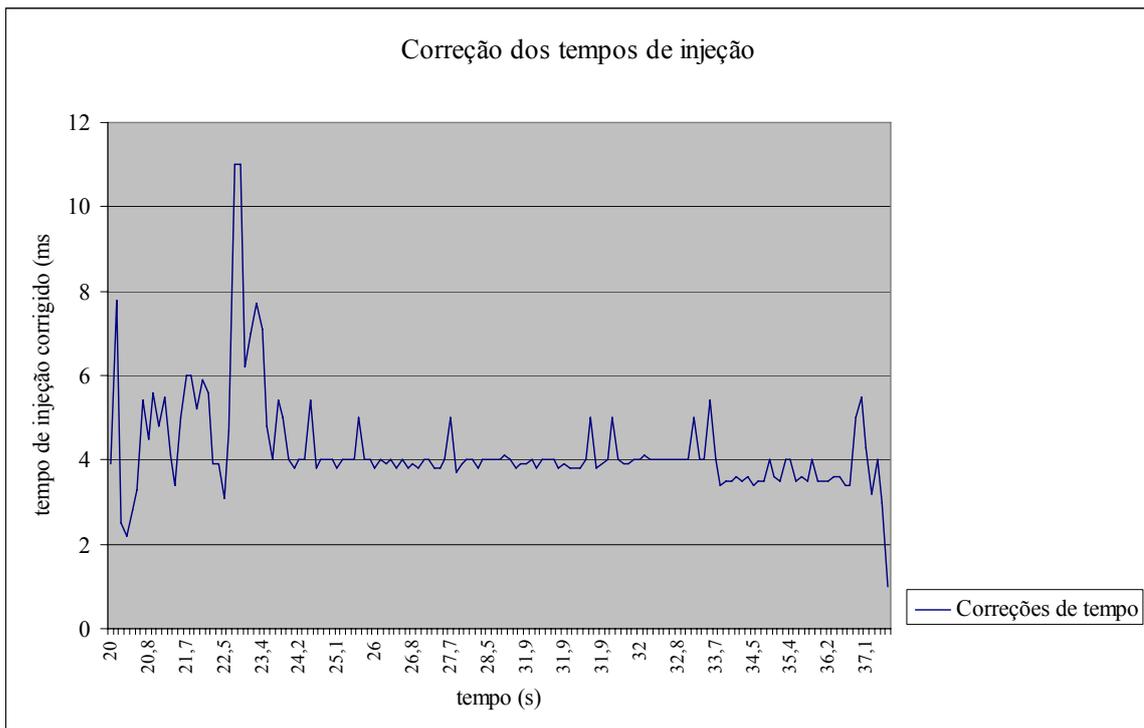


Figura 5.10 – Ação de controle nebulosa para as variações de referência apresentadas na figura 5.9

Pode-se ver que o controlador nebuloso atua de forma precisa no sentido de fazer o motor seguir a referência de forma adequada. O controlador também demonstra boa estabilidade no regime permanente. Observaram-se alguns picos isolados devidos a algumas irregularidades no funcionamento da plataforma usada para simular fisicamente o motor. Porém, estes picos não resultam em mau funcionamento do protótipo.

5.5 Ensaio com o motor Agrale

Foram realizados sobre o motor ensaios de verificação da resposta de velocidade. Os dados para esta resposta foram levantados sobre as condições de aceleração, regime permanente e desaceleração do motor.

Para a partida do motor, foi usado o sistema original de manivela.

5.5.1. Ensaio do motor com combustível Diesel

Neste ensaio, o motor foi testado apenas com combustível Diesel. As ações de aceleração e desaceleração resultam da atuação mecânica sobre a alavanca do acelerador. A figura 5.11 apresenta os resultados levantados para a operação do motor Diesel usando somente um combustível e com o sistema de controle de injeção original. A rotação do motor foi levada do seu valor mínimo até o máximo atuando-se sobre o acelerador mecânico.

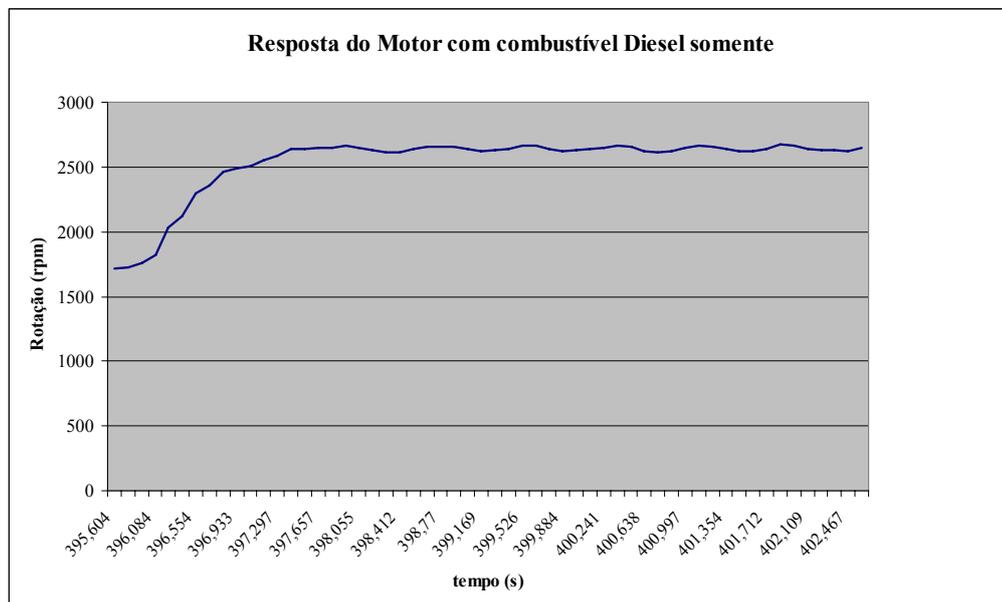


Figura 5.11 – Operação do motor com combustível Diesel

5.5.2 Ensaio com gás natural

Este ensaio foi realizado com o intuito de verificar-se a resposta do motor em condições de aceleração usando o GN. Uma vez partindo-se o motor, variava-se o

potenciômetro com o intuito de se alterar a rotação apenas pelo controle da entrada de mais ou menos gás no motor. Após partir o motor, o acelerador mecânico foi colocado na posição de rotação mínima (1800 rpm) e, a partir daí, atuou-se sobre o motor apenas com o acelerador eletrônico.

A figura 5.12 apresenta a faixa de respostas do motor para ações de aceleração e desaceleração através do potenciômetro. A figura 5.13 apresenta os tempos de injeção corrigidos para as mesmas faixas de atuação da figura 5.12.

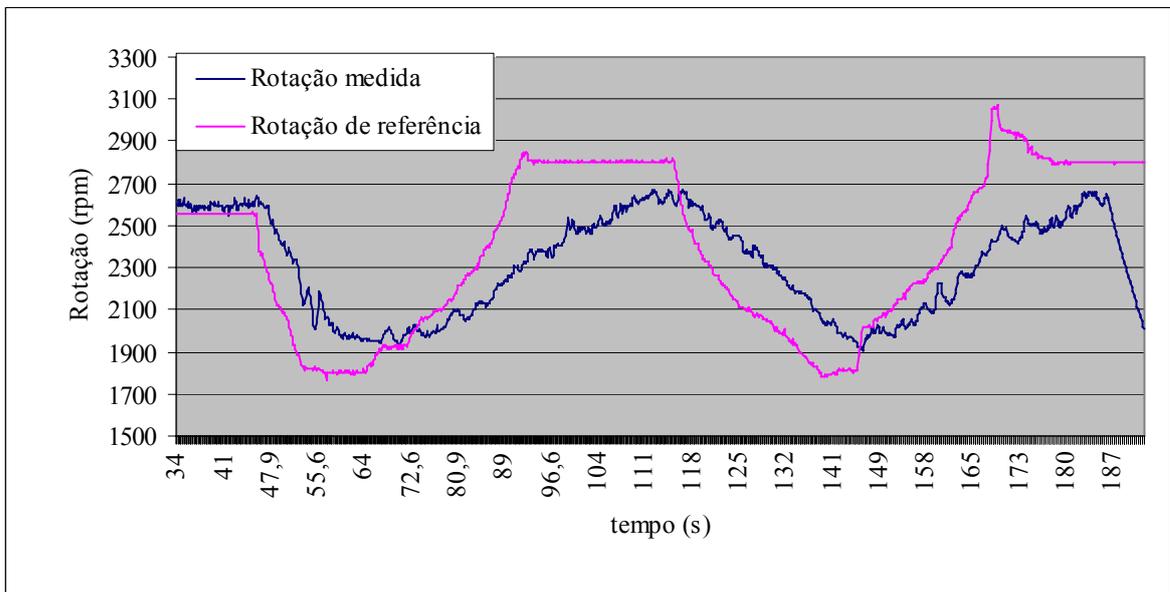


Figura 5.12 – Faixa de respostas do motor

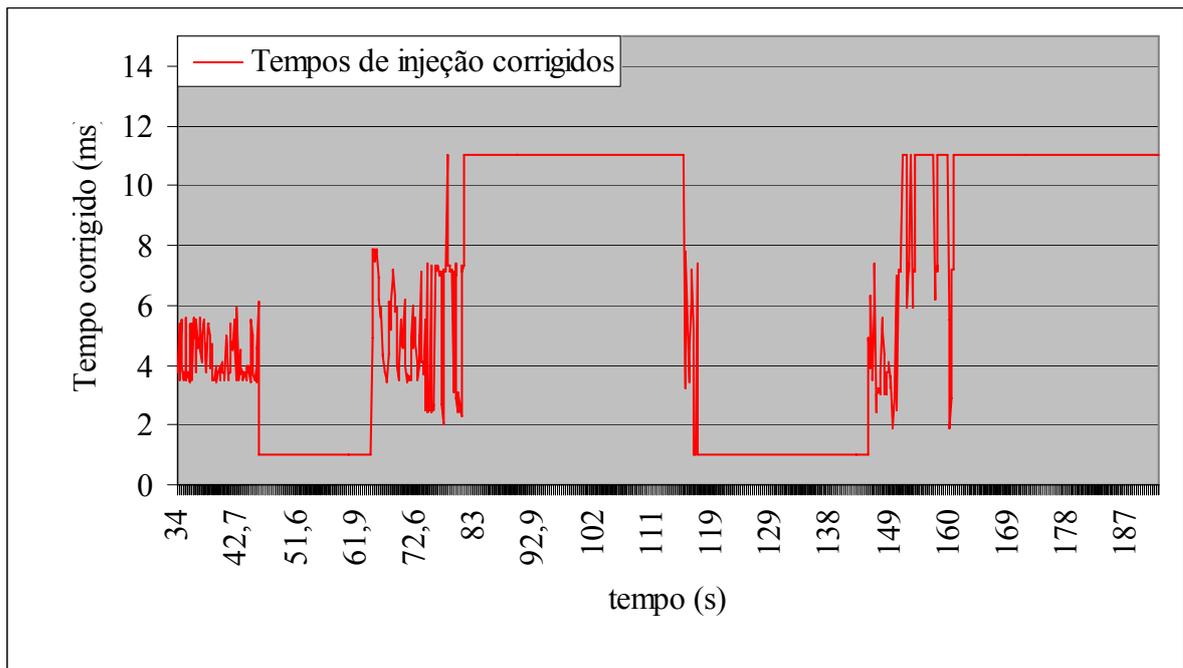


Figura 5.13 – Tempos de injeção corrigidos pelo controlador ON/OFF+nebuloso

5.6 Observações finais e avaliação dos resultados

Com os resultados dos testes realizados, podem-se fazer as observações apresentadas nos próximos itens.

5.6.1 Ensaio com os sensores

A avaliação dos sensores utilizados mostrou que o sinal de saída dos mesmos não diferiu dos sistemas apresentados pela literatura. O problema da excentricidade na instalação da roda fônica não implica em corrupção do sinal em virtude deste sofrer tratamento digital para o processamento dos dados.

5.6.2 Ensaio com o atuador

O atuador eletromagnético apresentou curvas de respostas adequadas para atender às demandas do processo a ser controlado. Os tempos de abertura e fechamento foram considerados como fatores que não interferem na atuação do controlador.

Para a faixa de frequências utilizadas neste trabalho, o atuador demonstrou boa resposta, com alto grau de linearidade e capacidade de fornecimento de vazão de gás adequada ao motor. Por ser um atuador comercial, para o fornecimento da vazão adequada, o bico injetor precisou sofrer algumas alterações estruturais. Porém, estas alterações não implicaram em modificações no comportamento eletromagnético do atuador.

5.6.3 Ensaio em malha aberta

Os ensaios em malha aberta tiveram o propósito de oferecer a possibilidade de análise das respostas do controlador, sem a necessidade de usá-lo diretamente com o motor. Estes ensaios permitiram a visualização da capacidade de precisão da resposta do sistema e qualidade dos resultados da ação de controle.

Os ensaios em malha aberta permitiram a observação de potenciais falhas na ação de controle. O controlador apresentou, em malha aberta, uma boa estabilidade, com ocorrência de alguns picos aleatórios, decorrentes de problemas com o simulador físico.

As correções dos tempos de injeção se mostraram adequadas e condizentes com os resultados esperados, tanto para faixa de atuação da ação de controle ON/OFF quanto para a faixa de atuação do controlador nebuloso. O sistema de controle se mostrou capaz de selecionar adequadamente a ação de controle a ser tomada.

5.6.4 Ensaio com o motor Agrale

O motor Diesel ao operar com GN apresentou tempos de resposta mais lentos quando comparados com sua operação apenas com óleo Diesel. Apesar disso, o motor respondeu bem às excitações provocadas pelo controle eletrônico. A planta mecânica apresentou resultados satisfatórios, porém, comprovou-se a capacidade de seguir a referência quando submetida às variações nas ações de controle. As transições dos níveis de velocidade do motor ocorreram de forma suave, sem a ocorrência de distúrbios mais graves como "trancos" ou falhas na operação em decorrência da ausência ou excesso de alimentação de GN.

A resposta do controlador em malha fechada se mostrou eficaz e próxima dos testes realizados em malha aberta. As correções nos tempos de injeção foram feitas de forma adequada e ocorreram conforme as especificações determinadas durante o desenvolvimento do protótipo. Entretanto, observou-se a ocorrência de alguns picos aleatórios durante o processo de correção dos tempos de injeção. Apesar da ocorrência destes picos espúrios durante a correção da injeção, pode-se visualizar, pelos gráficos da figura 5.12 que o motor ainda foi capaz de alterar sua velocidade suavemente. Assim, constata-se que estes picos não foram capazes de produzir efeitos que pudessem danificar ou alterar seriamente as condições do motor. Entretanto, é necessário corrigir estas distorções na ação de controle a fim de garantir um aumento na precisão da dosagem do GN fornecida ao motor.

A metodologia adotada, usando uma ação de controle ON/OFF se mostrou eficaz no sentido de provocar transições suaves na rotação do motor durante o seu funcionamento. Pode-se observar através dos gráficos das figuras 5.12 e 5.13 que, nos intervalos de atuação da ação ON/OFF (patamares constantes nas ações de correção dos tempos de injeção) o motor não sofreu variações bruscas em suas variações de rotação.

O bloco de regras desenvolvido para o controlador nebuloso se mostrou adequado para as condições testadas neste trabalho. Os tempos de injeção corrigidos pela ação de controle nebulosa foram capazes de modificar a rotação do motor. Porém, o bloco de regras desenvolvido não é suficiente, pois só foi avaliada a velocidade do motor como referência para a performance. Para se poder desenvolver um sistema que ofereçam melhores resultados devem ser feitas outras experiências com o motor em um dinamômetro sob condições de carga variável. De posse dos resultados destes experimentos devem-se traçar novos blocos de regras até chegar a um ponto ótimo. Apesar disso, outra constatação pode ser salientada: as metodologias adotadas para a fuzzificação e inferência garantem uma boa avaliação das condições dos sinais de entrada. O uso do método CoM para defuzzificação permite a obtenção de saídas contínuas, levando em consideração todas as regras disparadas, sem a ocorrência de falhas ou potenciais erros no processo de tomada de decisões por parte do controlador.

De forma mais geral, pode-se dizer que a seleção do controlador de Mamdani para o desenvolvimento deste tipo de protótipo proporcionou bons resultados. Isto torna esta estratégia de controle uma boa opção para futuros protótipos de gerenciadores de injeção de gás para motores Diesel.

A adoção apenas da velocidade como referência de performance não é suficiente. Deve-se considerar também o consumo e a capacidade de torque para as mais variadas cargas. Assim, deve-se otimizar o funcionamento do motor para três variáveis: velocidade, torque e consumo. Como este trabalho tratou apenas da rotação como parâmetro de performance. Então devem ser feitos estudos futuros para alcançarem-se melhores resultados. Estes estudos devem ser feitos por pessoas especializadas na área de motores de combustão interna.

Como o escopo deste trabalho se refere ao controle de velocidade através do gerenciamento da injeção de GN no motor Diesel, o mesmo não foi testado sob condições de carga. Portanto, novos ensaios devem ser realizados para determinar a capacidade do sistema em responder às oscilações de carga no eixo.

5.7 Resumo deste capítulo

Este capítulo apresentou os resultados dos ensaios experimentais efetuados com o protótipo desenvolvido neste trabalho. Foram demonstradas as capacidades de ajuste do regulador e comprovada a eficácia da estratégia de controle adotada.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES

Nas condições em que foram realizados os ensaios e baseando-se na proposta inicialmente estabelecida, este trabalho comprovou a possibilidade do uso de controladores nebulosos para a realização do gerenciamento da alimentação de GN para motores Diesel. Porém, esta situação limita-se ao motor Diesel operando no regime bi-combustível.

A maior dificuldade no projeto do controlador nebuloso está no desenvolvimento do bloco de regras. Como os demais componentes do controlador (fuzzificador e defuzzificador) já possuem procedimentos matemáticos próprios para o seu tratamento, a complexidade do projeto recai sobre o desenvolvimento do conjunto de regras. Portanto, a determinação do conjunto de regras do controlador depende de heurística, conhecimentos prévios, experimentos com a planta, entrevistas com especialistas e operadores e análises dos resultados obtidos a cada teste.

A determinação de cada ação de controle depende estritamente da resposta da planta à ação de controle anterior. Como o sistema possui uma dinâmica lenta, a demanda computacional dos algoritmos de controle não causam atrasos que venham a comprometer a ação dos equipamentos.

O protótipo se mostrou bastante suscetível a novas alterações e adaptações. Para a realização dos ajustes necessários para novas plantas, basta revisar o bloco de regras e fazer uma análise das necessidades de fornecimento de gás ao motor (vazão necessária, tempos de injeção e ângulo de injeção).

O controlador apresentou um bom desempenho, sendo capaz de fornecer gás ao sistema numa taxa adequada àquela requerida pelo motor. O tempo de resposta da CPU foi suficiente para um processamento adequado e com precisão. O tempo de execução de dados é muito mais veloz que a dinâmica real do processo controlado. Pode-se concluir que o sistema suportaria a implementação de outros recursos (ou melhorias) na mesma CPU sem risco de corrupção da ação de controle.

6.1 Principais contribuições desta dissertação

Como contribuições principais deste trabalho, podem-se citar:

1. Projeto de um regulador eletrônico de velocidade para motores Diesel operando em regime bi-combustível;
2. Estudo sistemático sobre as bases do controle de motores bi-combustível com vistas aos estudos de otimização de sua operação usando lógica nebulosa;
3. Desenvolvimento de uma interface amigável de aquisição de dados que permite uma melhor análise do comportamento do motor e do controlador.

6.2 Sugestões para prosseguimento desta dissertação

Este trabalho não é definitivo. Existe muito ainda a ser desenvolvido para o domínio da tecnologia de controle de motores Diesel operando no regime bi-combustível e usando o GN. As recomendações a seguir poderão ser úteis para os que se propuserem a dar continuação a esta linha de pesquisa.

1. Realizar as correções necessárias no protótipo proposto neste trabalho a fim de se obterem melhores respostas da planta a ser controlada;
2. Aprimorar o controle nebuloso para um controlador neuro-fuzzy. Um algoritmo baseado em inteligência artificial seria capaz de identificar os parâmetros da planta e automaticamente fazer a sintonia do controlador com o processo. Isto reduziria a demanda de operadores especialistas;
3. Aprimorar o protótipo para gerenciar simultaneamente a injeção de Diesel e GN. Para isso, deve-se desenvolver um injetor adequado para a injeção de óleo Diesel;
4. Realizar mais ensaios em dinamômetro, testando variações nas misturas e proporções de gás e Diesel. Procurar examinar outros tipos de combustíveis. Estudar as emissões usando sonda lambda para análise dos gases de saída. Formar um banco de dados para realimentar o controlador e fazer com que o mesmo possa regular automaticamente o fornecimento de combustível de forma a aumentar o desempenho e reduzir as emissões poluentes;
5. Realizar testes de campo com o protótipo usando grupos geradores Diesel. Isto estimularia o uso do GN como combustível, facilitaria o acesso à energia elétrica em

regiões de difícil acesso e estimularia a reciclagem de resíduos através de biodigestores;

6. Projetar e fabricar conjuntos (kits) comerciais que possam ser adaptados a qualquer veículo Diesel, ou motor estacionário, utilizando a tecnologia desenvolvida.

BIBLIOGRAFIA

- [1] BARBOSA, C. R. F. **Desempenho de um motor ciclo Otto com injeção direta de GN**. Tese de doutorado. Escola de engenharia de São Carlos/USP. São Carlos, 1997.
- [2] BHATTACHARYA, T. K.; BACHCHAN, S.; MISHRA, T. N. **A compression ignition engine on biogas-Diesel fuel**. *Agricultural Mechanization en Asia, Africa, e America Latina*, v. 19, n.3, p.32-36. Toquio, [s.n.] 1988.
- [3] BOSCH, R. **Gerenciamento de motor motronic**: gerenciamento de motor para motores Otto. Apostila técnica. [S.l.:s.n.]. 1999.
- [4] BOSCH, R. GmbH.; BAWER, H. et al. **Diesel-engine management**. 3^a ed. Plochingen: [s.n.], jan. 2004.
- [5] CAMARGO, M. N.; **Estudo do comportamento de um motor de ignição por compressão, trabalhando com óleo Diesel e GN**. Dissertação de mestrado. UFSM. Santa Maria, 2003.
- [6] CHALLEN, B; BARANESCU, R. **Diesel engine reference book**. 2^a ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1999.
- [7] CHEN, G.; PHAM, T. T. Fuzzy modeling of control systems. **IEEE transactions on aerospace and electronic systems**. v.31, n. 01, p. 414-419, jan. 1995.
- [8] COOK, J. A.; POWELL, B. K. Modeling of an internal combustion engine for control analysis. **IEEE control systems magazine**. p.20-25, ago. 1988.
- [9] DAVIS, R. I.; LORENZ, R. D. **Engine torque ripple cancellation with na integrated starter alternator in a hybrid electric vehicle**: implementation and control. **IEEE**. p.2016-2021. 2002.
- [10] DE ZANCHE, C. & FRISO, F. **La trattice a biogás è ormai una realta.**: *Macchine & motore agricoli*,. p.23-29. v. 2. Bologna, 1989.
- [11] DELAVIA, D. **Combustíveis para motores endotérmicos** – enfoque para o gás natural. Porto Alegre: UFGRS. Porto Alegre, 2000.
- [12] FERGUSON, C. R. **Internal combustion engines**: applied thermosciences. New York: John Wiley & Sons, 1986.
- [13] FULKS, G.C. High speed solenoid control techniques. **Delco Products Division. General Motors Corporation. IEEE**. p.54-59. Dayton: 1989.

- [14] GANGOPADHYAY, A.; MECKL, P. **Modeling, validation and system identification of a natural gas engine**. In: PROCEEDINGS OF THE AMERICAN CONTROL CONFERENCE. Albuquerque, p.294-298. jun.1997.
- [15] GAO, W.; LI, Y.; LIU, G.; ZHANG, T. **An adaptive fuzzy smith control of time-varying processes with dominant and variable delay**. In: PROCEEDINGS OF THE AMERICAN CONTROL CONFERENCE. Denver, p.220-224. jun.2003.
- [16] GARRET, T. K. **Automotive fuels and fuel systems: Volume 2: Diesel**. 1st ed. London: Pentech Press, 1994.
- [17] GIACOSA, D. **Motores endotermicos**. 3.ed. Barcelona: Editorial Dossat: 1986.
- [18] GUZELLA, L.; AMSTUTZ, A. **Control of diesel engines**. IEEE control systems. p.53-71, out. 1998.
- [19] HENHAM, A.; MAKKAR, M. K. **Combustion of simulated biogás in a dual-fuel diesel engine**. Energy convers. Great Britain: v.39, n.16, p.2001-2009. 1998.
- [20] INFORM GmbH. **fuzzyTECH 5.5[®]**: User's Manual. ©INFORM GmbH/Inform Software Corporation. [S.l.:s.n.], 2001.
- [21] KARRAY, F.; CONRAD, E. **Design of intelligent controllers for electronic speed regulation of a diesel engine**. In: FIRST INTERNATIONAL CONFERENCE ON KNOWLEDGE-BASED INTELLIGENT ELECTRONIC SYSTEMS. Adelaide, p.607-616. mai. 1997.
- [22] KECMAN, V. **Learning and soft computing: support vector machines, neural networks, and fuzzy logic models**. 1st ed. Massachusetts: The MIT Press, 2001.
- [23] LI, Y.; GAO, W.; LIU, K.; **A fuzzy smith control of diesel fuel injection quantity**. IEEE. 2001. doc n.20014561.
- [24] LI, Y.; GAO, W.; ZHOU XIAO; **The adaptive fuzzy control of electromagnetic actuator in diesel fuel injection system**. 2002
- [25] LI, Y.; LIU, G.; ZHOU, X. **Fuel-injection control system design and experiments of a diesel engine**. IEEE transactions on control systems technology. v.11, n.4, p.565-570, jul. 2003.
- [26] MCDONALD; D. **Engine position tracking at shutdown**. In.: SAE TECHNICAL PAPER SERIES. Sae world congress. Detroit: Sae International, abr., 2005.
- [27] MENDEL, J. M. **Fuzzy logic systems for engineering: a tutorial**. Proceedings of the IEEE. v.83, n. 3, p. 345-377, mar. 1995.

- [28] OUTIB, R.; DOVIFAAZ, X.; RACHID, A.; OULADSINE, M. In: PROCEEDINGS OF THE AMERICAN CONTROL CONFERENCE. Anchorage, p.3293-3294. may 2002.
- [29] PADILHA, A.S. **Desenvolvimento de um controlador neurofuzzy para climatização automatizada de aviários de frango de corte.** 2001. 80f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2001.
- [30] PASSARINI, L.C.; NAKAJIMA, P.R. **Development of a high-speed solenoid valve:** an investigation of the importance of the armature mass on the dynamic response. Journal of the brazilian society of mech. sci. & eng. v.25, n.4, p.329-335, out/dez. São Paulo, 2003.
- [31] PEATMAN, J. B. **Design with PIC microcontrollers.** New Jersey: Prentice Hall, 1998.
- [32] RABBATH, C. A.; DESIRA, H.; BUTTS, K. **Effective modeling and simulation of internal combustion engine systems.** In: PROCEEDINGS OF THE AMERICAN CONTROL CONFERENCE. Arlington, p.1321-1326. jun.2001.
- [33] RIZZONI, G. **A stochastic model for the indicated pressure process and the dynamics of the internal combustion engine.** IEEE transactions on vehicular technology. v.38, n.3, p.180-192, ago.1999.
- [34] RIZZONI, G. **Estimate of indicated torque from crankshaft speed fluctuations: a model for the dynamics of the ic engine.** IEEE transactions on vehicular technology. v.38, n.3, p.168-179, ago.1999.
- [35] ROSCHKE, T. GERLACH, G. **An equivalent network model of a controlled solenoid.** Proceedings of the IASTED International Conference – applied modelling and simulation. p.241-244. Banff, jul/ago.1997.
- [36] SHAW, I. S.; SIMÕES, M. G. **Controle e modelagem fuzzy.** 1. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2001.
- [37] SILVA, F. M.; SALVADOR, N.; SANTOS, A. M. et alii. **Desempenho de um trator acionado a duplo combustível – metano e Diesel.** Lavras: Universidade Federal de Lavras. Lavras 1999.
- [38] SOUZA, D. J. **Desbravando o PIC** 2.ed. São Paulo: Editora Érica, 2000.
- [39] TAYLOR, C. F. **Análise dos motores de combustão interna.** v.1. São Paulo: Edgard Blücher, 1971.

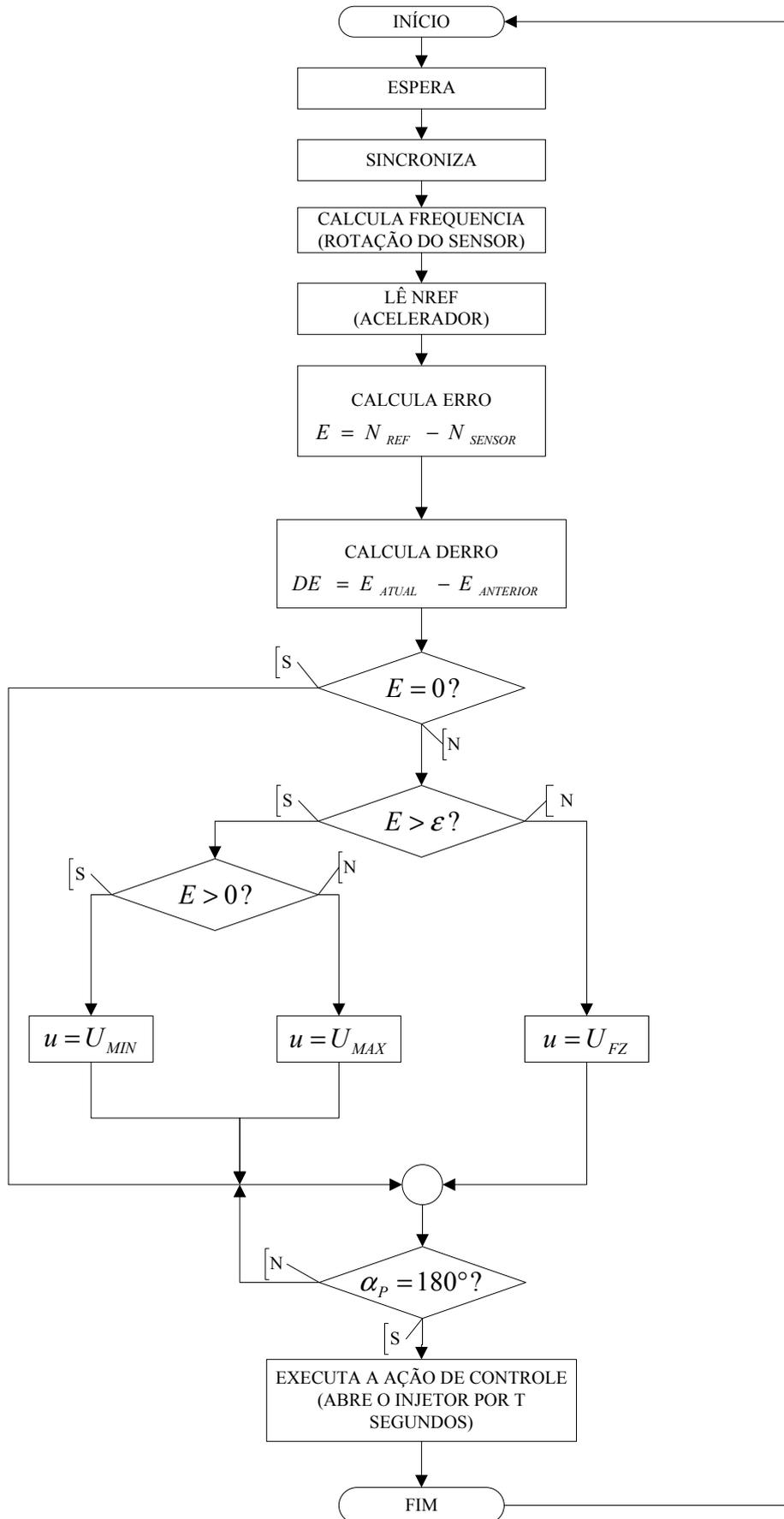
- [40] THOMPSON, B. **Fuel injector waveforms: sliced extra thin**. Motor.[S.l.:s.n.], jan. 2005. Disponível em: <http://www.motor.com/MAGAZINE/Pdf/012005_04.pdf>. Acesso em: 23 jan. 2005.
- [41] TSOUKALAS, L. H.; UHRIG, R. E. **Fuzzy and neural approaches in engineering**. New York: John Wiley & Sons, 1996.
- [42] WANG, L. **Adaptive fuzzy systems and control: design and stability analysis**. Englewood Cliffs: PTR Prentice Hall, 1994.
- [43] WEBER, L. KLEIN, P.A.T. **Aplicação da lógica fuzzy em software e hardware**. 1ª ed. Canoas: Ulbra, 2003.
- [44] WEIGE, Z.; JIUNCHUN, J.; YUAN, X.; XIDE, Z. **CNG engine air-fuel ratio control using fuzzy neural networks**. In: PROCEEDINGS OF THE 2ND INTERNATIONAL WORKSHOP ON AUTONOMOUS DECENTRALIZED SYSTEM. [S.l.:s.n.]. IEEE. 2002.
- [45] ZIEBA, J. **Simulation of a solenoid actuator for a device for investigating dynamic air permeability through flat textile products**. *Fibres & Textiles in Eastern Europe*. v.11, n.2(41), p.85-87, abr/jun. Łódź, 2003.
- [46] ZIMMERMANN, H.J. **Fuzzy set theory: and its applications**. 3rd ed. Boston: Kluwer Academic Publishers, 1996.
- [47] ZWEIRI, Y.H.; WHIDBORNE, J.F.; SENEVIRATNE, L. D. **A mathematical transient model for the dynamics of a single-cylinder diesel engine**. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SIMULATION. [S.l.]. Conference publication, n.457, p.145-149, set.1998.

APÊNDICE A – FLUXOGRAMAS

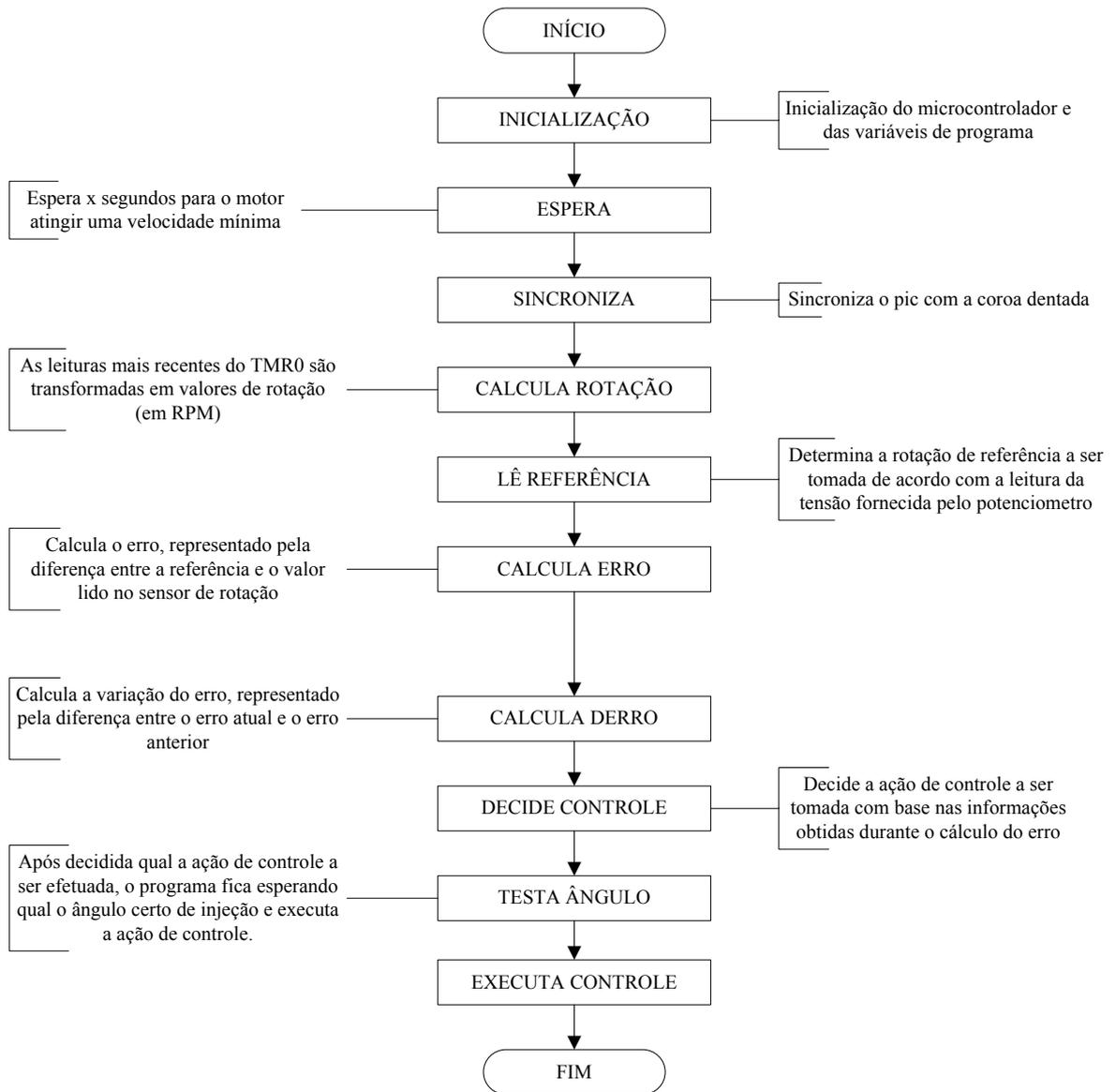
A.1 Introdução

Este apêndice tem o objetivo de expor, em detalhes, os fluxogramas desenvolvidos e utilizados para implementar o sistema de gerenciamento eletrônico de gás natural. Estes fluxogramas destinam-se a orientar os procedimentos computacionais necessários às ações de correção dos tempos de injeção requeridas do controlador.

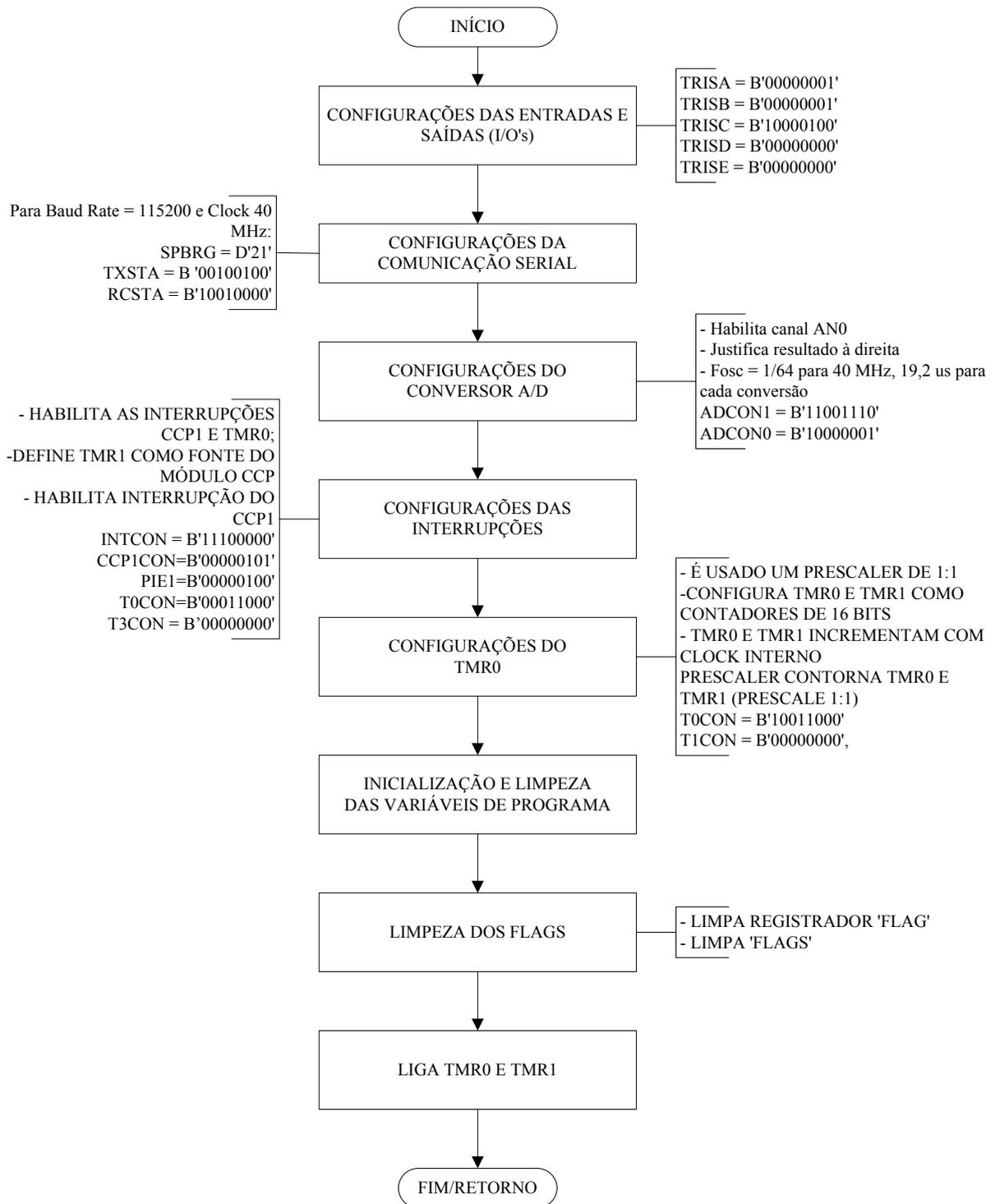
FLUXOGRAMA-BASE



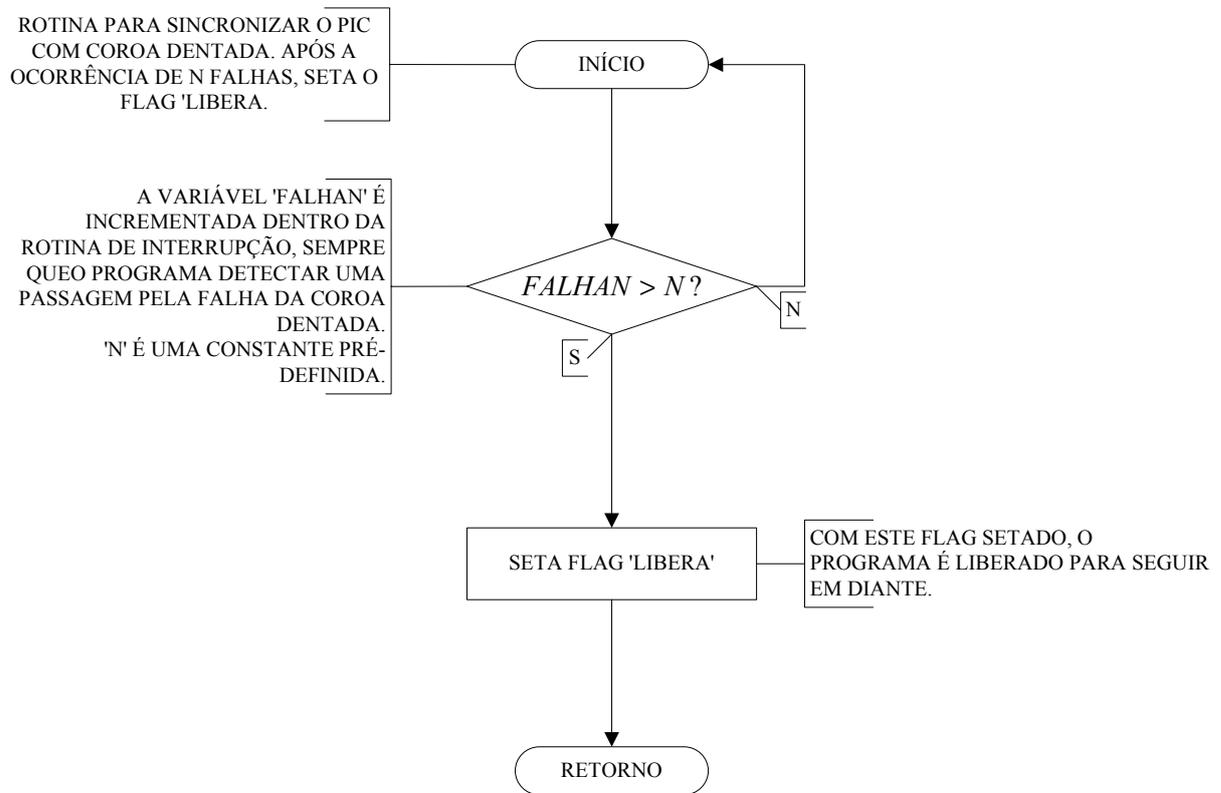
FLUXOGRAMA PRINCIPAL



SUB-ROTINA DE INICIALIZAÇÃO DO MICROCONTROLADOR E DAS VARIÁVEIS DE PROGRAMA

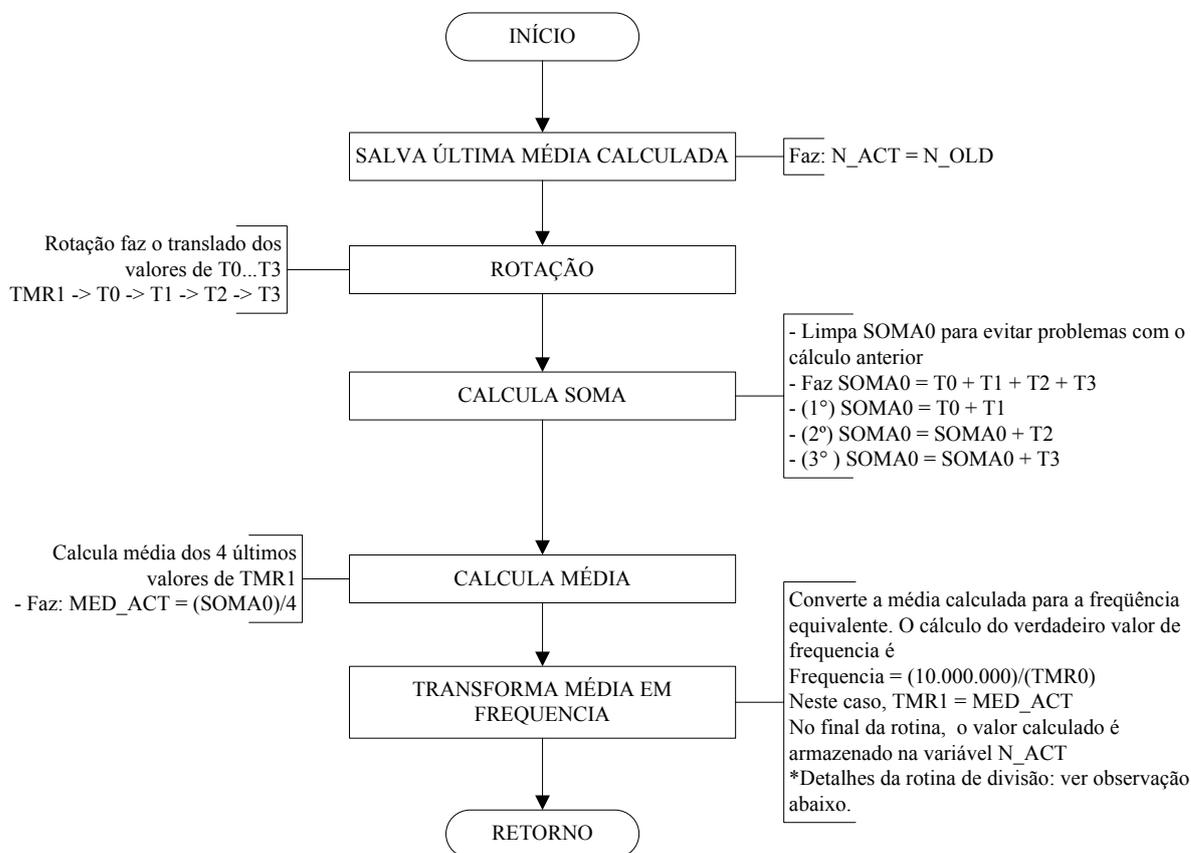


SUB-ROTINA DE SINCRONIZAÇÃO



Obs.: Dentro da rotina de interrupção há uma rotina que compara o contador de pulsos com o contador de falhas. Se for verificado que o contador de pulsos passou do valor pré-definido e não foi registrada a ocorrência de falhas, o flag 'LIBERA' será limpo dentro da interrupção, forçando o microcontrolador a re-sincronizar novamente através desta sub-rotina. Serão perdidas 'N' voltas da coroa para esta operação.

SUB-ROTINA PARA CÁLCULO DA FREQUENCIA



Observação: Detalhe da rotina de divisão

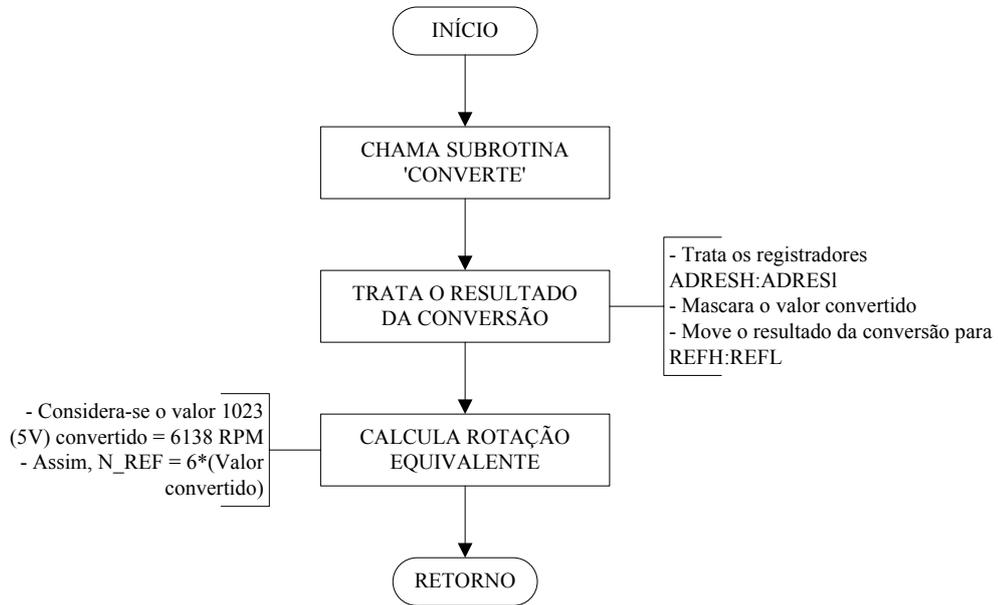
Divisao :

Dividendo(24 bits)/Divisor(24 bits)->Dividendo(24 bits) com Resto em RestoHH & RestoHL & RestoLL (24 bits)

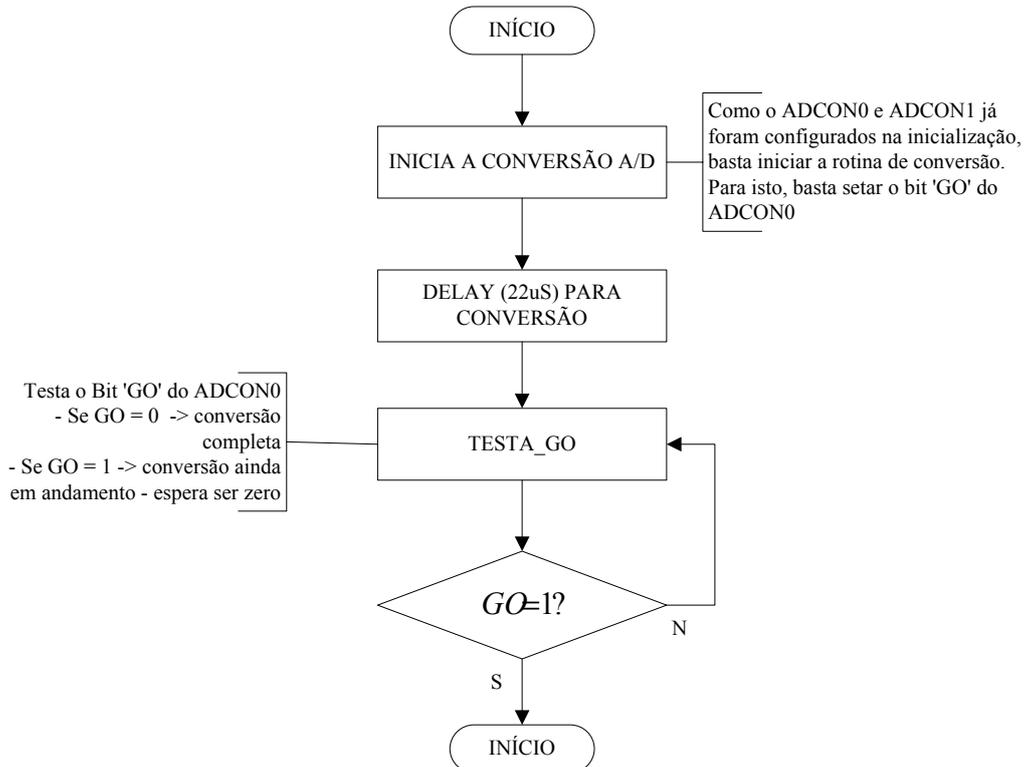
- (a) Carregar Divisor em DivisorHH & DivisorHL & DivisorLL (24 bits)
- (b) Carregar DividendoHH & DividendoHL & DividendoLL (24 bits)
- (c) CALL Dividir
- (d) O resultado estará em DividendoHH & DividendoHL & DividendoLL
- (e) O Resto em RestoHH & RestoHL & RestoLL (24 bits)

O DIVIDENDO CONTEM O VALOR DE 10.000.000 = H'989680'
 O DIVIDENDO É UM VALOR DE 24 BITS
 O DIVISOR CONTEM O VALOR DE MED_ACT, MAS
 COMO MED_ACT É DE 16 BITS, E O DIVIDENDO DE 24 BITS,
 MED_ACT PASSARÁ A SER CONSIDERADO COMO: 00:N_ACTH:N_ACTL

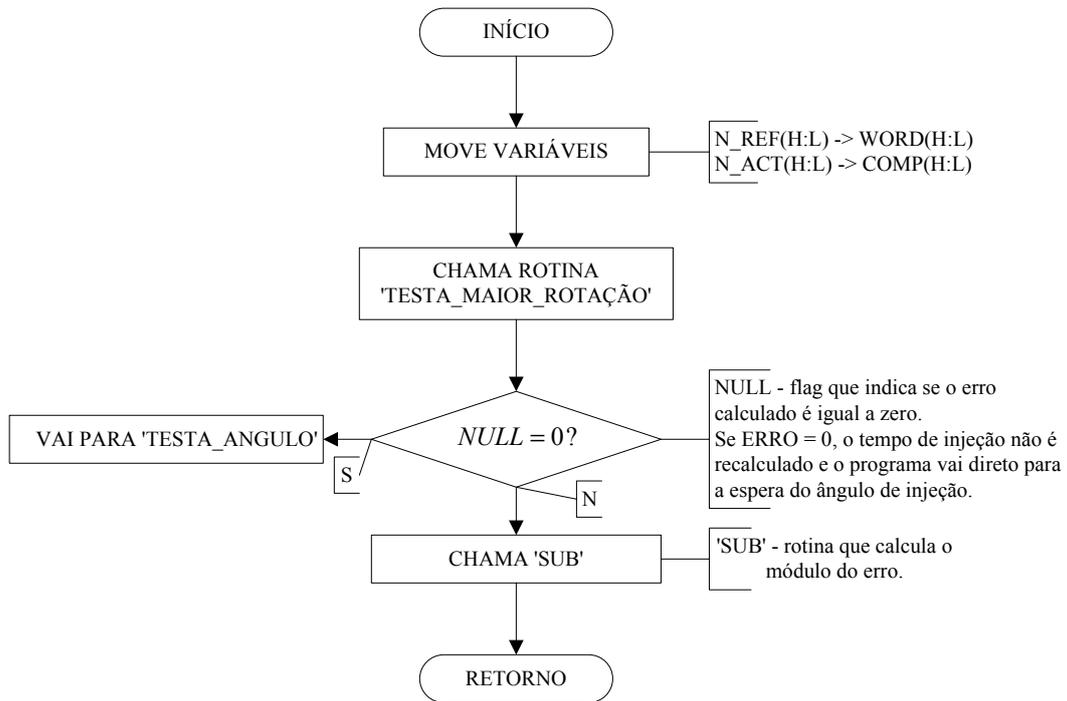
SUB-ROTINA PARA TRATAMENTO DA LEITURA DO POTENCIÔMETRO/REFERÊNCIA



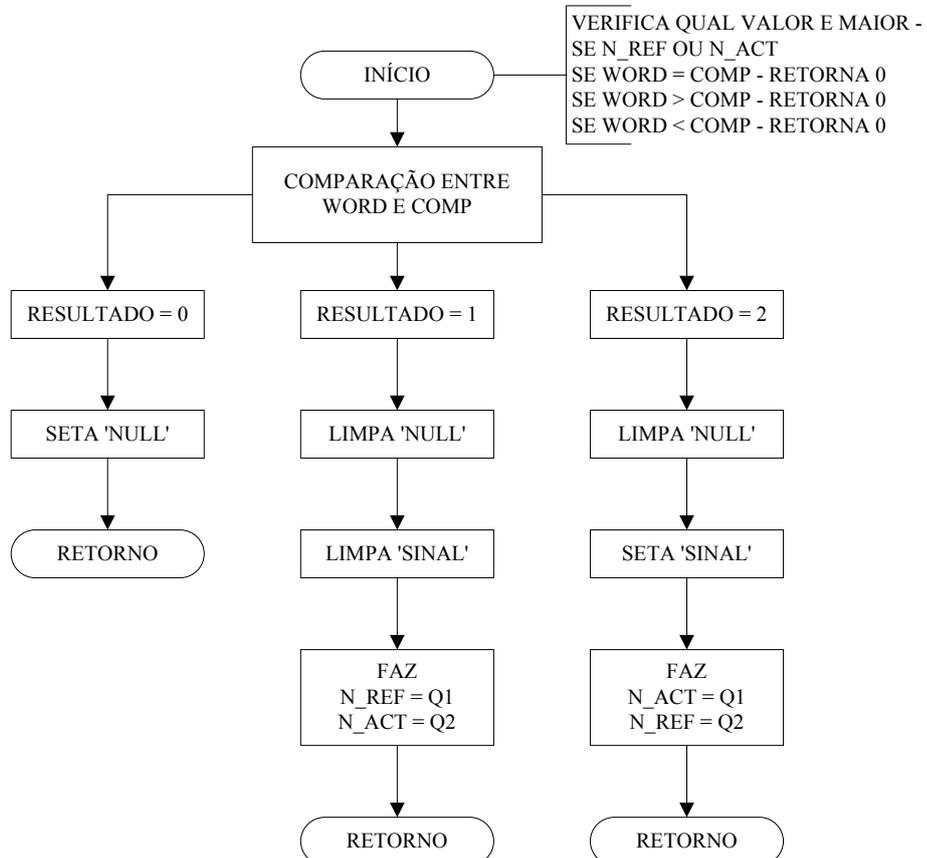
SUB-ROTINA PARA CONVERSÃO ('CONVERTE')



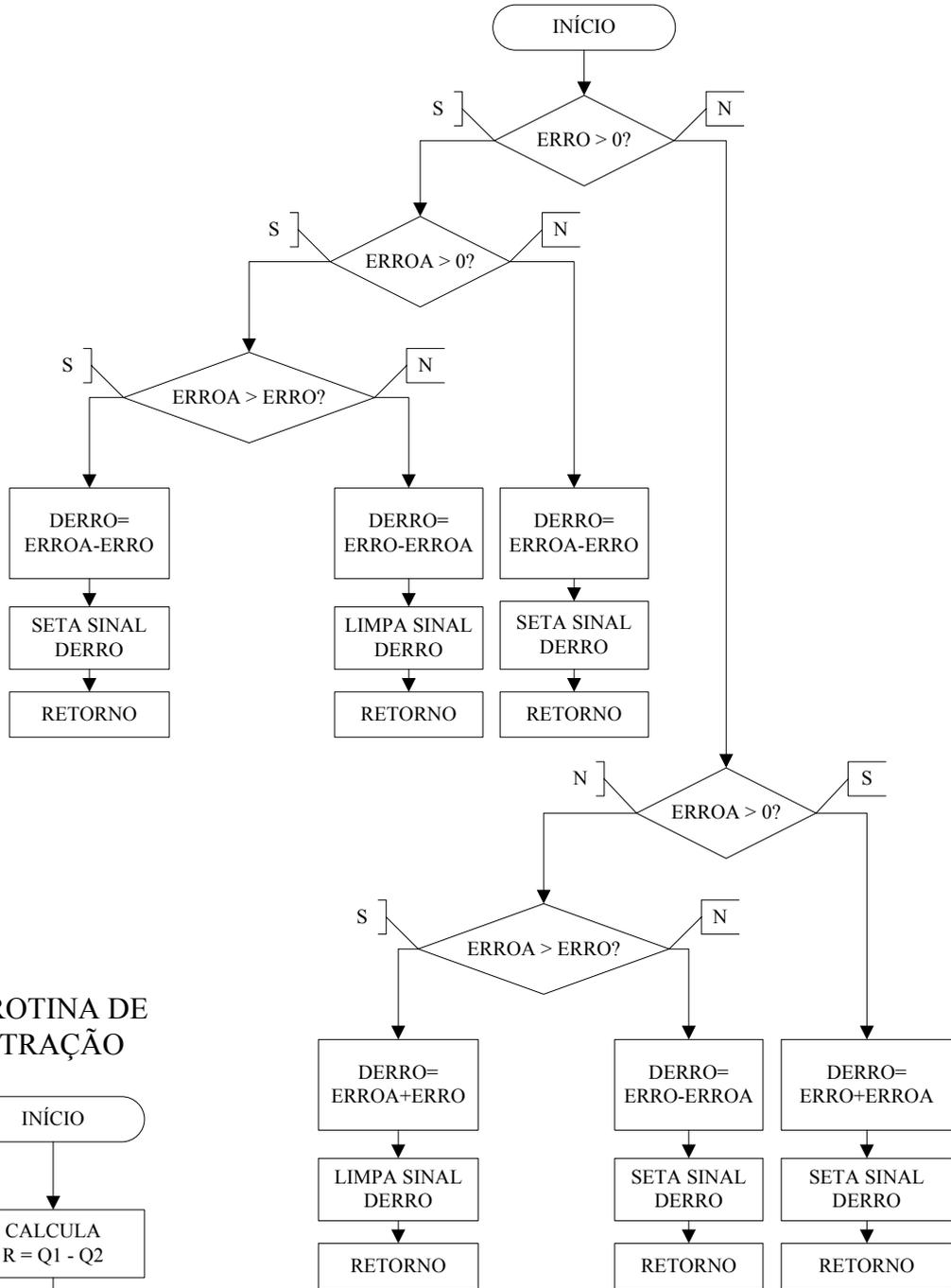
SUB-ROTINA PARA CÁLCULO DO ERRO



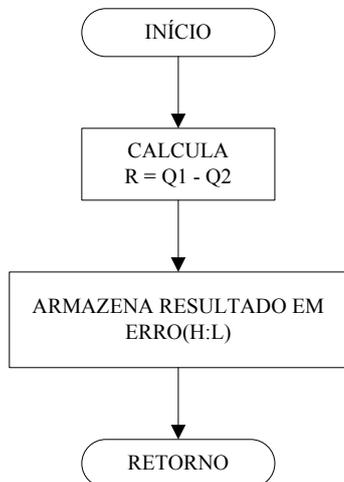
SUB-ROTINA 'TESTA_MAIOR_ROTACÃO'



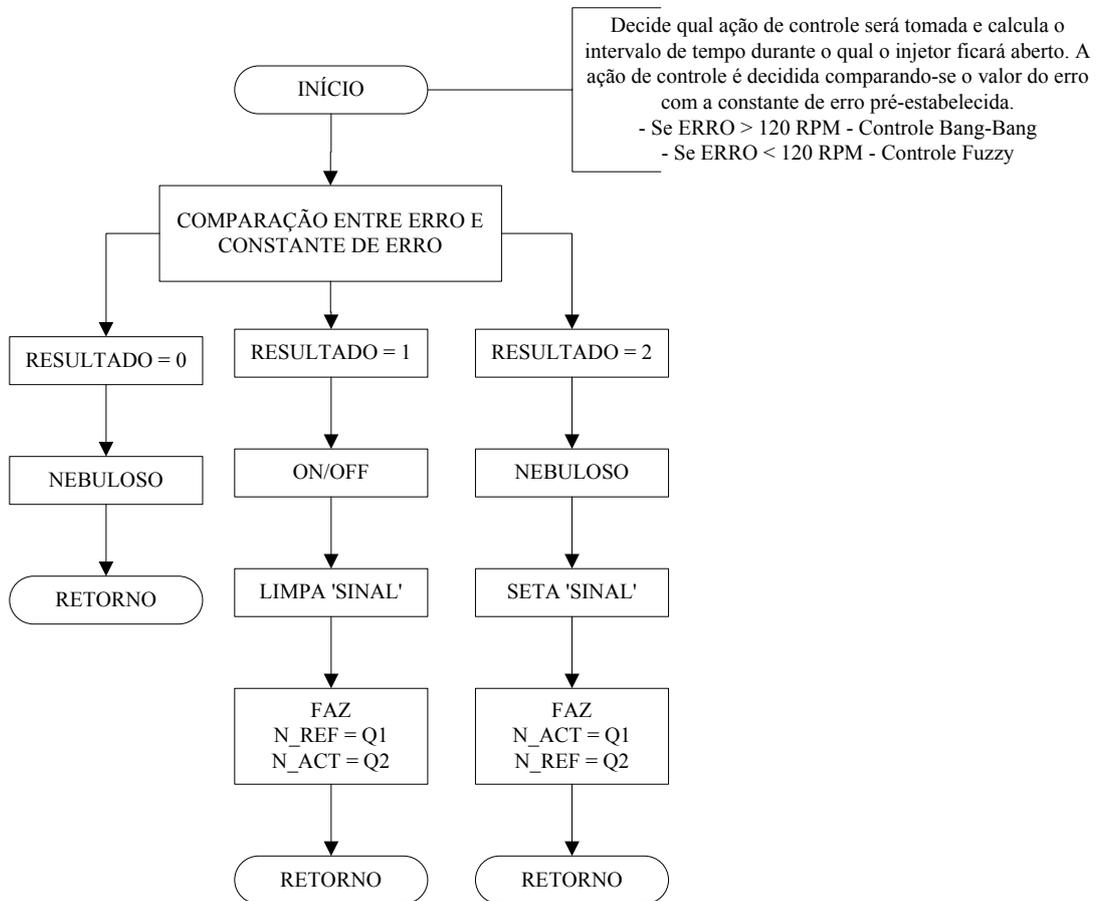
SUB-ROTINA PARA CÁLCULO DO DERRO



SUB-ROTINA DE SUBTRAÇÃO

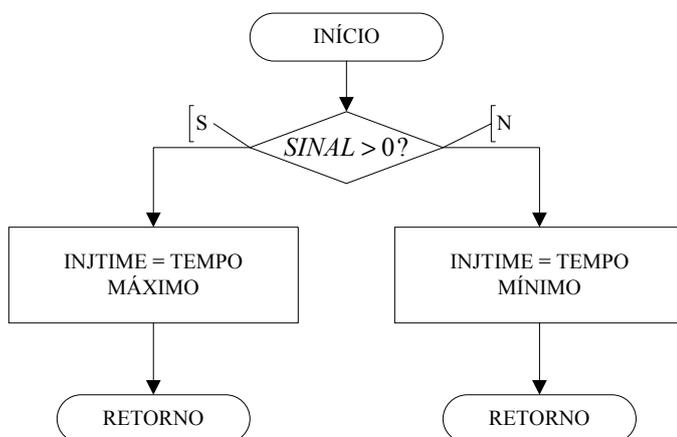


SUB-ROTINA DE DECISÃO DA AÇÃO DE CONTROLE

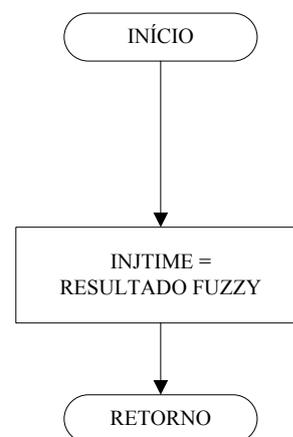


SUB-ROTINA ON/OFF E NEBULOSA

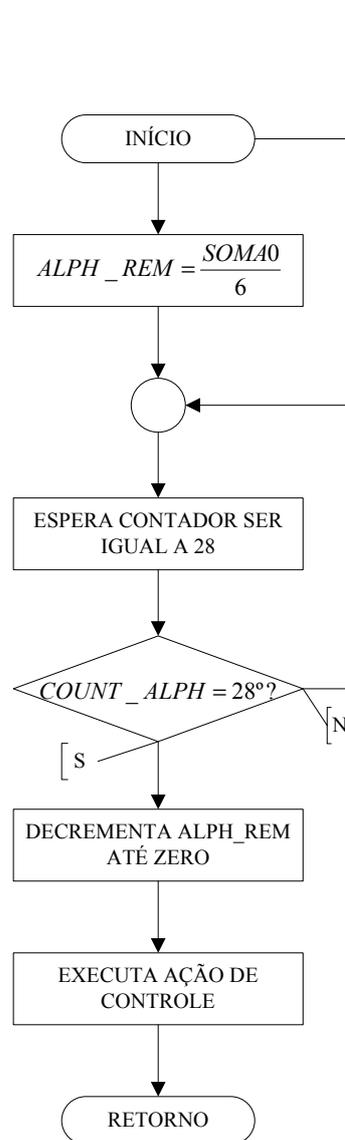
ON/OFF



NEBULOSA

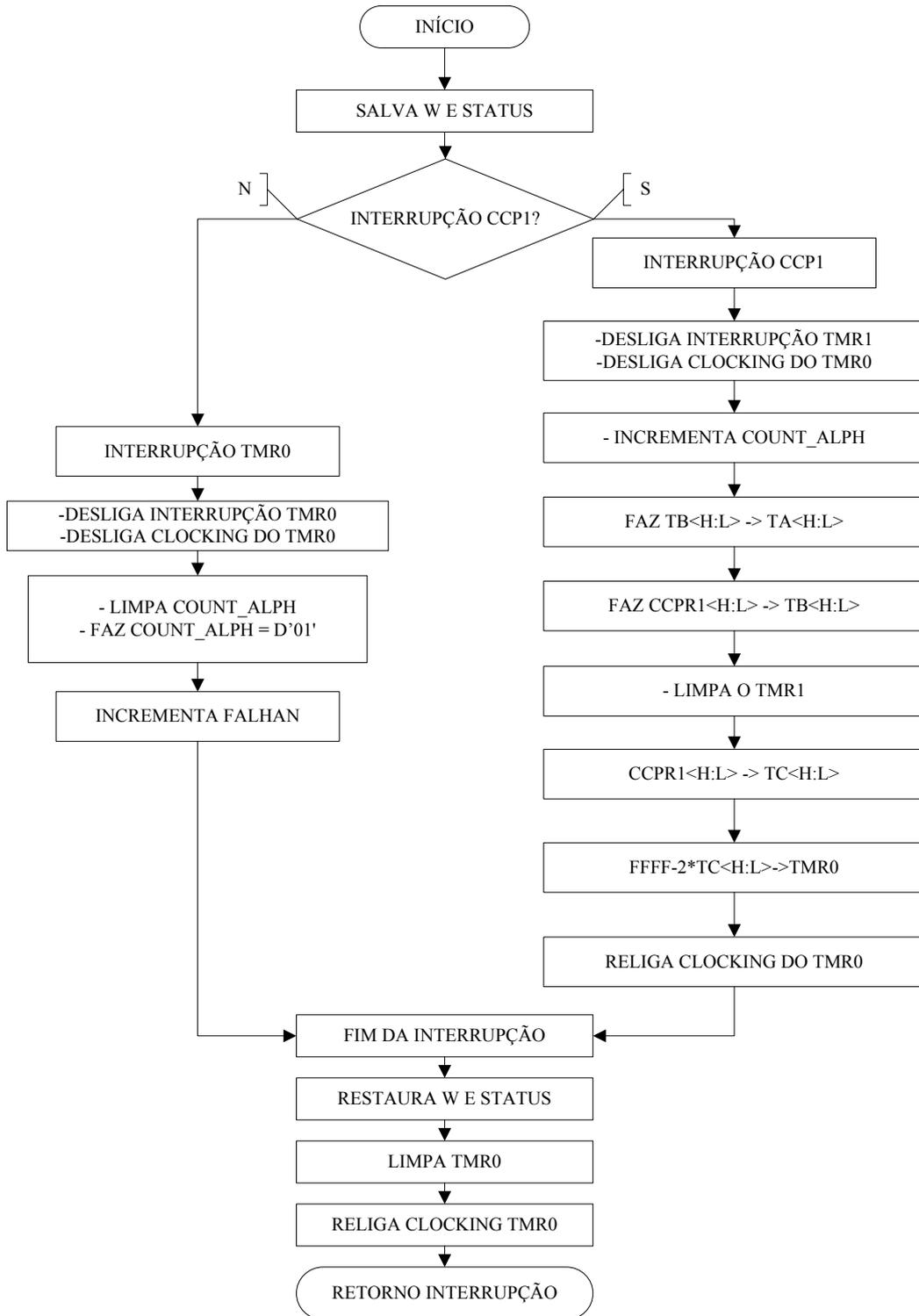


SUB-ROTINA DE VERIFICAÇÃO DO ÂNGULO DE INJEÇÃO



Esta rotina verifica se já chegou o ângulo correto de injeção. Inicialmente, deve-se fazer a média das contagens do valor de TMR1, que estão armazenadas na variável SOMA0. A variável ALPH_REM guarda o número de contagens por pulso com base na média de SOMA0. Para isso, considera-se que cada pulso equivale a 6 graus de ângulo de manivela. Assim:
 $ALPH_REM = SOMA0/6$ (contagens/6°/pulso). Quando o pulso 28 for detectado, ALPH_REM será decrementada e quando for zero, será realizada a ação de controle.

ROTINAS DE INTERRUPÇÕES

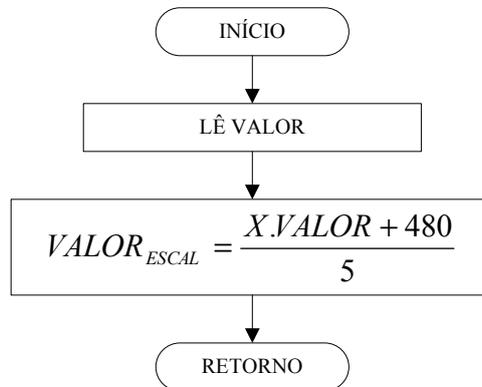


Observações sobre as interrupções:

1) Rotina de Interrupção do TMR0: Esta rotina registra a ocorrência da falha na coroa dentada. Toda a vez que houver um "overflow" do TMR0, isto implicará na ocorrência da falha dos dois dentes.

2) Rotina de Interrupção do Módulo CCP1: Esta rotina registra a largura de cada pulso gerado pela coroa dentada e a posição angular do motor através da contagem dos pulsos. Assim, é possível determinar-se com precisão a frequência de rotação do motor e o ponto correto para injeção de combustível. Nesta rotina também, inicia-se o contador do TMR0 para determinação da falha. O cálculo é o seguinte: se a largura do próximo pulso for maior que o dobro do pulso atual, então ocorre a falha e a CPU gera uma interrupção por estouro do TMR0.

ESCALONAMENTO DE ERRO E DERRO



Observações sobre a rotina de escalonamento:

1) Esta é uma rotina de interpolação usada para converter as faixas de valores do ERRO e do DERRO para uma faixa de valores compatível com a capacidade de processamento do microcontrolador, isto é, realiza-se a seguinte conversão:

$$-120 \leq ERRO \leq 120 \rightarrow 0 \leq ERRO \leq 255$$

$$-240 \leq DERRO \leq 240 \rightarrow 0 \leq DERRO \leq 255$$

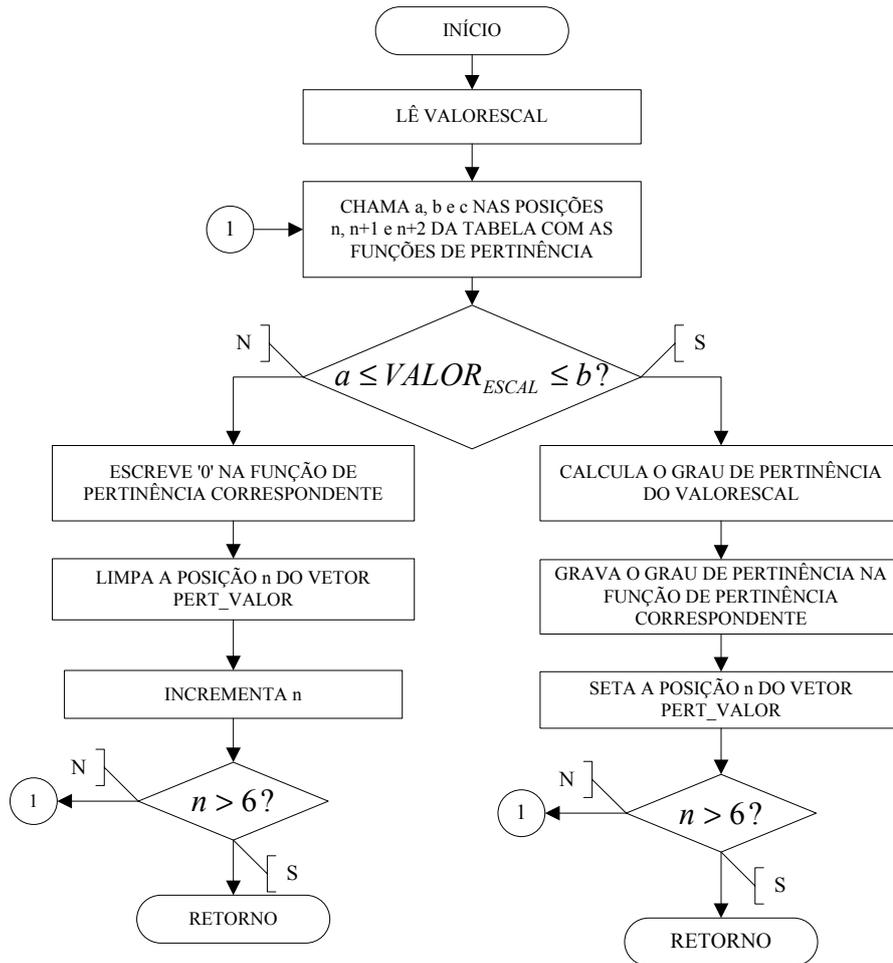
Dessa forma, é possível tratar ERRO e DERRO dentro de uma faixa de valores inteiros e positivos de até 8 bits

2) Esta rotina aplica-se tanto ao ERRO quanto ao DERRO. Assim, no fluxograma, no lugar das expressões "VALOR", "VALOR_{ESCAL}" e "X", deve-se fazer as seguintes substituições:

Para o cálculo do ERRO: VALOR = ERRO, VALOR_{ESCAL} = ERRO_{ESCAL} e X = 4

Para o cálculo do DERRO: VALOR = DERRO, VALOR_{ESCAL} = DERRO_{ESCAL} e X = 2

ROTINA DE FUZZIFICAÇÃO



Observações sobre a rotina de fuzzificação:

- 1) Esta rotina destina-se à determinação dos graus de pertinência das variáveis de entrada (ERRO e DERRO).
- 2) O processo de fuzzificação utiliza funções de pertinência triangulares (tipo λ), cuja equação é dada por:

$$\mu(x) = \begin{cases} 0 & \text{se } x < a \\ \frac{x-a}{c-a} & \text{se } x \in [a, c] \\ \frac{b-x}{b-c} & \text{se } x \in [c, b] \\ 0 & \text{se } x > b \end{cases} \quad \text{onde: } \begin{cases} a = \text{limite inferior do suporte da função (representado na tabela pela posição "n")} \\ b = \text{limite superior do suporte da função (representado na tabela pela posição "n+1")} \\ c = \text{é o vértice (representado na tabela pela posição "n+2").} \end{cases}$$

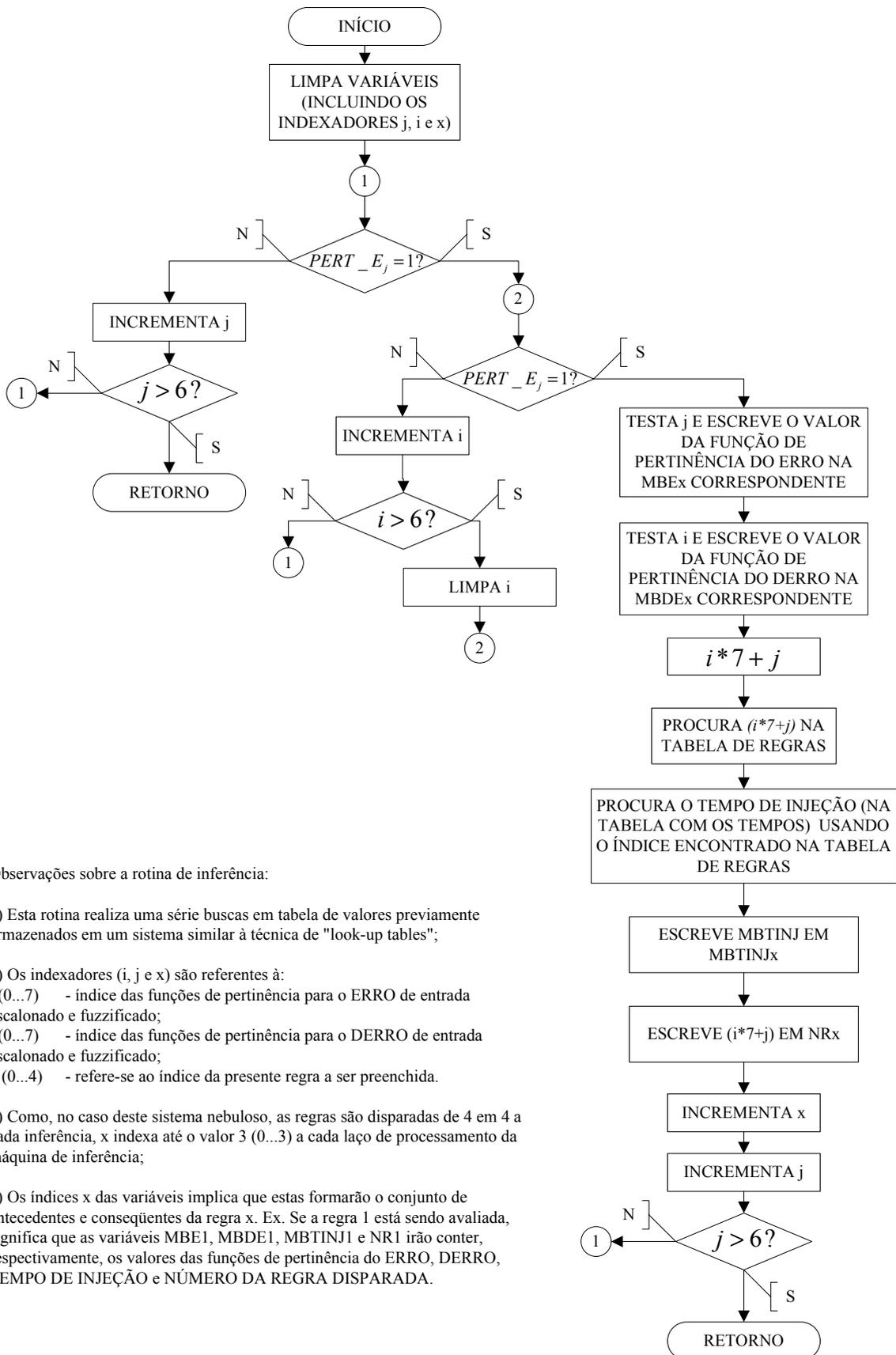
- 2) A cada laço de execução esta rotina busca os valores de a, b e c, armazenados previamente em uma tabela na memória do microcontrolador.
- 3) Para as funções de pertinência do ERRO e DERRO, existem as seguintes variáveis, que armazenam os resultados fuzzificados:

ERRO: NB_E,NM_E,NS_E,Z_E,PS_E,PM_E,PB_E
 DERRO: NB_DE,NM_DE,NS_DE,Z_DE,PS_DE,PM_DE,PB_DE

- 4) Como o microcontrolador não é capaz de armazenar valores entre 0 e 1 para os graus de pertinência, então, as funções de pertinência armazenam os graus de pertinência dentro das seguintes faixas:
 GRAU 0 = VALOR totalmente não-membro da função;
 GRAU 255 = VALOR totalmente membro da função.

- 5) Além das variáveis com as funções de pertinência, existem mais dois vetores de sinalizadores, indicados por PERT_VALOR (onde VALOR pode ser ERRO ou DERRO). Cada bit deste vetor indica a ocorrência ou não de uma função de pertinência que possua um grau de participação válido. Este vetor é usado na rotina de agregação das funções de pertinência para determinação das regras a serem ativadas.

ROTINA DE INFERÊNCIA



Observações sobre a rotina de inferência:

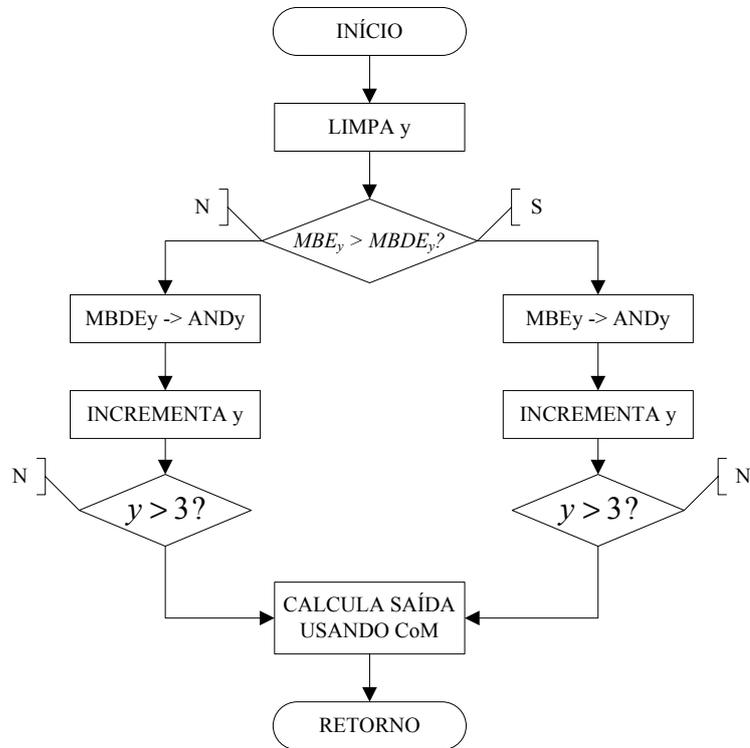
1) Esta rotina realiza uma série buscas em tabela de valores previamente armazenados em um sistema similar à técnica de "look-up tables";

2) Os indexadores (i, j e x) são referentes à:
 j (0...7) - índice das funções de pertinência para o ERRO de entrada escalonado e fuzzificado;
 i (0...7) - índice das funções de pertinência para o DERRO de entrada escalonado e fuzzificado;
 x (0...4) - refere-se ao índice da presente regra a ser preenchida.

3) Como, no caso deste sistema nebuloso, as regras são disparadas de 4 em 4 a cada inferência, x indexa até o valor 3 (0...3) a cada laço de processamento da máquina de inferência;

4) Os índices x das variáveis implica que estas formarão o conjunto de antecedentes e conseqüentes da regra x. Ex. Se a regra 1 está sendo avaliada, significa que as variáveis MBE1, MBDE1, MBTINJ1 e NR1 irão conter, respectivamente, os valores das funções de pertinência do ERRO, DERRO, TEMPO DE INJEÇÃO e NÚMERO DA REGRA DISPARADA.

ROTINA DE AGREGAÇÃO/DEFUZZIFICAÇÃO



Observações sobre a rotina de agregação/defuzzificação:

1) Esta compara os antecedentes de cada regra e armazena o menor na variável AND_y , onde y é um indexador que varia entre 0 e 3. Assim, para cada conjunto de 4 regras tem-se 4 AND's agregados.

2) Os resultados das agregações, combinados com os consequentes das regras, são usados para calcular o tempo de abertura do injetor através do cálculo do Centro dos Máximos (CoM). A equação abaixo representa este cálculo:

$$T_{inj} = \frac{\sum_{y=0}^3 AND_y \cdot \sum_{x=0}^3 MBT_{inj_x}}{\sum_{y=0}^3 AND_y}$$

onde x é o indexador das regras e varia de 0 até 3.

VARIÁVEIS UTILIZADAS NO PROGRAMA

- Registradores temporários: W_TEMP,STATUS_TEMP
- Conversão A/D:
 - REFH:REFL (valor de referência, lido no potenciômetro)
 - N_REFH:NREFL
 - TMP,TEMPO
 - COUNTH:COUNTL
- Variáveis para o cálculo do erro:
 - ERROH:ERROL
 - ERROAH:ERROAL (erro antigo)
 - ERROH_TMP:ERROL_TMP
- Variáveis para determinar o ângulo de manivela:
 - ALPHAH:ALPHAL
 - ALPH_REMH:ALPH_REML
 - COUNT_ALPHA
- Variáveis para determinar a frequência do sinal de entrada. São variáveis de 16 bits que armazenam as contagens anteriores do TMR0:
 - TMR0LW,TMR0HH
 - T0H,T0L,T1H,T1L
 - T2H,T2L,T3H,T3L
 - TAH,TAL,TBH,TBL,TCH,TCL
 - TXH,TXL,TYH,TYL,TZH,TZL
- Variáveis para cálculo da soma de T0..T3
 - SOMA0L,SOMA0H,SOMA0U
- VARIÁVEIS PARA ARMAZENAR O VALOR DA MEDIA DAS CONTAGENS
 - N_OLDH,N_OLDL MED_OLD ARMAZENA O VALOR ANTERIOR DA MEDIA
 - N_ACTU,N_ACTH,N_ACTL MED_ACT ARMAZENA O VALOR DA ULTIMA MEDIA CALCULADA
- VARIÁVEIS UTILIZADAS PARA AS ROTINAS DE DIVISAO
 - DivisorHH,DivisorHL,DivisorLL
 - DividendoHH,DividendoHL,DividendoLL
 - RestoHH,RestoHL,RestoLL
 - ACCdHH,ACCdHL,ACCdLL
 - DIVIDENDHI,DIVIDENDLO,DIVISORHI,DIVISORLO
 - QUOTIENTHI,QUOTIENTLO,REMAINDERHI,REMAINDERLO
 - Temp
- SINALIZADORES
 - FLAG ;REGISTRADOR DE FLAGS
 - FLAGS
- ARMAZENAMENTO TEMPORARIO
 - TEMP1H:TEMP1L
 - Q1_HI:Q1_LO,Q2_HI:Q2_LO,R_HI:R_LO ;USADOS NA SUBTRACAO
 - hi_comp:lo_comp,hi_word:lo_word ;USADOS NA COMPARACAO
 - T0_TESTH:T0_TESTL ;USADO PARA VERIFICAR A FALHA COM TMR0
 - FALHAN ;ARMAZENA A OCORRENCIA DE FALHAS
- ACAO DE CONTROLE
 - INJTIME ;ARMAZENA O TEMPO QUE O BICO FICARA ABERTO

VARIÁVEIS UTILIZADAS NO PROGRAMA - CONTINUAÇÃO

- VARIÁVEIS FUZZY
 - NC,IC,JC,TC ;CONTADORES
 - TBLP ;REFERENCIA PARA BUSCA NAS TABELAS
 - RC ;REGISTRO DOS FLAGS PARA REGRAS GRAVADAS
 - RULE_COUNT

- VARIÁVEIS PARA FUZZIFICACAO
 - PONTO1,PONTO2,VERTICE,ALFA1,ALFA2
 - DELTA1H,DELTA1L,DELTA2H,DELTA2L
 - MB_VAL
 - NB_E,NM_E,NS_E,Z_E,PS_E,PM_E,PB_E(RERESULTADOS FUZZIFICADOS)
 - NB_DE,NM_DE,NS_DE,Z_DE,PS_DE,PM_DE,PB_DE
 - PERT_E,PERT_DE ;FLAGS PARA INDICAR AS PERTINENCIAS NAO-NULAS

- VARIÁVEIS PARA A INFERENCIA
 - MBE0,MBDE0,MBTINJ0,NR0
 - MBE1,MBDE1,MBTINJ1,NR1
 - MBE2,MBDE2,MBTINJ2,NR2
 - MBE3,MBDE3,MBTINJ3,NR3

- VARIÁVEIS PARA A ROTINA DE AGREGACAO
 - AG_AND0,AG_AND1,AG_AND2,AG_AND3
 - INJTIMEL,INJTIMEH

- VARIÁVEIS PARA AS ROTINAS DE TRANSMISSAO SERIAL
 - VARH,VARL
 - milhao, milhar, centena, dezena,unid
 - MARC_H,MARC_L,BYTE_LOW,BYTE_HI
 - ADH,ADL
 - COUNTH,COUNTL
 - CONTADOR

SINALIZADORES E PORTAS

```
#DEFINE SINAL          FLAG,0      ;SE SINAL(ERRO)> 0 - FLAG = 0
                        ;SE SINAL(ERRO)< 0 - FLAG = 1

#DEFINE NULL          FLAG,1      ;SE ERRO = ZERO  - FLAG = 1
                        ;SE ERRO <> ZERO - FLAG = 0

#DEFINE FALHA         FLAG,2      ;SE HOUVE FALHA - 1
                        ;SE NAO HOUVE FALHA - 0

#DEFINE LIBERA        FLAG,3      ;SETADO APOS A OCORRENCIA DE N FALHAS

#DEFINE REGIME        FLAG,4      ;FLAG Q. INDICA O FIM DO DELAY INICIAL

#DEFINE GotNewData    FLAG,5      ;bit indicates new data received

#DEFINE SINAL_DE      FLAG,6      ;SE SINAL(DERRO) > 0 - FLAG = 0
                        ;SE SINAL(DERRO) < 0 - FLAG = 1

#DEFINE SINAL_ERROA   FLAG,7      ;GUARDA O SINAL DO ERRO ANTERIOR

;-----

#DEFINE REGRA1        RC,0        ;BIT 0 = REGRA1

#DEFINE REGRA2        RC,1        ;BIT 0 = REGRA1

#DEFINE REGRA3        RC,2        ;BIT 0 = REGRA1

#DEFINE REGRA4        RC,3        ;BIT 0 = REGRA1

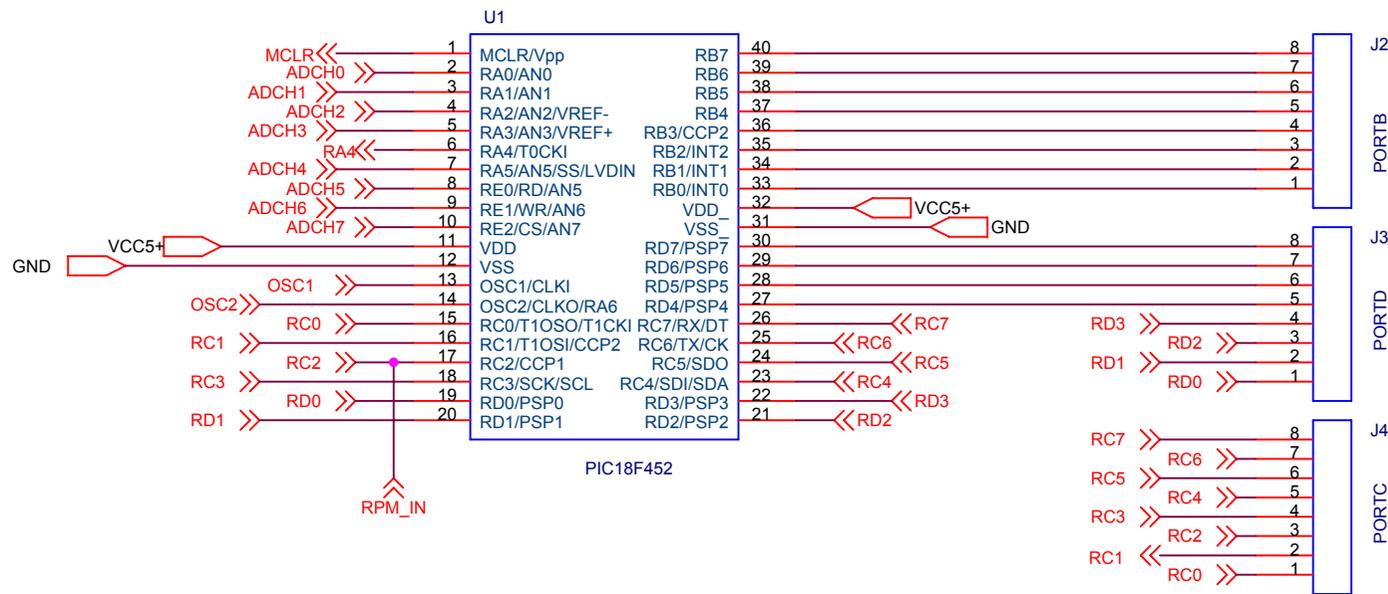
#DEFINE INJETA        PORTD,RD0    ;DEFINICAO DE PORTAS

#DEFINE LIBERADO      PORTD,RD1
```

**APÊNDICE B – ESQUEMAS
ELÉTRICOS**

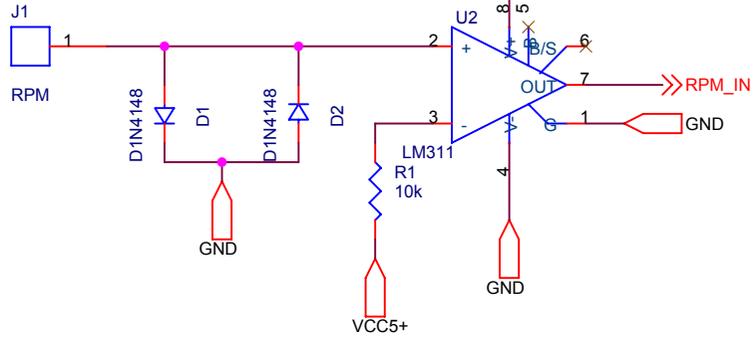
B.1 Introdução

Este apêndice expõe, detalhadamente, os esquemas dos circuitos eletrônicos desenvolvidos e utilizados para implementar o sistema de gerenciamento eletrônico de gás natural. Estes esquemáticos destinam-se a orientar a construção física do equipamento eletrônico que dá suporte ao microcontrolador usado no trabalho.

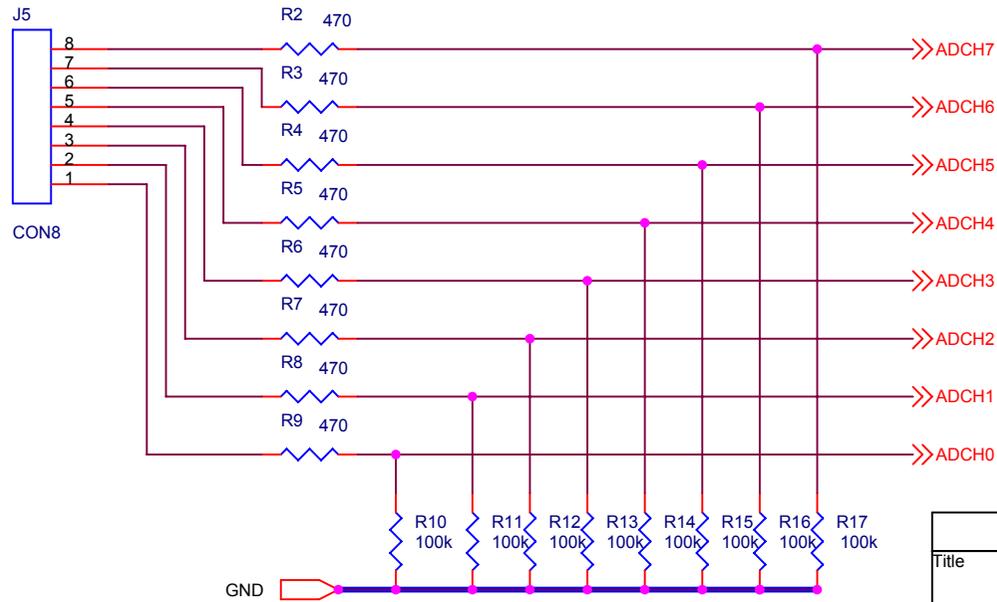
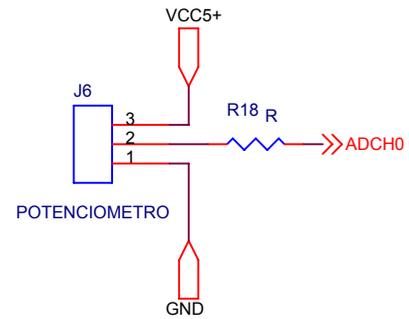


Title		
Injetor Eletronico de Gás Natural para Motor Diesel - CPU		
Size	Document Number	Rev
A	1.0	2.0
Date:	Monday, February 27, 2006	Sheet 1 of 1

ENTRADA - SENSOR DE ROTAÇÃO

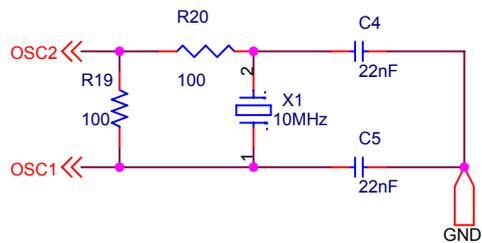
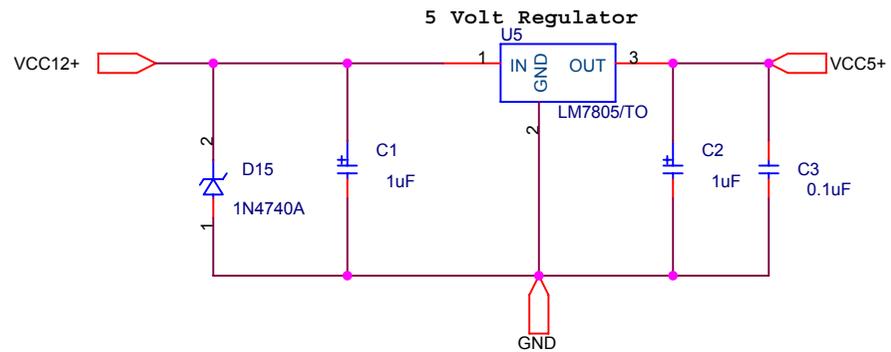
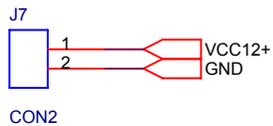


ENTRADA - ACELERADOR



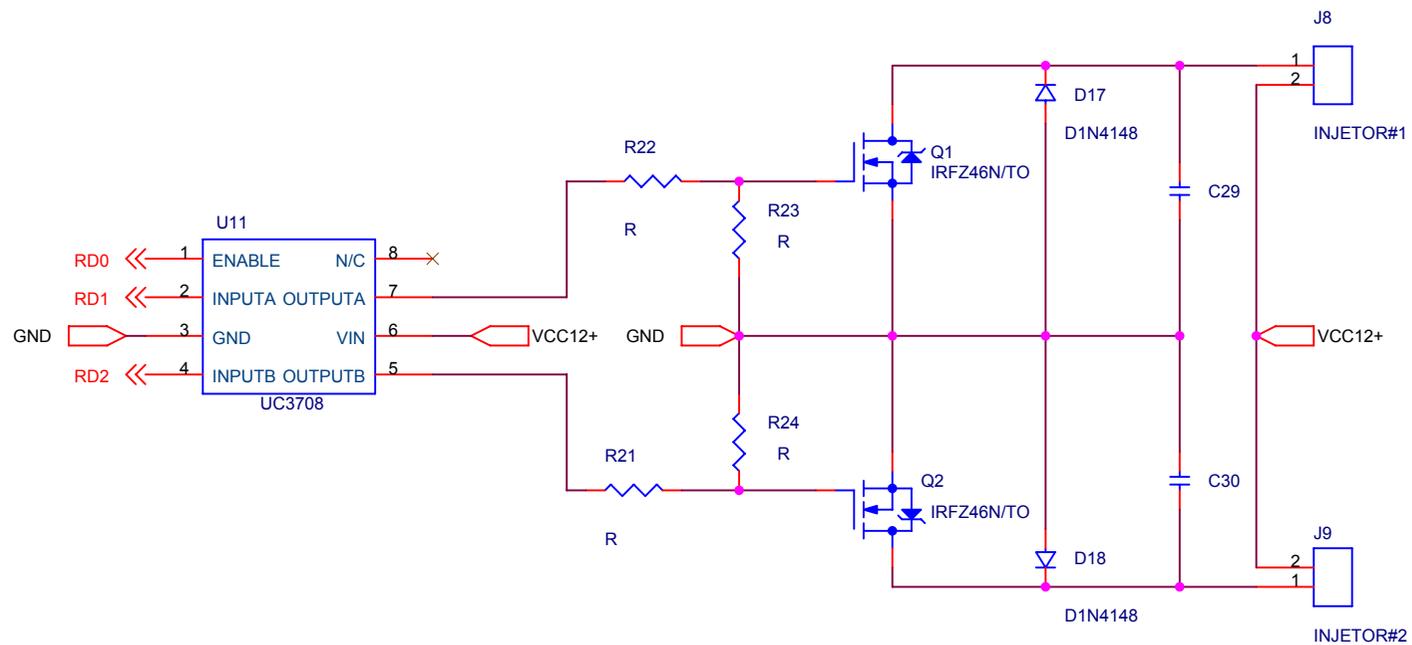
ENTRADA - CANAIS A/D DO PIC18F452

Title		
Injetor Elettronico de Gás Natural para Motor Diesel - ENTRADAS		
Size	Document Number	Rev
A	1.0	2.0
Date:	Monday, February 27, 2006	Sheet 1 of 1

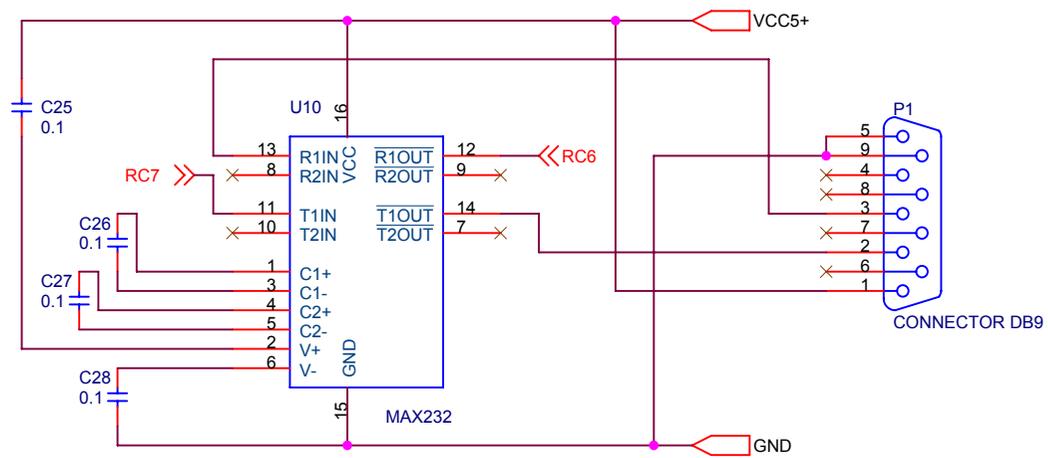


Obs.: R19 e R20 são opcionais - usados em caso de instabilidade no cristal oscilador.

Title		
Injetor Eletronico de Gás Natural para Motor Diesel - ALIMENTAÇÃO		
Size	Document Number	Rev
A	1.0	2.0
Date:	Monday, February 27, 2006	Sheet 1 of 1



Title		
Injetor Eletronico de Gás Natural para Motor Diesel - DRIVER DO INJETOR		
Size	Document Number	Rev
A	1.0	2.0
Date:	Monday, February 27, 2006	Sheet 1 of 1



Title		
Injetor Eletronic de Gás Natural para Motor Diesel - INTERFACE SERIAL		
Size	Document Number	Rev
A	1.0	2.0
Date:	Monday, February 27, 2006	Sheet 1 of 1
	2	1