

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

**CONTROLADORES LÓGICOS DIFUSOS: UMA ALTERNATIVA PARA O
CONTROLE DE PROCESSOS INDUSTRIAIS CRÍTICOS**

NELSON DE SOUZA

Florianópolis
2000

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

**CONTROLADORES LÓGICOS DIFUSOS: UMA ALTERNATIVA PARA O
CONTROLE DE PROCESSOS INDUSTRIAIS CRÍTICOS**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-graduação em
Engenharia da Produção da Universidade Federal de Santa
Catarina, para obtenção do título de Mestre em Engenharia

Área de concentração:

Inteligência Aplicada

Orientador:

Prof. Aran Bey Tcholakian Morales, Dr. Eng.

NELSON DE SOUZA

Florianópolis
2000

**CONTROLADORES LÓGICOS DIFUSOS: UMA ALTERNATIVA PARA O
CONTROLE DE PROCESSOS INDUSTRIAIS CRÍTICOS**

NELSON DE SOUZA

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia, Especialidade Engenharia da Produção e aprovada em sua forma final pelo programa de Pós-graduação.

Prof. Ricardo M. Barcia, Ph.D.
Coordenador

Banca Examinadora:

Prof. Aran B. Tcholakian Morales, Dr. Eng. – Orientador

Prof. Alejandro Martins Rodrigues, Dr. Eng. – Membro

Prof. Oscar Ciro López, Dr. Eng. – Membro

Florianópolis, março de 2000

Dedico este trabalho

aos meus pais *Amândio e Luiza*

aos meus filhos *Aline, Alice e Nelson*

a minha amiga *Daniela* e

a minha esposa e companheira *Maria Helena*

Agradecimentos

Ao professor Aran Bey Tcholakian Morales, emérito orientador, o qual com sua serenidade, presteza e conhecimento, traçou com sabedoria as diretrizes para o alcance dos objetivos.

Aos profissionais das áreas de operação e manutenção da Unidade 7 de Geração de Energia da GERASUL, que não mediram esforços em disponibilizar a documentação necessária e indispensável para o andamento deste trabalho.

Em especial, ao *especialista em operação*, Waldelir Corrêa Júnior, pelo interesse em repassar os parâmetros de comportamento do processo, de vital importância para a modelagem do sistema.

Ao Engenheiro Eder Miguel Pacheco, amigo e conselheiro, pela colaboração como o real *Engenheiro do Conhecimento*, sem o qual esta tarefa seria muito mais penosa.

Aos meus orientandos de TCC da Universidade do Sul de Santa Catarina, Humberto Rodrigues Lima, Fabíola de Bittencourt Garcia, Camilo Luis da Rosa e Paulo André Doneda Jung, colaboradores incansáveis no desenvolvimento deste trabalho.

Resumo

Em usinas termelétricas, e nas indústrias de transformação de médio e grande porte em geral, existe uma variedade de situações que afetam as ações dos operadores durante as emergências operacionais. Sendo assim, um esforço no sentido de minimizar os transtornos nestas ocasiões críticas se faz necessário, através do desenvolvimento de métodos alternativos de supervisão e controle mais eficientes.

O conhecimento dos fenômenos que determinam um sistema e seu comportamento, é de vital importância do ponto de vista de sua caracterização, pois permite o estabelecimento de analogias na manipulação adequada das variáveis para cada caso.

Trabalhos bem estabelecidos, de comprovada confiabilidade e eficácia, apontam a lógica difusa, mais especificamente os *controladores lógicos difusos*, como uma solução para implementação de modelos alternativos aos modelos convencionais, baseados em conhecimento heurístico com a modelagem de variáveis linguísticas.

Neste trabalho é proposto um sistema de controle para bombas de água de alimentação da caldeira de uma usina termelétrica com controladores difusos, como uma alternativa ao sistema de controle realizado com controladores PID.

Para o processo estudado, o sistema atual não atende as exigências de controle em situações críticas, quando é esperado que os controladores sejam suficientemente rápidos para que não haja perda de produção. Isto somente é possível, e nem sempre, com a intervenção dos operadores em ações manuais que demandam um grande esforço de raciocínio humano em manobras operacionais arriscadas.

O processo das bombas de água de alimentação foi modelado matematicamente na Toolbox Simulink e os controladores difusos na Toolbox Fuzzy do Matlab, para permitir a simulação dinâmica do processo e os testes de performance.

Pretende-se com este trabalho, demonstrar que em processos críticos onde os sistemas de controle convencionais não trabalham bem, sistemas de controle com controladores difusos podem fornecer resultados satisfatórios.

Abstract

In thermoelectrical plants, and in the industries of transformation of medium and big size in general, there is a variety of situations that affect the actions of the operators during operational emergencies. In such cases, an effort towards minimization upsetting in these critical occasions becomes necessary, through the development of more efficient alternative methods of the supervision and control.

The knowledge of the phenomenons that determine a system and its behavior is of vital importance from the point of view of its characterization, because it allows the establishment of analogies in the adequate manipulation of the variables for each case.

Well-established works, of proven reliability and effectiveness, aim the fuzzy logic, more specifically the *fuzzy logic controllers* as a solution for implementation of alternative models for the conventional models, based on heuristic knowledge with the modelling of linguistic variables.

In this work it is proposed a control system for feed water pumps of the boiler of a thermoelectrical plant with fuzzy controllers, as an alternative to the control system accomplished with PID controllers.

For the studied process, the present system doesn't meet the control demands in critical situations, when it is expected that the controllers be sufficiently fast so that there is no production loss. This is only possible, and not always, with the intervention of the operators in manual actions that require a big effort of human reasoning in risky operational maneuvers.

The process of the feed water pump was modeled mathematically in the ToolBox Simulink and the fuzzy controllers in the ToolBox Fuzzy of Matlab, to allow the dynamic simulation of the process and the performance tests.

It is intended with this work, to demonstrate that in critical processes where the conventional control systems don't work well, control systems with fuzzy controllers can provide satisfactory results.

Sumário

Capítulo 1 – Introdução

1.1 – Modelagem de Sistemas.....	1
1.2 – Justificativa	2
1.3 – Objetivos.....	4
1.3.1 – Objetivo Geral	4
1.3.2 – Objetivos Específicos.....	4
1.4 – Estrutura do Trabalho.....	5

Capítulo 2 – Controladores Lógicos Difusos: Estado da Arte

2.1 – Introdução.....	7
2.2 – Controladores PID.....	7
2.3 – Conjuntos Difusos.....	8
2.3.1 – Histórico.....	8
2.3.2 – Definição de Variáveis	10
2.3.2.1 – Variável Não Difusa.....	11
2.3.2.2 – Variável Difusa.....	12
2.3.2.3 – Operações em Conjuntos Difusos.....	14
2.3.3 – Formação de Conjuntos Difusos.....	16
2.3.4 – Hedges.....	17
2.4 – Lógica Difusa.....	19
2.4.1 – O que é Lógica Difusa ?.....	19
2.4.2 – Variáveis Linguísticas.....	20
2.4.3 – Inferência Difusa.....	22
2.4.3.1 – Multiplicação Vetor-Matriz Difusa.....	22
2.4.3.2 – Idéia Fundamental de Inferência Difusa.....	24
2.4.3.3 – Inferência Max-Min.....	25
2.5 – Sistemas Difusos	28
2.6 – Controladores Lógicos Difusos.....	29
2.6.1 – Tipos de Controladores Lógicos Difusos.....	30
2.6.2 – Estrutura de um Controlador Lógico Difuso.....	34
2.7 – Aplicações de Controladores Lógicos Difusos.....	39

Capítulo 3 – O Processo Estudado

3.1 – Introdução.....	45
3.2 – Usinas Termelétricas no Contexto de um Sistema Elétrico.....	45
3.3 – Usina Termelétrica.....	46
3.4 – Bombas de Água de Alimentação.....	49
3.5 – O Problema.....	50
3.5.1 – Curvas das Bombas de Água de Alimentação.....	53
3.5.2 – Válvula Principal de Controle.....	54
3.6 – Proposta para Resolução do Problema	55
3.6.1 – Requisitos para Implementação do Modelo.....	56
3.6.2 – Implementação do Modelo Matemático do Processo.....	57
3.6.3 – Modelo Proposto para o Controle do Processo	61
3.6.3.1 – Implementação do Controlador de Rotação	62
3.6.3.1.1 – Funções de Pertinência	63
3.6.3.1.2 – Regras do Controlador de Rotação	64
3.6.3.1.3 – Processamento Difuso	65
3.6.3.2 – Implementação do Controlador de Pressão Dif. e Curva Limite.....	67
3.6.3.2.1 – Funções de Pertinência.....	69
3.6.3.2.2 – Regras do Controlador de Pressão Dif. e Curva Limite.....	71
3.7 – Necessidades para a Implementação do Sistema	71

Capítulo 4 – Resultados Obtidos

4.1 – Introdução.....	73
4.2 – Resultados e Análises.....	73
4.2.1 – Controle de Rotação.....	73
4.2.2 – Controle de Pressão Diferencial e Curva Limite.....	78

Capítulo 5 – Conclusões e Recomendações

5.1 – Introdução.....	82
5.2 – Conclusões.....	82
5.3 – Recomendações.....	84

Referências Bibliográficas..... 85

Bibliografia..... 86

Anexo A – Um Modelo Simples para Abstração de um Modelo Complexo..... 89

Anexo B – Interface do Sistema 95

Anexo C – Principais Funções e Procedimentos de Progr. Desenvolvidos no Matlab..... 102

Anexo D – Principais Documentos Técnicos e de Operação..... 112

Lista de Figuras

Figura 2.1 – Conjuntos difusos para temperatura ambiente	16
Figura 2.2 – Conjuntos difusos de temperatura ambiente com hedge <i>muito</i>	17
Figura 2.3 – Inferência max-min	27
Figura 2.4 – Inferência Difusa max-min para entrada difusa	28
Figura 2.5 – Estrutura do controlador Mamdani genérico (Zimmermann, 1996)	35
Figura 2.6 – Variável Linguística <i>temperatura</i>	36
Figura 2.7 – Consequentes das regras no exemplo do sistema de aquecimento	38
Figura 2.8 – Defuzzificação pelo método do centro de área	38
Figura 2.9 – Defuzzificação pelo método do centro de somas	39
Figura 2.10 – Guindaste controlado por controladores difusos	40
Figura 2.11 – Modelo de carro controlado por um controlador difuso tipo Sugeno	41
Figura 3.1 – O ciclo de água de alimentação de uma usina termelétrica	47
Figura 3.2 – Bomba de água de alimentação da caldeira da unidade 7 do Complexo Termelétrico Jorge Lacerda de Capivari de Baixo	49
Figura 3.3 – Esquema da bomba de água de alimentação	50
Figura 3.4 – Curva característica das bombas de água de alimentação	53
Figura 3.5 – Válvula principal de controle	54
Figura 3.6 – Família de curvas da válvula principal de controle	55
Figura 3.7 – Termoelétrica - Primeiro nível do processo modelado no Simulink	58
Figura 3.8 – Bomba 1 - Segundo nível do modelo	59
Figura 3.9 – Bomba - Terceiro nível do modelo	60
Figura 3.10 – Função de transferência de vazão - Último nível do modelo	61
Figura 3.11 – Avaliação da taxa de variação do erro	62
Figura 3.12 – Controlador difuso de rotação	63
Figura 3.13 – Função de pertinência de E (erro) e seus qualificadores	63
Figura 3.14 – Função de pertinência de VE (variação do erro) e seus qualificadores	64
Figura 3.15 – Função de pertinência de R (Controle de rotação) e seus qualificadores.....	64
Figura 3.16 – Fuzzificação de E (erro) - Negativo (0,60), zero (0,40)	65
Figura 3.17 – Saída do controlador de rotação para um erro de 0,20	67
Figura 3.18 – Controlador Difuso de pressão diferencial e curva limite	68

Figura 3.19 – Função de pertinência de EPD e seus qualificadores	69
Figura 3.20 – Função de pertinência de VEPD e seus qualificadores	69
Figura 3.21 – Funções de pertinência de EF e EP e seus qualificadores	70
Figura 3.22 – Funções de pertinência de VEF e VEP e seus qualificadores	70
Figura 3.23 – Função de pertinência de V e seus qualificadores	70
Figura 3.24 – Esquema de Montagem para Implementação do Sistema de Controle das Bombas	72
Figura 4.1 – Sequência de testes do controlador de rotação	74
Figura 4.2 – Vazão de Água de Alimentação e Pressão Diferencial Através da Válvula de Controle numa Situação Real de Elevação e Redução Acelerada da Geração	77
Figura 4.3 – Simulação de Elevação e Redução Acelerada da Geração	77
Figura 4.4 – Sequência de testes do controlador de pressão diferencial e curva limite	78
Figura 4.5 – Registro de Ocorrência Real de Perda da Unidade por Desligamento Inesperado de Uma das Bombas de Água de Alimentação	80
Figura 4.6 – Registro de Desligamento Inesperado de Uma das Bombas de Água de Alimentação com Intervenção do Operador	81
Figura A.1 – Fluxograma do Processo de Controle de Óleo Combustível	90
Figura A.2 – Curva Característica da Bomba de Óleo Combustível	91
Figura A.3 – Curva Característica da Válvula de Controle de Óleo Combustível	92
Figura A.4 – Modelo Matemático do Processo de Óleo Combustível	94
Figura A.5 – Processo de Óleo Combustível com Malha de Medição e Controle	94
Figura B.1 – Tela principal do Matlab - Linha de comando	96
Figura B.2 – Tela de Entrada do Sistema	96
Figura B.3 – Bloco Principal	97
Figura B.4 – Painel de Controle	98
Figura B.5 – Gráfico de Curva Limite das Bombas de Água de Alimentação	98
Figura B.6 – Curva de Operação da Válvula Principal de Controle	99
Figura B.7 – Curva de Fluxo vs. Rotação das Bombas de Água de Alimentação	99
Figura B.8 – Curva de Vazão vs. Pressão das Bombas de Água de Alimentação	100
Figura B.9 – Tela de Opções do Controlador Difuso de Rotação	100
Figura B.10 – Tela de Opções do Controlador Difuso de Pressão Diferencial e Curva Limite	101

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 – Exemplos de Variáveis Linguísticas com Valores Típicos	21
Tabela 2.2 – Base de Regras	37
Tabela 2.3 – Taxa de Escorregamento de Estradas para Teste de Frenagem	43
Tabela 3.1 – Conjunto de Regras do Controlador de Rotação	65
Tabela 3.2 – Conjunto de Regras do Controlador de Pressão Diferencial e Curva Limite	71
Tabela 3.3 – Lista de Equipamentos Necessários para a Implementação do Sistema	72

Capítulo 1 Introdução

1.1 Modelagem de Sistemas

Já à algumas décadas a procura por alternativas para solucionar problemas em que o sistema é mal definido se tornou uma preocupação constante dos pesquisadores.

A teoria de controle moderna teve tremendo sucesso em áreas onde o sistema é bem definido, mas tem falhado ao defrontar-se com a praticabilidade de muitos processos industriais apesar do desenvolvimento de um corpo enorme de conhecimento matemático [TONG, 1977].

Para resolver o problema da identificação destes sistemas, as pesquisas se direcionam ao campo da *Inteligência Artificial*, objetivando procurar métodos que permitam implementar modelos alternativos aos métodos matemáticos e resolver algumas das dificuldades que o construtor de modelos enfrenta, como a representação do conhecimento intuitivo e subjetivo. A meta comum desses métodos é resolver problemas que resistam aos métodos convencionais de análise e identificação de sistemas.

Assim, algumas das ferramentas utilizadas tentam emular os especialistas humanos na execução de uma tarefa específica através dos *Sistemas Especialistas*. Outras ferramentas preocupam-se com o tratamento das incertezas e imprecisões inerentes ao raciocínio humano e dos fenômenos observados como os *Sistemas Difusos*. Enquanto outras, ainda, tentam reproduzir algumas virtudes dos seres vivos, como a sua capacidade de aprender pela experiência, caso das *Redes Neurais* ou de adaptar-se às mudanças ambientais como os *Algoritmos Evolutivos*.

Se o modelo em consideração é um modelo formal, isto é, se não se pretende modelar a realidade adequadamente, então as suposições sobre o modelo são de certo modo arbitrárias, ou seja, o construtor do modelo pode decidir as características do modelo livremente. Se, porém, o modelo ou teoria que afirma realidade, quer dizer, se conclusões tiradas destes modelos têm uma orientação para a realidade e é suposto que modela a realidade adequadamente, então a modelagem tem que ser adaptada para modelar as características da situação adequadamente [ZIMMERMANN, 1996].

Os paradigmas e ferramentas utilizadas na modelagem de um sistema são de fundamental importância para que o modelo obtido reflita o fenômeno observado. Também

é fundamental o estudo adequado para a compreensão do processo e profissionais confiáveis para que o sistema possa refletir a realidade e ter bons resultados.

1.2 Justificativa

A explosão demográfica, aliada ao acesso à informação em todos os níveis, e o avanço tecnológico das últimas décadas em todas as áreas de atividade humana, fatores determinantes para uma crescente demanda de consumo, impulsionaram o surgimento de grandes parques industriais e, conseqüentemente, de usinas de geração de energia cada vez mais potentes. Neste contexto, projetos sofisticados de máquinas mais robustas e de maior capacidade de produção, inseridas em processos contínuos de alta velocidade, exigiram sistemas de controle mais sofisticados, rápidos e confiáveis.

Na grande maioria dos casos, os modelos matemáticos tradicionais de controle (respaldados pelo clássico controlador PID), proporcionam as respostas desejadas e garantem uma performance de excelência esperada. Porém, adaptações rápidas em processos não são o forte destes controladores nem, tampouco, possuem a capacidade de prever o resultado de processos complexos e mal definidos. Nestes casos, há a exigência de um sistema de controle mais robusto, ou seja, um sistema que tome decisões aproximadas ao do raciocínio do operador humano.

O processo escolhido para este trabalho de pesquisa, o das *bombas de água de alimentação da caldeira* da unidade 7 do complexo termelétrico Jorge Lacerda de Capivari de Baixo, está incluído nesta classe de processos complexos, determinado pelas seguintes características principais:

- porte dos equipamentos principais;
- exigência de trabalho dentro de limites especificados por curvas características;
- alta velocidade do processo;
- amplitude das variáveis envolvidas;
- necessidade de respostas rápidas diante de perturbações bruscas;
- tomada de decisão sobre qual variável a ser controlada nos momentos críticos.

A motivação maior por esta linha de pesquisa é justificada por longos anos de experiência na área de automação de processos industriais e pela confrontação com as dificuldades pessoais em tarefas de otimização de malhas de controle, que nem sempre

surtiam ou forneciam resultados satisfatórios, demandando em desconforto aos operadores nas ocasiões em que mais necessitavam de um bom desempenho do sistema de controle, ou seja, na instabilidade e na emergência operacionais.

Nas entrevistas com engenheiros e técnicos de manutenção e operação da Gerasul, discutiu-se a possibilidade de busca por uma solução para o controle das bombas de água de alimentação da unidade de geração 7 que, mesmo após várias modificações e cansativas tentativas de otimização do sistema, teimava em ser o grande problema para as equipes de operação e manutenção.

Este era um fato: ali existia um problema sem solução pelos métodos convencionais que merecia a tentativa de solução por um método alternativo.

Em condições adversas os operadores são obrigados a passar o controle para manual, devido a ineficiência dos controladores, evitando desligar a máquina sob certas condições, ditadas pela experiência e muitas vezes pela intuição de que os limites ainda são suportados, mantendo o processo produtivo e, conseqüentemente, reduzindo os prejuízos.

Optou-se, então, por um modelo de sistema envolvendo controladores lógicos difusos, que ao contrário da lógica usada nos controladores PID que geram respostas absolutas, a lógica difusa produz respostas relativas do tipo, *próximo do limite, condição normal, pressão alta, fluxo baixo*, etc, permitindo decisões com valores estimados, bem próximos das decisões tomadas pelos operadores. Com este modelo é esperado que o sistema alternativo mantenha o processo na maioria das condições adversas sem a intervenção dos operadores.

Neste trabalho serão mostradas implementações de controladores lógicos difusos incluídos em malhas fechadas de controle. Estes controladores têm a função de monitorar continuamente algumas variáveis que afetam o funcionamento de processos, modelados matematicamente em uma ferramenta apropriada, que necessitam que alguns parâmetros vitais permaneçam dentro de determinados limites, ou para evitar avarias mecânicas nos equipamentos principais, ou para evitar perdas expressivas na produção, mantendo todo o processo produtivo em perfeito funcionamento.

Nestes controladores as relações entre as entradas e as saídas são modeladas com os elementos da teoria dos conjuntos difusos e da modelagem de variáveis linguísticas que, devidamente manipuladas por regras de controle, visam solucionar os problemas de processos complexos.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Geral

À partir de um processo real, desenvolver em computador um modelo matemático do processo em questão e testar sua operacionalidade com um sistema de controle alternativo determinado por comandos de controladores lógicos difusos.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Construir modelos matemáticos de processos contínuos complexos e de alta velocidade, em computador, buscando a maior aproximação possível da realidade para simulação em tempo real.
- Conceber sistemas de controle alternativos, com controladores lógicos difusos, em malha fechada para estes processos e submetê-los à monitoração e comandos deste sistema.
- Manter a estabilidade do processo em condições normais de operação com a qualidade de controle desejada nestas situações.
- Garantir a manutenção dos parâmetros operacionais de curvas características dentro dos limites estipulados nas especificações do fabricante, diante de manobras operacionais críticas ou perturbações bruscas, sem perda expressiva de produção.
- Fornecer aos operadores informações objetivas, através de gráficos das curvas características dos equipamentos, de forma a permitir uma visão clara e confiável das condições operacionais em qualquer situação.

1.4 Estrutura do Trabalho

Este trabalho está dividido em cinco capítulos e quatro anexos com os seguintes conteúdos:

- *Capítulo 1:* Introdução com breve abordagem do problema e das ferramentas utilizadas, o objetivo principal e os específicos a serem alcançados e a justificativa sobre a importância do problema pesquisado.
- *Capítulo 2:* Neste capítulo são abordados os conceitos, definições, axiomas e operações da teoria dos conjuntos difusos, as metodologias para o projeto e concepção de controladores lógicos difusos, suas aplicações nas mais diversas áreas de atividade humana e um breve relato sobre os controladores PID.
- *Capítulo 3:* Reservado à descrição do contexto ao qual está inserido o problema com uma visão objetiva sobre um sistema interligado de energia e a importância de uma usina termelétrica para o sistema interligado, a descrição do sistema de controle atual das bombas de água de alimentação da usina em questão e as características dos principais equipamentos envolvidos. Segue o capítulo com a modelagem matemática do processo, indispensável para a simulação, e a concepção dos controladores lógicos difusos de rotação e de pressão diferencial e curva limite. Ao final são apresentadas as necessidades para a implantação do sistema.
- *Capítulo 4:* Descrição dos testes realizados numa simulação em condições normais de operação e outra simulação com manobras bruscas e imposições de instabilidade operacional. São realizadas análises de comportamento do processo e comprovação dos resultados obtidos com relação ao sistema de controle e à performance dos controladores difusos, frente a alguns eventos reais.
- *Capítulo 5:* Apresenta a conclusão do trabalho e os objetivos alcançados frente a solução proposta e sugestões para trabalhos futuros no sentido de viabilizar a implantação em chão de fábrica.

- *Anexo A*: Este anexo detalha os passos da modelagem matemática de um processo, de relativa simplicidade, no sentido de abstrair a modelagem de um sistema complexo para simulação no Matlab.
- *Anexo B*: No anexo B é mostrada a interface do sistema, com uma descrição objetiva das telas, servindo de guia para a correta operação e simulação.
- *Anexo C*: Listagem das principais funções e procedimentos de programação desenvolvidos no Matlab.
- *Anexo D*: Este anexo é composto dos principais documentos, juntados ao longo deste trabalho, dos quais foram extraídos os dados que formaram a base da modelagem do processo estudado.

Capítulo 2 Controladores Lógicos Difusos: Estado da Arte

2.1 Introdução

Este capítulo descreve a importância da teoria dos conjuntos difusos e da lógica difusa, na modelagem de sistemas reais baseadas em variáveis linguísticas e sua ampla aplicação nas mais variadas áreas da atividade industrial.

Inicialmente é destacada, resumidamente, a técnica mais tradicional de controle de processos industriais que é o controlador PID.

A seguir são abordados aspectos teóricos (axiomas, definições e operadores) de conjuntos difusos, seguida por uma abordagem da lógica difusa no que tange a definição de variáveis linguísticas em proposições representativas de aproximação à fenômenos complexos e mal definidos.

Após, são tratados os controladores lógicos difusos (CLD) e as técnicas utilizadas para a concepção de CLD's. Finalmente, exemplos de aplicações de CLD's, nas mais variadas áreas, servem para dar a noção do avanço desta tecnologia desde o seu surgimento.

2.2 Controladores PID

O controle de planta industrial envolve, frequentemente, a escolha de variáveis de projeto que asseguram o comportamento transiente desejado do sistema. Neste contexto é de interesse saber que desvio máximo de controle pode ser esperado com um distúrbio e como é esperado que o controle do processo se comporta no tempo. A saída desejada é definida, frequentemente, como a melhor que pode ser obtida, onde a palavra *melhor* pode ter várias conotações que denotam mínimo *overshoot*, tempo mínimo de ajuste e tendência mínima para oscilações persistentes (KLEFENS, 1986).

O controlador PID (Proporcional, Integral e Derivativo) é, certamente, a estratégia de controle mais popular e com maior número de implementações industriais. Seu desenvolvimento e ascensão ocorreram entre as décadas de 1930 e 1940. Naquela época, as aplicações computacionais estavam em sua “infância” e, portanto, estratégias passíveis de serem implementadas em *hardware* eram a única opção. Das muitas qualidades do

controlador PID esta, sem dúvida, foi a decisiva para sua grande aceitação pela comunidade científica e industrial [MAZZUCCO, 1997].

Atualmente, a alta complexidade de muitos processos inviabiliza o uso do controlador PID e, portanto, outras técnicas devem ser utilizadas. As opções para o controle destes processos são diversas e por não fazerem parte do escopo deste trabalho não serão comentadas. A menção ao controlador PID é justificada pela constante necessidade de se comparar qualquer outra estratégia proposta ao PID.

Porém, não deve ser pretensão constante, a substituição destes controladores em áreas onde ele trabalha bem, mas sugerir métodos alternativos para processos onde os métodos convencionais falham [HUDDLESTON & FLOWERS, 1998].

2.3 Conjuntos Difusos

2.3.1 Histórico

Neste século muitas mudanças de paradigmas aconteceram na ciência e na matemática, e uma delas diz respeito ao conceito de incerteza. A ciência, que na visão tradicional considerava a incerteza como uma teoria indesejável, gradualmente foi passando por transições. A visão moderna da ciência, não só desconsidera a teoria da incerteza como uma praga, mas a considera essencial e de grande utilidade.

A transição iniciou-se no final do século dezenove quando a teoria da incerteza foi usada, na física, em processos à nível molecular, apesar de que os mecanismos Newtonianos precisos serviam ao estudo destes processos. Este fato motivou o desenvolvimento de métodos estatísticos, não só aplicável ao estudo de processos moleculares, mas também em outras áreas como, por exemplo, projeto de grandes centrais telefônicas.

Os cálculos que eram executados pelos mecanismos Newtonianos, sem o envolvimento de nenhuma incerteza, são substituídos por mecanismos estatísticos com o propósito de tratar um certo tipo de incerteza. Enquanto métodos analíticos se aplicam em processos que envolvem poucas variáveis que são relacionadas de um modo previsível, os métodos estatísticos requerem um número muito grande de variáveis e um grau muito alto

de incerteza, cuja demanda computacional esbarravam na capacidade dos computadores existentes. Em um famoso artigo publicado em 1948, Warren Weaver se refere a eles como problemas de simplicidade organizada e complexidade desorganizada e que a maioria dos problemas está em algum lugar entre dois extremos: eles envolvem sistemas não-lineares com um número grande de componentes e rica interação entre eles, que normalmente são não-determinísticas, não como resultado de incerteza mas que poderia render médias estatísticas significantes. Weaver os chama de problemas de complexidade organizada típicos da vida como ciências cognitivas, sociais e ambientais como também nos campos da tecnologia moderna e na medicina.

Com o avanço da tecnologia do computador depois da Segunda guerra mundial e sua rápida ascensão na segunda metade deste século, tornou possível lidar com problemas complexos que se assemelhavam à noção de complexidade organizada com a convicção dos cientistas de que o nível de complexidade que poderia ser tratada dependia, tão somente, da capacidade computacional à disposição. Mas, no início dos anos sessenta esta convicção foi substituída por uma perspectiva mais realista quando, baseado na teoria de *quantum*, Hans Bremermann [1962], fez entender que existiam limites. O limite de Bremermann era expressado pela seguinte proposição: “Nenhum sistema de processamento de dados, artificial ou não, pode processar mais que 2×10^{47} bits por segundo por grama de sua massa.” Ao invés de desencorajar, o que pareceu de princípio, este fato fez emergir, ainda nos anos sessenta, o estudo extensivo destes problemas dentro de uma área chamada de teoria da complexidade computacional como um ramo da teoria geral de algoritmos.

Apesar dos limites computacionais insuperáveis, sempre existiu o desafio de lidar com problemas complexos com a construção de modelos para entender os fenômenos, conectado com a relação entre as três características chaves de todo modelo de sistema: complexidade, credibilidade e incerteza. Esta relação ainda não era de todo entendida. Sabia-se, apenas, que a incerteza era o pivô de qualquer esforço para maximizar a utilidade destes modelos.

O reconhecimento deste papel importante da incerteza por alguns pesquisadores, ficaram explícitos na literatura, em meados dos anos sessenta, onde começou a segunda fase da transição da visão tradicional para a visão moderna de incerteza. É uma fase caracterizada pelo aparecimento de várias teorias novas de incerteza, distintas da teoria da probabilidade.

E nesta fase importante de evolução, Lotfi A. Zadeh [1965] publicou um artigo com um moderno conceito de incerteza - Conjuntos Difusos (Fuzzy Sets) – são conjuntos com

limites que não são precisos, ou seja, a qualificação dos elementos em um conjunto difuso não é uma questão de afirmação ou negação, mas sim uma questão de grau.

Em seu artigo Zadeh não só desafiou a teoria da probabilidade mas também as fundamentações nas quais a teoria da probabilidade é baseada: a lógica Aristoteliana dos dois valores onde um evento, ou é verdadeiro ou é falso.

Zadeh afirma que “quando A é um conjunto difuso e x é elemento pertinente, a proposição x é associada com um valor de grau de pertinência em A ” e não é, necessariamente, verdadeiro ou falso, conforme a lógica dos dois valores, mas pode ser até um certo ponto verdade, o grau para o qual x é de fato um elemento de A . É muito comum, porém não necessário, expressar graus para os elementos dos conjuntos difusos como também graus de verdade para as proposições associadas por números num intervalo fechado $[0, 1]$. Os valores extremos neste intervalo, 0 e 1, representam, respectivamente, a negação e a afirmação total da associação em um determinado conjunto difuso, como também a falsidade e a verdade da proposição associada. A capacidade dos conjuntos difusos para expressar transições graduais de associação de elementos, e vice versa, é de grande utilidade. Não só proporciona uma representação poderosa de medidas de incerteza, mas também como uma representação significativa de conceitos vagos expressada em linguagem natural.

As pesquisas com conjuntos difusos têm crescido continuamente desde os meados dos anos sessenta. O volume de conceitos pertencentes à teoria é, atualmente, bastante expressiva e os resultados obtidos em pesquisas numa larga variedade de aplicações é impressionante e tende a se alargar cada vez mais.

2.3.2 Definição de Variáveis

Como palavras, em geral, são menos precisas que números, o conceito de variável linguística se propõe a dar os meios para a caracterização aproximada de fenômenos complexos ou mal definidos para serem amenos na descrição em termos quantitativos convencionais. Mais especificamente, os conjuntos difusos que representam a restrição associada aos valores de uma variável linguística, podem ser vistos como resumo de várias subdivisões de classe de elementos em um universo de discurso. Isto, claro, é análogo ao papel representado por palavras e orações em um idioma natural. [ZADEH, 1975].

São denominadas variáveis linguísticas, aquelas cujos valores são palavras ou orações usadas no cotidiano em um idioma natural para quantificar ou qualificar eventos ou situações do ambiente. A motivação para o uso de variáveis linguísticas, em geral, é determinada pela caracterização menos rígida e específica que a caracterização numérica.

2.3.2.1 Variável Não Difusa

Embora o conceito de uma variável não difusa seja elementar por natureza, é de modo algum trivial. Para nossos propósitos, a formalização do conceito de uma variável não difusa, provê uma base conveniente para novas extensões [ZADEH, 1975].

Definição 1: Uma variável é caracterizada por uma tripla $(X, U, R(X; u))$, em que X é o nome da variável; U é o universo de discurso (conjunto finito ou infinito); u é o nome genérico para os elementos de U ; e $R(X; u)$ é um subconjunto de U o qual representa a restrição dos valores de u impostos por X . Por conveniência, geralmente abrevia-se $R(X; u)$ para $R(X)$ ou $R(u)$ ou $R(x)$, quando x denota o nome genérico para os valores de X , e quer se referir à $R(X)$ simplesmente como a restrição sobre u ou a restrição imposta por X .

Além de que, a variável é associada com a equação

$$x = u : R(X)$$

ou equivalentemente

$$x = u, \quad u \in R(X)$$

o qual representa a designação do valor u para x sujeito à restrição $R(X)$. Deste modo, a equação é satisfeita se, e somente se, $u \in R(X)$.

Exemplo 1: Suponha-se a medição de pressão na descarga de uma bomba onde a pressão deva ser controlada em torno de 5 Kgf/cm² e que X_1 denote *alarme de pressão alta*, X_2 denote o *bloqueio da bomba por pressão alta*, e $U_1 = U_2 = \{1, 2, 3, \dots, 10\}$. Suponha-se também que o alarme deva ocorrer com 6Kgf/cm² e o bloqueio da bomba deva ocorrer

com 1Kgf/cm² acima da situação de alarme, ou seja, $x_2 \geq x_1 + 1$ (x_1 e x_2 são os nomes genéricos para os valores de X_1 e X_2). Então $R(X_1, X_2)$ pode ser definido por

$$\begin{aligned} \mu_R(u_1, u_2) &= 1 && \text{para } 6 \leq u_1 \leq 10, \quad u_2 \geq u_1 + 1 \\ \mu_R(u_1, u_2) &= 0 && \text{para outros casos} \end{aligned}$$

2.3.2.2 Variável Difusa

Uma variável difusa X difere de uma variável não difusa na sua associação com uma restrição $R(X)$, a qual é um subconjunto difuso do universo de discurso [ZADEH, 1975].

Definição 2: Um subconjunto difuso A no universo de discurso U é caracterizado por uma função de pertinência $\mu_A : U \rightarrow [0, 1]$ a qual é associada com cada elemento u de U , um número $\mu_A(u)$ no intervalo $[0, 1]$, com $\mu_A(u)$ representando o grau de pertinência de u em A .

Exemplo 2: Considerando o problema do exemplo 1, no qual a pressão de descarga da bomba deve ser controlada em torno de 5 kgf/cm² e que a pressão é considerada *normal* no intervalo de 4,5 a 5,5 Kgf/cm², pode ser representado como

$$A = 0.1 / 4.5 + 0.3 / 4.6 + 0.5 / 4.7 + 0.7 / 4.8 + 0.9 / 4.9 + 1 / 5.0 + 0.9 / 5.1 + 0.7 / 5.2 + 0.5 / 5.3 + 0.3 / 5.4 + 0.1 / 5.5.$$

Pode-se observar que em 5 kgf/cm² o grau de pertinência é 1, significando uma pertinência total ao conjunto A . Os valores abaixo de 4.5 kgf/cm² e acima de 5.5 kgf/cm² não pertencem ao conjunto A e o grau de pertinência é 0, sendo que para os demais valores existe uma pertinência parcial.

Exemplo 3: Permitindo que o universo de discurso seja o intervalo $[0, 1]$, com u interpretando *controle de pressão*, considerados nos exemplos 1 e 2. Um subconjunto difuso de U chamado *pressão alta* pode ser definido por uma função de pertinência como

$$\begin{aligned} \mu_A(u) &= 0 && \text{para } 0 \leq u \leq 5, \\ \mu_A(u) &= \left[\frac{u-5}{5} \right] && \text{para } 5 \leq u \leq 10. \end{aligned}$$

Definição 3: É chamado de *suporte* de A o conjunto de pontos em U em que $\mu_A(u)$ é positivo, ou seja, $\mu_A(u) > 0$.

Exemplo 4: Voltando aos exemplos 2 e 3, pode ser observado que:

a) o conjunto suporte de A , no exemplo 2, é o conjunto

$$\{4.5, 4.6, 4.7, 4.8, 4.9, 5.0, 5.1, 5.2, 5.3, 5.4, 5.5\}$$

b) o conjunto suporte, no exemplo 3, é o intervalo $[5, 10]$

Definição 4: É chamada *altura* de A ao supremo de $\mu_A(u)$ sobre U .

Exemplo 5: No exemplo 2, a altura de A é 1, porque o supremo é igual a 1 quando u é igual a 5.0. No exemplo 3, a altura de A também é 1, porque o supremo é igual a 1 quando u é igual a 5.0 e pode-se afirmar que os dois conjuntos estão normalizados.

Definição 5: O *ponto de crossover* de A é o ponto em U cujo grau de pertinência em A é 0.5.

Exemplo 6: No exemplo 2 é possível observar dois pontos de crossover (em $u = 4.7$ e em $u = 5.3$), enquanto no exemplo 3 o ponto de crossover é 5.5.

A fim de simplificar a representação de um conjunto difuso no universo de discurso U , quando U é finito $\{u_1, u_2 \dots u_n\}$, um conjunto difuso A é expresso como

$$A = \mu_1/u_1 + \mu_2/u_2 + \dots + \mu_n/u_n$$

ou

$$A = \sum_{i=1}^n \mu_i / u_i$$

onde $+$ denota *união* em lugar de *soma aritmética*.

Quando U é um conjunto infinito, um conjunto difuso sobre U é expresso como

$$A = \int_U \mu_A(u) / u$$

onde $\mu_A(u)$ é o grau de pertinência de u em A e a *integral* denota a *união* de $\mu_A(u) / u$, $u \in U$.

2.3.2.3 Operações em Conjuntos Difusos

As operações básicas que podem ser executadas em conjuntos difusos são as seguintes:

1 – Complemento

O complemento de A é denotado por \bar{A} e é definido como

$$\bar{A} = \int_U [1 - \mu_A(u)] / u.$$

2 – União

A união de dois conjuntos difusos A e B é denotada por $A \cup B$ e é definida como

$$A \cup B = \int_U [\mu_A(u) \vee \mu_B(u)] / u,$$

onde \vee é o operador de máximo.

3 – Interseção

A interseção de dois conjuntos difusos é denotada por $A \cap B$ e é definida como

$$A \cap B = \int_U [\mu_A(u) \wedge \mu_B(u)] / u,$$

onde \wedge é o operador de mínimo.

4 – Produto

O produto de dois conjuntos difusos é denotado por $A \cdot B$ e é definido como

$$A \cdot B = \int_U [\mu_A(u) \cdot \mu_B(u)] / u,$$

onde \cdot é o produto de números reais.

5 – Potência

A potência de um conjunto difuso A é denotada por A^α e é definida como

$$A^\alpha = \int_U [\mu_A(u)]^\alpha / u,$$

onde α é um número positivo.

6 – Produto Cartesiano

Se A_1, \dots, A_n são conjuntos difusos de U_1, \dots, U_n , respectivamente, o produto cartesiano de A_1, \dots, A_n é denotado por $U_1 \times \dots \times U_n$ e são definidos como conjuntos difusos de $U_1 \times \dots \times U_n$ cuja função de pertinência é expressada por

$$\mu_{A_1 \times \dots \times A_n}(u_1, \dots, u_n) = \mu_{A_1}(u_1) \wedge \dots \wedge \mu_{A_n}(u_n)$$

Exemplo 7: Dada uma faixa de temperatura num intervalo compreendido entre 10 e 100°C, e definindo um conjunto difuso para temperatura *altas* e outro para temperaturas *médias* dentro desta faixa, tais como:

$$\textit{Altas} = \{0.0/10, 0.07/15, 0.3/25, 0.45/40, 0.75/60, 0.85/80, 1.0/100\}$$

$$\textit{Médias} = \{0.1/10, 0.35/15, 0.6/25, 1.0/40, 0.5/60, 0.2/80, 0.0/100\}$$

estas operações poderiam ser usadas para criar outros conjuntos, como a seguir:

Complemento: $\overline{\textit{Altas}} = \{1.0/10, 0.93/15, 0.7/25, 0.55/40, 0.25/60, 0.15/80, 0.0/100\}$

União: $\textit{Altas} \cup \textit{Médias} = \{0.1/10, 0.35/15, 0.6/25, 1.0/40, 0.75/60, 0.85/80, 1.0/100\}$

Interseção: $\textit{Altas} \cap \textit{Médias} = \{0.0/10, 0.07/15, 0.3/25, 0.45/40, 0.5/60, 0.2/80, 0.0/100\}$

Produto: $\textit{Altas} \cdot \overline{\textit{Altas}} = \{0.0/10, 0.065/15, 0.21/25, 0.25/40, 0.19/60, 0.13/80, 0.0/100\}$

Potência: $(\textit{Médias})^{0.7} = \{0.199/10, 0.479/15, 0.699/25, 1.0/40, 0.615/60, 0.324/80, 0.0/100\}$

Produto cartesiano: Dados $U_1 = U_2 = \{3, 7, 9\}$, e os conjuntos difusos

$$A_1 = \{0.4/3, 1.0/7, 0.7/9\}, \quad A_2 = \{1.0/3, 0.7/7\} \text{ temos que:}$$

$$A_1 \times A_2 = 0.4/(3, 3) + 1.0/(7, 3) + 0.7/(9, 3) + 0.4(3, 7) + 0.7/(7, 7) + 0.5/(9, 7)$$

Aqui, foram vistos os conceitos e operações básicas da teoria dos conjuntos difusos. Em [ZADEH, 1975], [DUBOIS & PRADE, 1986] e [ZIMMERMANN, 1996], um estudo mais completo pode ser encontrado.

2.3.3 Formação de Conjuntos Difusos

Para representar um conjunto difuso é necessário definir suas funções de pertinência. No item anterior, dentro de uma faixa de temperatura entre 10 e 100°C, foi definido um conjunto difuso para representar *temperaturas altas*. Mas a questão se resume em quanto é alta uma determinada temperatura para diferentes indivíduos e para diferentes fins. Depois de saber para qual fim um range de temperaturas é adequado, é possível calcular a média simples para produzir um conjunto difuso de *temperaturas altas*. Pode-se, então, usar uma função para designar uma convicção (ou grau de pertinência) de que um determinado valor de temperatura pertence ao conjunto difuso de *temperaturas altas*.

Trabalhar sem funções de pertinência pode ser comparado com lidar com a teoria da probabilidade em cálculos sem funções de densidade e ninguém usando este teorema pode arbitrariamente escolher as funções de densidade. Nestas situações as provas estatísticas são sem sentido [DOMBI, 1990].

Considere-se, então, o universo de discurso *temperatura ambiente*, e a definição de um conjunto difuso rotulado *quente* no universo considerado. Pode-se questionar, também, o quanto é quente para alguns ou não é para outros. Para resolver esta indefinição outras descrições para temperatura ambiente como *confortável* ou *fria* podem ser utilizadas. Desta maneira obtém-se outros conjuntos difusos que refletem as várias opiniões para cada uma destas classificações. Na Figura 2.1 são mostrados conjuntos difusos em forma linear com as diferentes categorias de temperatura ambiente. Quando são definidos múltiplos conjuntos difusos no mesmo universo de discurso, a literatura se refere frequentemente a eles como subconjuntos difusos. Neste trabalho serão referidos como conjuntos difusos.

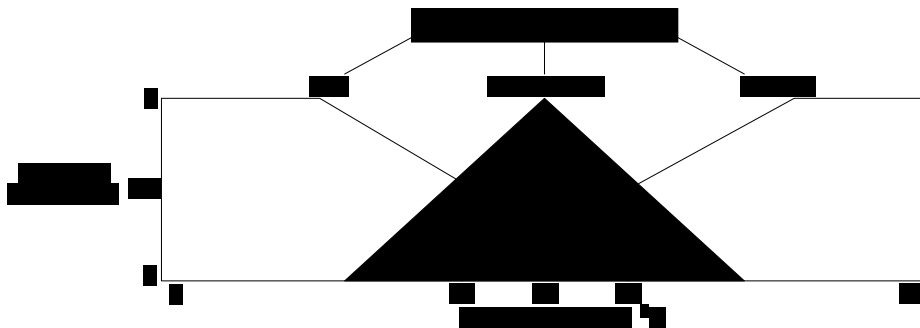


Figura 2.1 Conjuntos difusos para temperatura ambiente

Formando conjuntos difusos para vários termos vagos, pode-se designar um valor de pertinência de um determinado objeto a cada conjunto. Voltando à Figura 2.1, uma

temperatura de 25°C pertence ao conjunto de temperatura *confortável* com um valor de pertinência 1, e ao mesmo tempo pertence ao conjunto de temperatura *fria* e *quente* com um valor de 0.25. Este é um resultado interessante pois um único objeto pode pertencer parcialmente à múltiplos conjuntos.

Como já foi visto, na teoria clássica dos conjuntos, um elemento pertence ou não a um conjunto. Na teoria dos conjuntos difusos existe um grau de pertinência de cada elemento a um determinado conjunto. Este valor define o quanto algo é verdadeiro ou falso em relação a um conjunto.

Um conjunto difuso é caracterizado por uma função de pertinência que mapeia os elementos no intervalo $[0, 1]$ com graus de pertinência (ou de possibilidade) de que estes elementos pertençam a este conjunto.

2.3.4 Hedges

Em conversações normais, humanos podem adicionar incerteza à uma determinada declaração usando advérbios como *muito*, *ligeiramente* ou *um pouco*. Um advérbio é uma palavra que modifica um verbo, um adjetivo, outro advérbio, ou uma sentença inteira [DURKIN, 1994].

Na frase *a temperatura é muito quente* um advérbio está modificando um adjetivo. Neste caso, poderia ser necessário outro conjunto difuso rotulado *muito quente* para representar este outro termo vago. Porém, as *hedges* são técnicas disponíveis para tratar estes impactos das variáveis linguísticas.

Uma hedge modifica matematicamente um conjunto difuso existente para considerar algumas adições adverbiais ou outros impactos em sentenças. Por exemplo, a Figura 2.2 mostra os três conjuntos difusos de temperatura, tratados anteriormente, junto com os conjuntos ajustados pela introdução do termo *muito*.

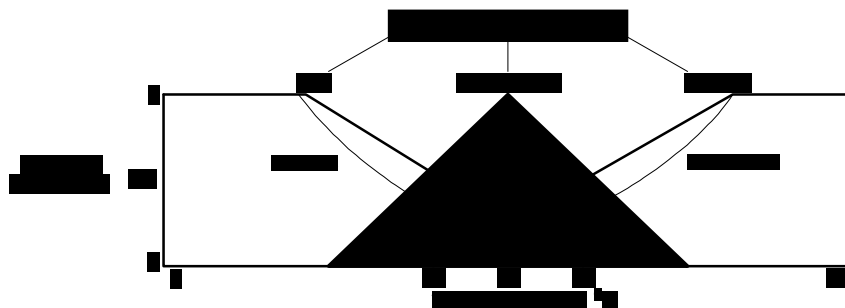


Figura 2.2 Conjuntos difusos de temperatura ambiente com hedge *muito*

Para ilustrar o impacto de um conjunto difuso modificado por um operação hedge, considere-se uma temperatura de 30°C. De acordo com Figura 2.2 esta é uma temperatura quente com grau 0.6. Porém, conforme mostrado na mesma Figura 2.2, a mesma temperatura é considerada muito quente com um grau 0.4 o que é um resultado razoável.

Algumas hedges mais comumente usadas na prática podem ser vistas a seguir.

Concentração

A operação de concentração tem o efeito de produzir uma pequena redução quando o grau de pertinência desses elementos é baixo e uma grande redução quando o grau de pertinência é alto. Esta operação é determinada como

$$\mu_{COM(A)}(u) = (\mu_A(u))^2$$

Dado um conjunto difuso de *temperaturas altas*, pode-se usar esta operação para criar o conjunto de *temperaturas muito altas*.

Dilatação

A operação de dilatação tem o efeito de produzir uma dilatação grande quando o grau de pertinência desses elementos é baixa e uma baixa dilatação quando o grau de pertinência é alto. Esta operação é determinada como

$$\mu_{DIL(A)}(u) = (\mu_A(u))^{0.5}$$

Dado um conjunto difuso de *temperaturas médias*, pode-se usar esta operação para criar o conjunto de *temperaturas mais ou menos médias*.

Intensificação

A operação de intensificação tem o efeito aumentar o grau de pertinência quando o valor é maior que 0.5 e diminuir quando esse valor é menor que 0.5. Esta operação é determinada como

$$\begin{aligned} \mu_{INT(A)}(u) &= 2(\mu_A(u))^2 && \text{para } 0 \leq \mu_A(u) \leq 0.5 \\ \mu_{INT(A)}(u) &= 1 - 2(1 - \mu_A(u))^2 && \text{para } 0.5 < \mu_A(u) \leq 1 \end{aligned}$$

Dado um conjunto difuso de *temperaturas médias*, pode-se usar esta operação para criar o conjunto de *temperaturas realmente médias*.

Potência

A operação de potência é uma extensão da operação de concentração.

$$\mu_{POT(A)}(u) = (\mu_A(u))^n$$

Dado um conjunto difuso de *temperaturas altas*, pode-se usar esta operação com $n = 3$ para criar o conjunto de *temperaturas muito muito altas*.

2.4 Lógica Difusa

A Lógica Difusa evoluiu da necessidade para modelar sistemas vagos ou mal-definidos que são difíceis de tratar usando a lógica binária convencional, mas a própria metodologia é fundamentada em teoria matemática [MOORE & HARRIS, 1994].

Algumas proposições representam tipos de problemas que não possuem uma estrutura na matemática clássica, nem na teoria das probabilidades, para serem resolvidos; são tipos de problemas que os humanos são capazes de resolver através do uso do chamado raciocínio aproximado ou difuso, baseado na teoria dos conjuntos difusos em geral, e na lógica difusa em particular [TCHOLAKIAN, 1992].

2.4.1 O que é Lógica Difusa?

Definição: Lógica Difusa é um ramo da lógica que usa graus de pertinência em conjuntos em lugar de uma pertinência estritamente verdadeira ou falsa.

A familiaridade com a lógica binária e a teoria dos conjuntos tradicional em que um elemento pertence a um conjunto (no universo de discurso) e dado qualquer subconjunto específico, pode-se dizer precisamente se aquele é ou não é um elemento do subconjunto. Por exemplo, uma pessoa pertence ao conjunto dos seres humanos, e determinado um subconjunto específico, como todos os homens, pode-se dizer se cada pessoa pertence ou

não a este subconjunto. É fácil definir com os argumentos coletados sobre muitos elementos de determinados conjuntos que permitem descrever muitos eventos com poucas regras. Por exemplo, a simples declaração *SE a pessoa é homem E é pai ENTÃO a pessoa é um pai*, aplica-se à milhares de pessoas com precisão. As regras são formadas usando os operadores, neste caso o operador de interseção *E*, os quais manipulam os conjuntos.

Entretanto, nem tudo pode ser descrito pela lógica binária. Retornando ao exemplo das pessoas, é fácil classificar toda pessoa como sendo homem ou mulher, porém é muito mais problemático as classificar como sendo alta ou não alta, velha ou jovem.

A lógica difusa consiste em uma técnica que tem sido largamente utilizada em vários tipos de processamento de informação, entre outras, nas áreas de sistemas de controle estáticos, sistemas de controle adaptativos, modelagem de processos, estimação de sinal, previsão do tempo e tomadas de decisão.

2.4.2 Variáveis Linguísticas

Definição: Termo usado em nossa linguagem natural para descrever algum conceito que usualmente tem valores vagos ou difusos.

Todo valor da variável linguística de um objeto pode ser considerado como um conjunto difuso no conjunto de todos os reais valores do objeto. Assim, todo real valor do objeto pertence a um valor da variável linguística com um certo grau [CAO & KANDEL, 1990].

Por ausência de precisão e de modo a dominar a complexidade, é natural explorar o uso do que poderia ser chamado variáveis linguísticas, isto é, variáveis cujos valores não são números mas palavras ou sentenças em um idioma natural ou artificial. A motivação para o uso de palavras ou sentenças em lugar de números são que aquelas caracterizações linguísticas são, em geral, menos específicas que números [ZADEH, 1975].

Em Lógica difusa a principal preocupação é com a quantificação e raciocínio sobre os termos vagos ou difusos da nossa linguagem natural. Estes termos são referidos como variáveis linguísticas também chamadas de variáveis difusas.

Por exemplo, na afirmação *João é jovem* está implícita a variável linguística *idade* com o valor linguístico *jovem*. A tabela 2.1 mostra outras variáveis linguísticas e valores típicos frequentemente usados.

Variável linguística	Valores típicos
Temperatura	Quente, Confortável, Fria
Peso	Baixo, Médio, Alto
Velocidade	Lenta, Média, Rápida
Distância	Curta, Longa
Fluxo	Muito baixo, Baixo, Normal, Alto, Muito alto
Pressão	Baixa, Média, Alta
Nível	Muito baixo, Baixo, Normal, Alto, Muito alto

Tabela 2.1 Exemplos de variáveis linguísticas com valores típicos

Em sistemas especialistas baseados em lógica difusa, variáveis linguísticas são usadas em regras difusas. Uma regra difusa deduz informação sobre uma variável linguística contida em sua conclusão, da informação de outra variável contida em sua premissa. Por exemplo:

Regra 1

Se velocidade é lenta
Então faça a aceleração alta

Regra 2

Se temperatura é baixa
E Pressão é média
Então faça a velocidade muito baixa

É chamado de range os possíveis valores que uma variável linguística pode assumir no universo de discurso. Por exemplo, pode-se dar à variável *velocidade* usada na regra 1 um range de 0 a 1000rpm. A frase *velocidade é baixa* ocupa uma seção das variáveis no universo de discurso.

2.4.3 Inferência Difusa

A Lógica difusa trata um conjunto difuso como uma proposição difusa. Uma proposição difusa é uma declaração que afirma um valor para uma determinada variável linguística. Uma proposição difusa é representada como

Proposição: X é A

quando A é um conjunto difuso no universo de discurso X . Uma regra difusa relaciona duas proposições difusas na forma

Se X é A Então Y é B

Esta regra estabelece a relação ou associação entre as duas proposições.

Como outras técnicas de raciocínio inexato usadas em projetos de sistemas especialistas, a inferência difusa tenta estabelecer uma convicção na conclusão de uma regra, dada a evidência avaliada na premissa da mesma.

2.4.3.1 Multiplicação Vetor-Matriz Difusa

Na multiplicação vetor-matriz clássica é derivado um vetor y , dado um vetor x e uma matriz A por:

$$x \cdot A = y$$

$i \times n$ $n \times p$ $i \times p$

$$y_j = \sum_{i=1}^n x_i a_{ij}$$

A multiplicação difusa vetor-matriz usa a técnica conhecida como *composição max-min*. A operação é similar à multiplicação clássica vetor-matriz.

Considerando esta operação sendo aplicada à uma regra difusa *Se A Então B*, quando A é um conjunto difuso definido sobre X , e B um conjunto definido sobre Y , os vetores A e B são representados como

$$A = (a_1, a_2, \dots, a_n); \quad a_i = \mu_A(x_i)$$

$$B = (b_1, b_2, \dots, b_p); \quad b_i = \mu_B(y_i)$$

e pode ser definida uma matriz M $n \times p$, tal que

$$A \circ M = B$$

em que \circ significa o operador de composição que executa a operação *max-min* em um dado vetor e uma dada matriz e calcula o componente b_j por:

$$b_j = \max_{1 \leq i \leq n} \{\min(a_i, m_{ij})\}$$

Por exemplo, assumindo $A = \{0.2, 0.4, 0.6, 1\}$, a matriz difusa M é

$$M = \begin{vmatrix} 0.1 & 0.6 & 0.8 \\ 0.6 & 0.8 & 0.6 \\ 0.8 & 0.6 & 0.5 \\ 0.0 & 0.5 & 0.5 \end{vmatrix}$$

e fazendo uso da equação acima, pode-se calcular B como

$$\begin{aligned} b_1 &= \max\{\min(0.2, 0.1), \min(0.4, 0.6), \min(0.6, 0.8), \min(1.0, 0.0)\} \\ &= \max\{0.1, 0.4, 0.6, 0.0\} \\ &= 0.6 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} b_2 &= \max\{\min(0.2, 0.6), \min(0.4, 0.8), \min(0.6, 0.6), \min(1.0, 0.5)\} \\ &= \max\{0.2, 0.4, 0.6, 0.5\} \\ &= 0.6 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} b_3 &= \max\{\min(0.2, 0.8), \min(0.4, 0.6), \min(0.6, 0.5), \min(1.0, 0.5)\} \\ &= \max\{0.2, 0.4, 0.5, 0.5\} \\ &= 0.5 \end{aligned}$$

Matematicamente, uma matriz é uma representação de uma relação de dois grupos de variáveis linguísticas. A tarefa é achar um modo para determinar a relação funcional correspondente através da matriz [CAO & KANDEL, 1990].

2.4.3.2 Idéia Fundamental de Inferência Difusa

Um modo fácil de representar uma situação é associá-la com um coeficiente de certeza deduzido de sua distribuição de possibilidade que geralmente é definida como a possibilidade ou mais ou menos a possibilidade da situação [BOUCHON, 1985].

Em [ZADEH, 1975], pode ser visto um conjunto difuso como uma função de distribuição de possibilidade. Esta função mapeia elementos dentro de um universo de discurso atribuindo um valor entre 0 e 1 que reflete o grau de convicção de que algum elemento pertence ao Conjunto difuso.

$$\begin{aligned} A &= \text{distribuição de possibilidade} \\ &= \mu_A(u) \\ &= \Pi_A \end{aligned}$$

Zadeh também observou a capacidade de deduzir informação sobre um conjunto difuso B à partir de outra informação relacionada em A. A aproximação tomada para realizar isto era semelhante a teoria da probabilidade condicional clássica, onde o operador composicional era usado para a clássica operação vetor-matriz. Zadeh procurou uma matriz de distribuição de possibilidade condicional $\Pi_{B/A}$ tal que se ele compusesse isto com a distribuição de possibilidade de A, ele iria obter a distribuição de possibilidade de B.

$$\Pi_A \circ \Pi_{B/A} = \Pi_B$$

onde Π_A é um vetor $1 \times n$, $\Pi_{B/A}$ é uma matriz $n \times p$ e Π_B é um vetor $1 \times p$. Usando esta aproximação, Zadeh pode determinar com a informação sobre A (rotulada A'), e obter informação sobre B (rotulada B') e chamou a esta técnica, *regra de inferência composicional*.

Para formar a matriz de distribuição $\Pi_{B/A}$, Zadeh interpretou os componentes da matriz $\Pi_{B/A}$ como implicações par a par entre A e B . Por exemplo, determinados os conjuntos difusos em forma de vetor, esta matriz se apresenta como:

$$\Pi_{B/A} = \begin{vmatrix} a_1 \rightarrow b_1 & a_1 \rightarrow b_2 & \dots & a_1 \rightarrow b_p \\ a_2 \rightarrow b_1 & a_2 \rightarrow b_2 & \dots & a_2 \rightarrow b_p \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_n \rightarrow b_1 & a_n \rightarrow b_2 & \dots & a_n \rightarrow b_p \end{vmatrix}$$

[KICKERT & MAMDANI, 1978] definem a chamada *regra de inferência composicional* da seguinte forma: Dada uma implicação difusa S : *se A então B*, o conjunto difuso B' é deduzido por um certo conjunto difuso A' onde A e A' são conjuntos difusos no universo de discurso X , enquanto B e B' são conjuntos difusos de Y , cuja função de pertinência é definida por

$$\mu_{B'}(y) = \max \min[\mu_A(x); \mu_S(y, x)], \quad x \in X, \quad y \in Y.$$

2.4.3.3 Inferência Max-Min

Relações Difusas em espaços de produto diferentes podem ser combinadas entre si pela operação de composição. Foram sugeridas versões diferentes de composição, que diferem nos seus resultados e também com respeito às suas propriedades matemáticas. A composição max-min se tornou a mais conhecida e a mais frequentemente usada [ZIMMERMANN, 1996].

Na inferência *max-min* o operador de implicação usado é o *min*. Isto é:

$$m_{ij} = \text{verdade}(a_i \rightarrow b_j) = \min(a_i, b_j)$$

Dados dois conjuntos difusos A e B , e usando a equação acima para a formação da matriz M , pode-se usar a equação do cálculo dos componentes de b_j para determinar a indução do vetor B' sobre um subconjunto de A designado A' .

Por exemplo, assumindo haver um universo de discurso definindo X representando *temperatura*, e um conjunto difuso A definido sobre X que representa *temperatura normal*. Também assume-se um universo de discurso definindo Y representando *velocidade* e um conjunto difuso B definido sobre Y que representa *velocidade média*. Finalmente assume-se a seguinte regra difusa:

Se Temperatura é normal Então Velocidade é média

ou

Se A Então B

Também assume-se que os conjuntos difusos são representados por vetores cujos elementos são mostrados com os valores de seus domínios correspondentes:

Temperatura normal = {0.0/100, 0.5/125, 1.0/150, 0.5/175, 0.0/200}

Velocidade média = {0.0/100, 0.6/200, 1.0/300, 0.6/400, 0.0/500}

A formação da matriz M é iniciada de acordo com a equação $m_{ij} = \min(a_i, b_j)$

$$M = m_{ij} = \min(a_i, b_j)$$

$$= \begin{vmatrix} \min(0.0, 0.0) & \min(0.0, 0.6) & \min(0.0, 1.0) & \min(0.0, 0.6) & \min(0.0, 0.0) \\ \min(0.5, 0.0) & \min(0.5, 0.6) & \min(0.5, 1.0) & \min(0.5, 0.6) & \min(0.5, 0.0) \\ \min(1.0, 0.0) & \min(1.0, 0.6) & \min(1.0, 1.0) & \min(1.0, 0.6) & \min(1.0, 0.0) \\ \min(0.5, 0.0) & \min(0.5, 0.6) & \min(0.5, 1.0) & \min(0.5, 0.6) & \min(0.5, 0.0) \\ \min(0.0, 0.0) & \min(0.0, 0.6) & \min(0.0, 1.0) & \min(0.0, 0.6) & \min(0.0, 0.0) \end{vmatrix}$$

$$= \begin{vmatrix} 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 \\ 0.0 & 0.5 & 0.5 & 0.5 & 0.0 \\ 0.0 & 0.6 & 1.0 & 0.6 & 0.0 \\ 0.0 & 0.5 & 0.5 & 0.5 & 0.0 \\ 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 \end{vmatrix}$$

e, assumindo que o subconjunto A' é dado como

$$A' = \{0.0/100, 0.5/125, 0.0/150, 0.0/175, 0.0/200\}$$

Este subconjunto representa uma leitura crisp de temperatura de 125°C. A esta medida é definido um grau de pertinência de 0.5 para o conjunto difuso *temperatura normal*. Isto induz um conjunto difuso B' (isto é, uma convicção em B) que pode ser determinado.

Com $A = \{0.0/100, 0.5/125, 0.0/150, 0.0/150, 0.0/175, 0.0/200\}$, através da composição *max-min* tem-se

$$b_j = \max_{1 \leq i \leq n} \{ \min(a_i, m_{ij}) \}$$

$$b_1 = \max\{ \min(0.0, 0.0), \min(0.5, 0.0), \min(0.0, 0.0), \min(0.0, 0.0), \min(0.0, 0.0) \}$$

$$b_2 = \max\{ \min(0.0, 0.0), \min(0.5, 0.5), \min(0.0, 0.6), \min(0.0, 0.5), \min(0.0, 0.0) \}$$

$$b_3 = \max\{ \min(0.0, 0.0), \min(0.5, 0.5), \min(0.0, 1.0), \min(0.0, 0.5), \min(0.0, 0.0) \}$$

$$b_4 = \max\{ \min(0.0, 0.0), \min(0.5, 0.5), \min(0.0, 0.6), \min(0.0, 0.5), \min(0.0, 0.0) \}$$

$$b_5 = \max\{ \min(0.0, 0.0), \min(0.5, 0.0), \min(0.0, 0.0), \min(0.0, 0.0), \min(0.0, 0.0) \}$$

$$B' = (0.0/100, 0.5/200, 0.5/300, 0.5/400, 0.0/500)$$

Isto induziu um conjunto difuso que é uma versão cortada de B , cuja altura é fixada por A' . Este é o efeito geral da inferência *max-min* como ilustrada na Figura 2.3 com o conjunto difuso amoldado em uma função triangular.

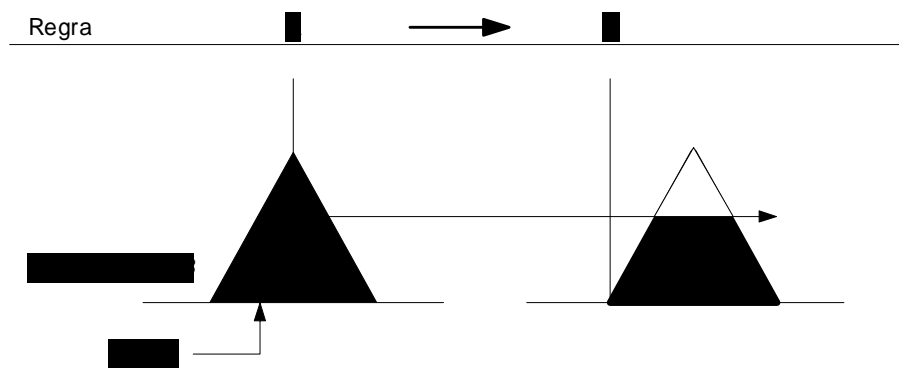


Figura 2.3 Inferência max-min

Um ponto chave neste exemplo é o resultado obtido limitando A' para um único valor. Quer dizer, com a leitura da temperatura de 125 graus obteve-se um vetor A' de (0.5 0.0 0.0 0.0) resultando em um vetor B' de (0.0 0.5 0.5 0.5 0).

Nas aplicações em sistemas de lógica difusa tem-se um valor crisp para alguma medida. Com um único valor de medida (neste caso $x_k = 125^\circ\text{C}$), pode-se usar $\mu(x_k)$

diretamente como a representação do conjunto difuso B , isto é, $\mu(y)$ e obter o conjunto difuso induzido em B' :

$$B' = \mu_A(x_k) \wedge \mu_B(y)$$

Neste exemplo, onde é assumida a temperatura de 125°C , com um grau de pertinência $\mu_A = 0.5$ e

$$\begin{aligned} B' &= \{ \min(0.5, 0.0), \min(0.5, 0.6), \min(0.5, 1.0), \min(0.5, 0.6), \min(0.5, 0.0) \} \\ &= (0.0, 0.5, 0.5, 0.5, 0.0) \end{aligned}$$

Este é o mesmo resultado obtido antes com a matriz associativa difusa. Então, quando a informação de entrada está em forma crisp, não é necessário calcular e manter matrizes difusas, mas simplesmente trabalhar com o que é exigido da informação do conjunto difuso.

No evento, a entrada para uma regra representa uma leitura difusa, possível de se levar a uma aproximação simples. Considere a regra *Se A Então B*, e uma leitura difusa de A designada como A' . Pode-se levar, simplesmente, a interseção dos dois como entrada, $\min(a'_i, a_i)$, para induzir o conjunto difuso B' . Esta aproximação é ilustrada na Figura 2.4.

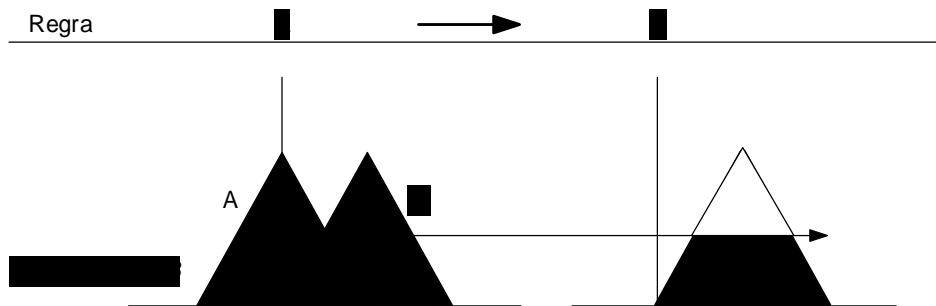


Figura 2.4 Inferência max-min para entrada difusa

2.5 Sistemas Difusos

Um sistema difuso é aquele que tem um componente do sistema que usa a *Lógica Difusa* para sua representação do conhecimento.

Embora seja possível dois sistemas difusos comunicarem-se com informações usando conjuntos difusos, a maioria das aplicações tem um único sistema difuso que se comunica com sistemas convencionais através de valores determinísticos.

A teoria de controle moderna permite o projeto de controladores que fornecem ótimo desempenho em malhas fechadas de controle com respeito a uma medida de desempenho particular; projetar controladores robustos dentro de certas regiões operacionais de incerteza paramétrica e perturbações adicionais de processo; e fazer previsões de estabilidade e desempenho para um processo particular em um ponto operacional [MOORE & HARRIS, 1994].

É comum em um processo de produção contínuo, a existência de vários sistemas de monitoração e controle. Desde o início da revolução industrial, os processos industriais vêm sendo controlados pelos controladores clássicos PID. Atualmente, entre outras, uma alternativa que vem ganhando credibilidade, pela simplicidade e robustez, são os *Controladores Lógicos Difusos*.

2.6 Controladores Lógicos Difusos

Definição: São controladores baseados em experiência, que fazem uso do conhecimento do processo, expresso em regras difusas.

A idéia básica por detrás de um controlador lógico difuso é incorporar a experiência do operador humano de processo no projeto do controlador. À partir de um conjunto de regras linguísticas que descrevem as estratégias operacionais de controle, um algoritmo é construído onde as palavras são definidas como conjuntos difusos. As vantagens principais desta aproximação parecem ser a possibilidade de implementar regras da experiência, intuição, heurísticas e o fato de que não é necessário um modelo do processo. Esta nova aproximação está recebendo atenção cada vez maior, não só em casos de teste mas também em reais aplicações industriais [KICKERT & MAMDAMI, 1978].

O primeiro problema para especificar os parâmetros do controlador lógico difuso é decidir a linguagem difusa. Isto envolve especificação explícita do universo da variável básica, o conjunto de condições da variável linguística e o mapa difuso que relaciona os dois. O termo conjunto normalmente é um compromisso entre flexibilidade (muitas condições) e simplicidade (algumas condições) [BRAAE & RUTHERFORD, 1979].

Um controlador lógico difuso é, essencialmente, um controlador preditivo, que imita o raciocínio humano para manter o processo, baseado em um conjunto de regras geradas por meio de heurísticas.

Controladores difusos são sistemas DDC (Controle Digital Direto) especiais que usam regras para modelar o conhecimento do processo de um modo explícito. Em vez de projetar algoritmos que explicitamente definem a ação de controle como uma função das variáveis de entrada do controlador, o projetista de um controlador difuso escreve regras que vinculam as variáveis de entrada com as variáveis de controle, por relações de variáveis linguísticas [ZIMMERMANN, 1996].

2.6.1 Tipos de Controladores Lógicos Difusos

[ZIMMERMANN, 1996] explica que quando controladores difusos são projetados, várias decisões relativas à estrutura e metodologia tem que ser tomadas. Porém, a classificação de controladores difusos é o resultado de uma sucessão de decisões pelo projetista. Muitas modificações do controlador original de Mamdani foram propostas desde a publicação do seu artigo em 1975 e uma importante modificação, e frequentemente usada, foi introduzida por Sugeno em 1985.

Controlador Mamdani

Segundo [ZIMMERMANN, 1996], a idéia principal do controlador Mamdani é descrever os estados do processo por meio de variáveis linguísticas e usar estas variáveis como entradas para as regras de controle. A variável básica é uma variável de entrada que pode ser um sinal medido ou uma variável de saída de outro controlador.

Formalmente, as condições de cada variável linguística são descritas na forma LV_1, \dots, LV_n pelas suas funções de pertinência $\mu^j_i(x)$, onde i indica a variável linguística, $i = 1, \dots, n$; j indica as condições da variável linguística i , $j = 1, \dots, m(i)$, e $m(i)$ é o número de condições da variável linguística i . O número de variáveis linguísticas e o número de relações entre elas determina o número de possíveis regras. Na maioria das aplicações, podem ser negligenciados certos estados ou porque eles são impossíveis ou porque uma determinada ação de controle não seria útil. É então suficiente escrever regras que cubram somente as condições necessárias.

As regras conectam as variáveis de entrada com as variáveis de saída e são baseadas na descrição do estado difuso que é obtido pela definição das variáveis linguísticas. Formalmente, as regras podem ser escritas como

$$\begin{aligned} \text{Regra } r: & \text{ Se } x_1 \text{ é } A^{j_1} \text{ E } x_2 \text{ é } A^{j_2} \text{ E } \dots \text{ E } x_n \text{ é } A^{j_n} \\ & \text{Então } u \text{ é } A^j \end{aligned}$$

onde A^{j_i} é o j -ésimo termo da variável linguística i que corresponde à função de pertinência $\mu^{j_i}(x_i)$ e A^j corresponde à função de pertinência $\mu^j(u)$ representando o termo da variável de ação de controle. Uma regra para um sistema de controle hipotético de pressão poderia ser da forma:

$$\begin{aligned} & \text{Se } \textit{pressão} \text{ é } \textit{baixa} \text{ E } \textit{variação} \text{ é } \textit{muito negativa} \\ & \text{Então } \textit{ação_da_válvula} \text{ é } \textit{fechar} \end{aligned}$$

A base de regras de sistemas com n entradas e uma saída pode ser visualizada por uma tabela de regras onde são divididas as linhas e colunas de acordo com as condições das variáveis de entrada e as entradas são as consequentes das regras.

A definição de variáveis linguísticas e regras são os passos principais de projeto quando se quer implementar um controlador Mamdani. Antes de elaborar o último passo do projeto que é a escolha do procedimento de defuzzificação apropriado, é definido como os valores de entrada ativam a computação da ação de controle. A essência computacional pode ser descrita como um processo de três passos que consiste de

- 1 - determinação do grau de pertinência da entrada dos antecedentes das regras,
- 2 - computação dos consequentes das regras, e
- 3 - agregação dos consequentes das regras para o conjunto difuso *ação de controle*.

O primeiro passo é computar o grau de pertinência dos valores de entrada dos antecedentes das regras. Empregando o operador de mínimo E como padrão, é computado o ponto de partida ou a regra r como

$$\alpha_r = \min_{i=1, \dots, n} \{ \mu^{j_i}(x_i^{\textit{entrada}}) \}$$

Este conceito permite obter a validação dos consequentes das regras. Assumindo que regras com um baixo grau de pertinência no antecedente tenha pouca validade, conseqüentemente há um corte no conseqüente dos conjuntos difusos na altura do grau de pertinência do antecedente. Formalmente,

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

O resultado deste processo de avaliação é obtido por agregação de todas as consequentes que usam o operador de máximo e é computado o conjunto difuso da ação de controle:

$$\mu^{conseq}(u) = \max, \{ \mu_r^{conseq}(u) \}$$

É importante notar que método de Mamdani leva em conta todas as regras em um único estágio e que nenhum encadeamento ocorre. Assim o processo de inferência em controle difuso é muito mais simples que na maioria do sistemas especialistas.

Considerando que processos técnicos requerem ações de controle crisp, um procedimento que gere um valor de saída crisp, de um determinado conjunto difuso, é requerido. Serão analisados dois métodos freqüentemente usados: Centro de Área (COA) e Centro de Somas (COS).

Centro de Área

O método de centro de área escolhe a ação de controle que corresponde ao centro da área com pertinência maior que zero. A área é ponderada com o valor da função de pertinência. A idéia deste método é agregar a informação sobre possíveis ações de controle que são representadas pela função de pertinência. A solução é um compromisso devido a fuzzificação dos consequentes. Formalmente, a ação de controle é computada como

$$\mu^{COA} = \frac{\int_U u \cdot \mu^{conseq}(u) du}{\int_U \mu^{conseq}(u) du}$$

Centro de Somas

O método do centro de somas é uma versão simplificada do método do centro de área pois não leva em conta o conjunto difuso agregado consequente, mas considera o conjunto difuso resultante de cada avaliação de regra individualmente. São consideradas áreas sobrepostas, que normalmente existem, devido à fuzzificação das regras mais de uma vez. O algoritmo que corresponde a este método é mais vantajoso por ser mais rápido de calcular. Formalmente, o centro de somas é determinado por

$$\mu^{COS} = \frac{\int_U u \cdot \sum_r \mu_r^{conseq}(u) du}{\int_U \sum_r \mu_r^{conseq}(u) du}$$

Um estudo mais aprofundado sobre o controlador Mamdani se deve ao fato deste ser o tipo de controlador utilizado no controle das variáveis do processo modelado neste trabalho, com o qual, posteriormente, vai ser explorado com um exemplo com sua filosofia de implementação.

Controlador Sugeno

Conforme já frisado anteriormente [ZIMMERMANN, 1996], uma modificação freqüentemente usada do controlador Mamdani foi apresentada por Sugeno em 1985. A idéia é escrever regras que têm antecedentes difusos, equivalente ao controlador Mamdani, e consequentes crisp que são funções das variáveis de entrada. Os resultados das regras são agregados como somas de pesos das ações de controle correspondentes a cada regra. O peso de cada regra é o grau de pertinência do antecedente do valor de entrada da regra como computadas no controlador Mamdani. E o procedimento de defuzzificação é, então, desnecessário. Uma regra pode ser escrita formalmente como

$$\begin{aligned} \text{Regra } r: & \text{ Se } x_1 \text{ é } A^{j_1} \text{ E } x_2 \text{ é } A^{j_2} \text{ E } \dots \text{ E } x_n \text{ é } A^{j_n} \\ & \text{Então } u \text{ é } f_r(x_1, x_2, \dots, x_n) \end{aligned}$$

onde as variáveis são definidas como no controlador Mamdani. A função do consequente que depende das variáveis de entrada é normalmente linear, mas podem ser usados outros tipos. Uma regra para o controlador Sugeno poderia ser escrita na forma

Se *temperatura* é *baixa* E *troca_de_temperatura* é *pouco negativa*
Então *aquecimento* = 400 – 120

A definição de uma relação funcional não é direta mas permite a identificação de valores do parâmetro no conseqüente da função.

A ação de controle é computada com ajuda dos graus de pertinência que são avaliados exatamente como no controlador Mamdani. E obtém-se por

$$u^{SUGENO} = \frac{\sum_r \alpha_r \cdot f_r(x_1, x_2, \dots, x_n)}{\sum_r \alpha_r}$$

É possível ver o controlador Sugeno como um controlador linear que é válido ao redor de um ponto operacional definido. O algoritmo de controle no ponto operacional é perfeitamente válido e perde validade com grau de pertinência decrescente que é computada com ajuda dos antecedentes das regras. Assim a estratégia de controle é uma combinação de várias estratégias lineares definidas a pontos diferentes nas condições do espaço.

2.6.2 Estrutura de um Controlador Lógico Difuso

Um controlador difuso recebe em sua entrada valores crisp baseados na intuição e experiência de especialistas humanos através de sentenças condicionais de decisão, chamadas de variáveis linguísticas, que devem ser transformadas em conjuntos difusos representativos do seu conhecimento.

A forma de raciocínio difuso é bastante útil em muitos problemas práticos, particularmente, em aplicações de sistemas de controle onde os sistemas físicos precisam de valores reais em suas entradas em lugar de valores de variáveis linguísticas ou descrições verbais. Por exemplo, ao se desejar aplicar o método de raciocínio difuso para dirigir um carro, um operador humano pode descrever o seu conhecimento na forma de declarações condicionais. Este conhecimento posto no computador serve como um máquina operadora do carro. Então, no real processo motriz, as informações de entrada para o máquina operadora serão sempre reais valores de

algumas variáveis, como X é a , e as saídas exigidas também serão reais valores de alguma variável como Y é b [CAO & KANDEL, 1990].

Este conhecimento expresso em variáveis linguísticas, então, deverá ser qualificado de modo a representar a informação vaga e subjetiva em *níveis de quantificação* com a definição de *funções de pertinência* dos conjuntos difusos.

Em [DOMBI, 1988] podem ser encontradas algumas propriedades recomendadas para a definição de funções de pertinência, tais como: sejam contínuas, sejam mapeadas no intervalo $[a, b]$ a $[0, 1]$, sejam monótonas e crescentes ou decrescentes, sejam convexas ou côncavas, que as funções de pertinência monótonas crescentes devam ser tais que $\mu(a) = 0$ e $\mu(b) = 1$, que as funções monótonas decrescentes devam ser tais que $\mu(a) = 1$ e $\mu(b) = 0$ e que a função deva ser linear ou linearizável.

Uma *base de regras* opera em variáveis linguísticas e um módulo de *fuzzificação* gera as condições como funções dos valores de entrada crisp. A *máquina de inferência difusa* gera as condições das variáveis de saída, processadas em uma unidade computacional, em função das condições de entrada e das regras da base de regras. Como o processo controlado deve ser alimentado por um sinal crisp, o resultado de saída da máquina de inferência difusa é transformado em um valor crisp pelo módulo de *defuzzificação*.

A Figura 2.5 mostra e descreve um controlador Mamdani genérico. O maior interesse pelo controlador Mamdani, como já mencionado, reside no fato de que os controladores concebidos neste trabalho foram baseados neste tipo.

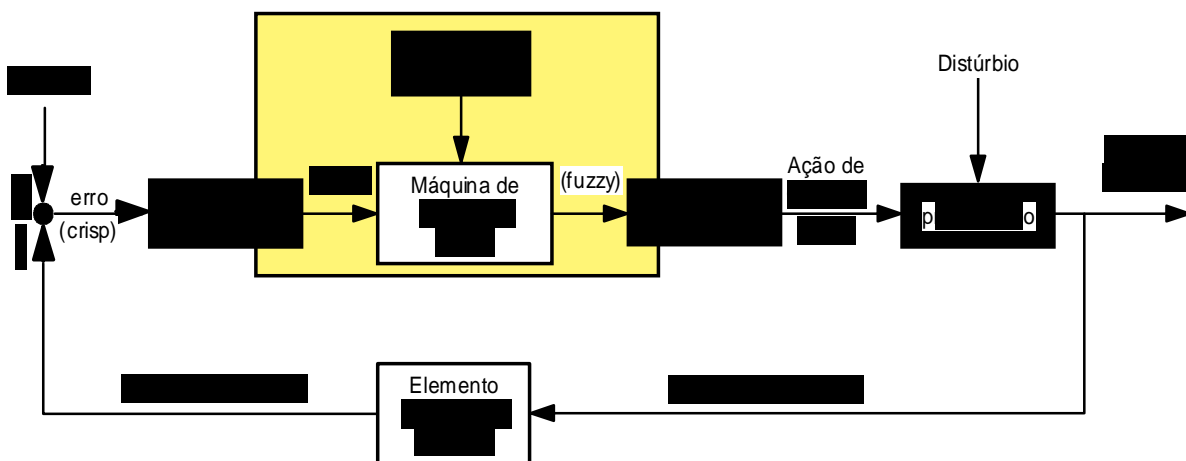


Figura 2.5 Estrutura do controlador Mamdani genérico, [ZIMMERMANN, 1996]

Para demonstração, [ZIMMERMANN, 1996] emprega o seguinte exemplo: considere um sistema de aquecimento em um compartimento. Se a temperatura é

ligeiramente baixa, provavelmente se queira *aumentar um pouco* o aquecimento. Agora, as condições *ligeiramente baixa* e *aumentar um pouco* são interpretadas como variáveis linguísticas com as quais é possível escrever regras que unem estas variáveis, por exemplo

Se *temperatura = ligeiramente baixa*

Então *aquecimento = aumentar um pouco*

Para este sistema, possíveis variáveis básicas são temperatura do compartimento, mudança de temperatura do compartimento, número de janelas abertas, temperatura do ar ambiente, aquecimento, etc. As relações das variáveis linguísticas são conjuntos difusos com uma certa forma. Funções trapezoidais ou triangulares podem ser usadas para os conjuntos difusos devido a eficiência computacional, mas outras formas são possíveis. A variável linguística temperatura pode, por exemplo, consistir de qualificadores como *muito baixa* (mb), *baixa* (b), *confortável* (c), *alta* (a), e *muito alta* (ma) como mostrado na Figura 2.6.

Uma regra razoável para o exemplo do sistema de aquecimento proposto por Zimmermann é a seguinte:

Se *temperatura é baixa* E *troca_de_calor é pouco negativa*

Então *aquecimento é médio*

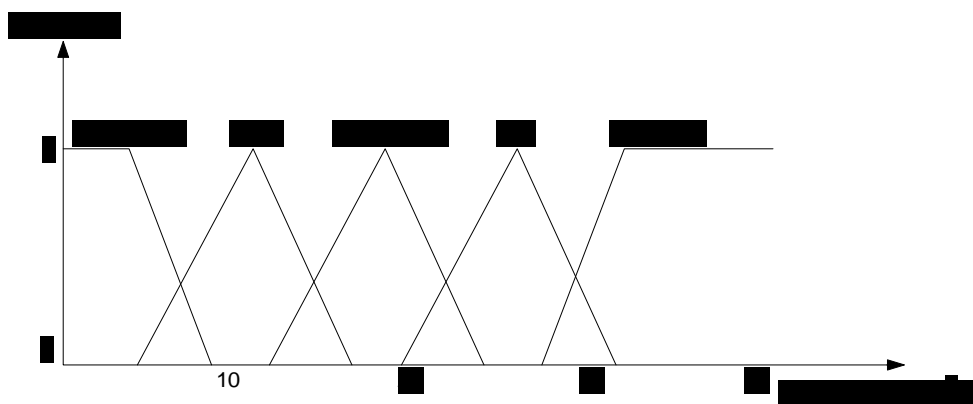


Figura 2.6 Variável linguística *temperatura*

Assumindo a definição de cinco qualificadores para uma variável rotulada de *troca_de_temperatura*: *muito negativo* (mn), *pouco negativo* (pn), *zero* (z), *pouco positivo* (pp), *muito positivo* (mp), e três condições de ação de controle para o aquecimento: *pequeno* (p), *médio* (m) e *grande* (g). Uma possível base de regras é visualizada na tabela 2.2, com duas entradas e uma saída onde são divididas as linhas e

colunas de acordo com as condições das variáveis de entrada e as entradas são as consequentes das regras.

Temp/troca_temp	mn	pn	z	pp	mp
mb		g	g	m	m
b	g	m	m	p	
c		m	p	p	
a		p	p	p	
ma	m	p	p		

Tabela 2.2 Base de regras

A primeira entrada vazia (mb, mn) na tabela 2.2 se refere a um estado onde a temperatura é muito baixa e caindo rapidamente. Considerando que o sistema de aquecimento tem energia limitada, a máxima energia não conduziria a uma temperatura confortável. Uma regra que cobre esta situação é então supérflua. Porém, deveria ser definido um valor *default* que é usado como saída do controlador se nenhuma das regras disparasse.

Assumindo que a temperatura atual é 22°C e que a *troca_de_temperatura* está em -0.6°C/min. Nestas condições, a temperatura é *confortável* com grau 0.4 e *alta* com grau 0.3 (isto pode ser observado através da Figura 2.6). Uma definição similar pode ser notada da variável linguísticas *troca_de_temperatura*, onde *pouco negativo* aparece com grau 0.6 e *zero* com grau 0.2. Através da Tabela 2.2, verifica-se que quatro regras têm um grau de partida maior que zero:

*r10: Se temperatura = confortável E troca_de_temperatura = pouco negativa
Então aquecimento = médio*

*r11: Se temperatura = confortável E troca_de_temperatura = zero
Então aquecimento = baixo*

*r13: Se temperatura = alta E troca_de_temperatura = pouco negativa
Então aquecimento = baixo*

*r14: Se temperatura = alta E troca_de_temperatura = zero
Então aquecimento = baixo*

A função de pertinência é

$$\alpha_{10} = \min \{0.4, 0.6\} = 0.4$$

$$\alpha_{11} = \min \{0.4, 0.2\} = 0.2$$

$$\alpha_{10} = \min \{0.3, 0.6\} = 0.3$$

$$\alpha_{10} = \min \{0.3, 0.2\} = 0.2$$

Consequentemente, os consequentes das regras são

$$\mu_{10}^{conseq}(u) = \min \{0.4, \mu^{média}(u)\}$$

$$\mu_{11}^{conseq}(u) = \min \{0.2, \mu^{baixa}(u)\}$$

$$\mu_{10}^{conseq}(u) = \min \{0.4, \mu^{baixa}(u)\}$$

$$\mu_{10}^{conseq}(u) = \min \{0.4, \mu^{baixa}(u)\}$$

$$\mu^{conseq}(u) = \max \{ \mu_{10}^{conseq}(u), \mu_{11}^{conseq}(u), \mu_{13}^{conseq}(u), \mu_{14}^{conseq}(u) \}$$

A Figura 2.7 descreve o conjunto difuso resultante da ação de controle

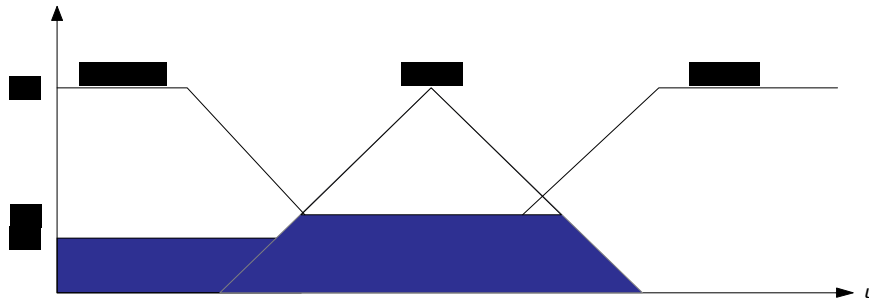


Figura 2.7 Consequentes das regras no exemplo do sistema de aquecimento

O resultado da defuzzificação pelo método do centro de área, que determina o sinal para a ação de controle, é mostrado na Figura 2.8.

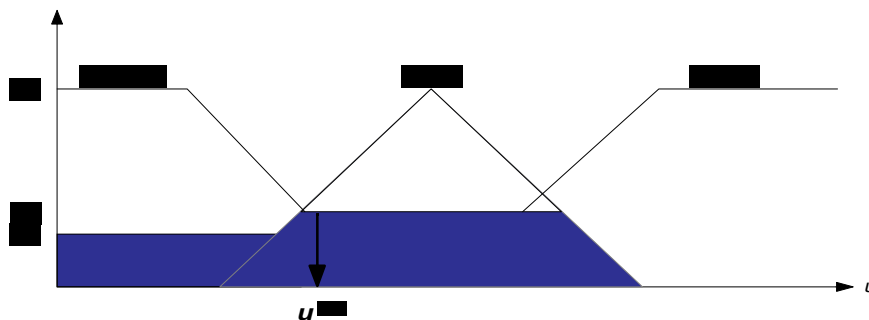


Figura 2.8 Defuzzificação pelo método do centro de área

A ação de controle resultante do centro de somas, para o mesmo exemplo, é mostrada na Figura 2.9. Note que a ação de controle resultante é deslocada para a direita devido ao sobreposição dos conjuntos difusos *pequeno* e *médio*.

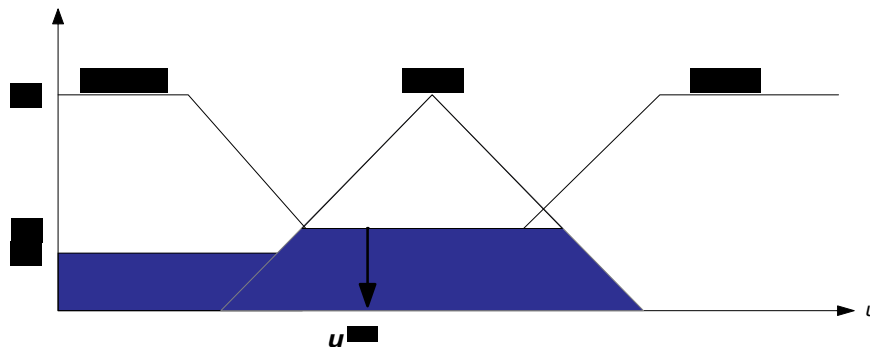


Figura 2.9 Defuzzificação pelo método do centro de somas

2.7 Aplicações de Controladores Lógicos Difusos

Segundo [MOORE & HARRIS, 1994] as pesquisas mais precoces sobre controladores lógicos difusos (CLD) foram levadas a cabo por Mamdani e seus estudantes do *Queen Mary College*, Londres em meados de 1970. Mamdani e Assilian em 1975 aplicaram o primeiro CLD para uma máquina à vapor. Isto foi seguido por Kickert e van Nauta Lenke em 1976 que conceberam um CLD num processo de aquecimento de água em chão de fábrica.

Atualmente, a *Siemens* é a líder mundial no emprego de soluções ecológicas de regulação de processos para a indústria de materiais básicos e de transformação. Em suas publicações a empresa define bem sua posição com relação à pesquisa de CLD's.

Especialmente em processos complexos, como os da fabricação do papel, o emprego da lógica difusa permite surpreendente economia no consumo de matéria-prima e energia. Graças à lógica difusa, a fábrica de celulose sediada em Constância, Portugal, conseguiu uma redução de 14% do consumo habitual de energia e poupar 80% do volume de água anteriormente consumido. No processo de cozimento da celulose, este modelo inteligente permitiu, ainda, reduzir em 30% as variações de qualidade [SIEMENS, 1998].

Em [ZIMMERMANN, 1996], algumas aplicações importantes e interessantes de CLD's podem ser observadas. Uma delas diz respeito ao controle de guindastes que são usados em sistemas de montagens industriais onde cargas pesadas têm que ser

transportadas. Hoje, os guindaste modernos alcançam uma velocidade de, aproximadamente, 160 m/min à uma aceleração de até 2 m/s^2 . A Figura 2.10 mostra um guindaste típico.

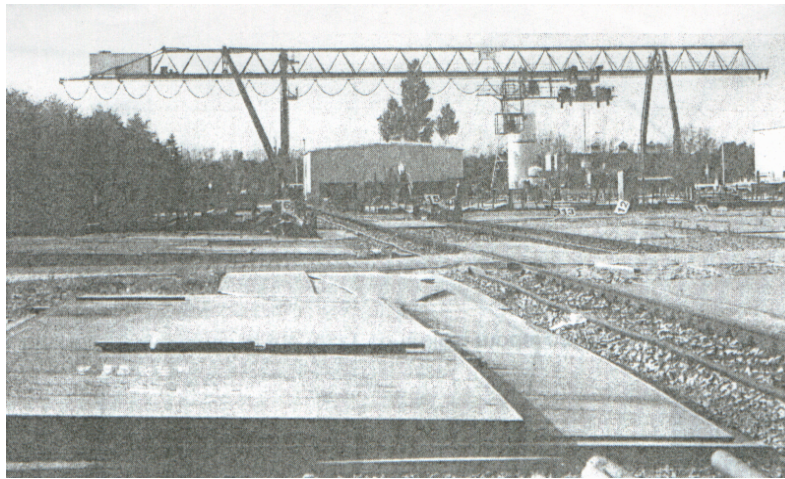


Figura 2.10 Guindaste controlado por controladores difusos

Um dos problemas principais no controle deste equipamento é quando a carga começa a balançar. Isto é evitado com ajuda de telescópios e controle eletrônico. Porém, estes métodos são caros e a construção depende do guindaste em consideração. Foi observado que um operador experiente pode controlar um guindaste satisfatoriamente sem tais dispositivos avançados. Esta foi a motivação para o projeto de um sistema com CLD's.

O controle de guindaste depende do modo de operação: uma pessoa distingue entre uma operação manual, onde um operador controla o guindaste e o objetivo do controlador difuso é evitar balançar, e uma operação automática onde uma certa posição tem que ser alcançada. Os controladores foram implementados em um processador difuso para controle do guindaste em tempo real.

Outra aplicação descrita em [ZIMMERMANN, 1996] é o controle de um modelo de carro onde afirma que um dos processos mais difíceis de controlar com métodos de controle convencionais é um carro, por que modelos matemáticos são grandes e não lineares, e os controladores simples como controladores PID não rendem resultados satisfatórios. A maioria das pessoas, porém, dirige um carro sem qualquer modelo matemático, e está claro que eles usam o seu conhecimento para tal.

Diz que Sugeno e Nishida em 1985 foram os primeiros a implementar um modelo de carro difuso-controlado. As regras do controlador foram derivadas das ações de um perito. Quatro variáveis de entrada foram usadas: distância até a esquina, distância da parede interna, direção (ângulo) do carro e distância da parede externa.

Estas quatro variáveis de entrada são usadas como entradas para um controlador Sugeno com 20 regras. Os resultados foram muito encorajadores. A vantagem é que todas as regras foram derivadas das ações de controle de um motorista experiente com um procedimento de identificação.

Enquanto que o estudo de Sugeno e Nishida tratou de problemas estáticos, van Altrock et al. [1992] considerou o controle de um modelo de carro, com motor elétrico potente e alta aceleração, em situações extremas e inerentemente dinâmicas como deslizamentos e derrapagens. Além disso adicionou características como suspensão de roda individual, discos de freio, diferencial e absorção de choque. Três sensores de direção foram usados para orientação (frente, esquerda, e direita), e sensores infra-vermelhos foram montados em cada roda para medir a velocidade individual.

Outra modificação introduzida foi a determinação de pesos para as regras que são usadas para descrever a plausibilidade de cada regra. O carro deveria alcançar o objetivo, tão rápido quanto possível, sem bater nas paredes ou qualquer obstáculo.

A maioria dos resultados eram muito encorajadores. Porém, em algumas situações o carro perdeu sua orientação devido às informações limitadas obtida dos sensores. Isto só poderia ser evitado se algum tipo de memória fosse usada para computar a orientação corrente. O carro modelo é mostrado na Figura 2.11

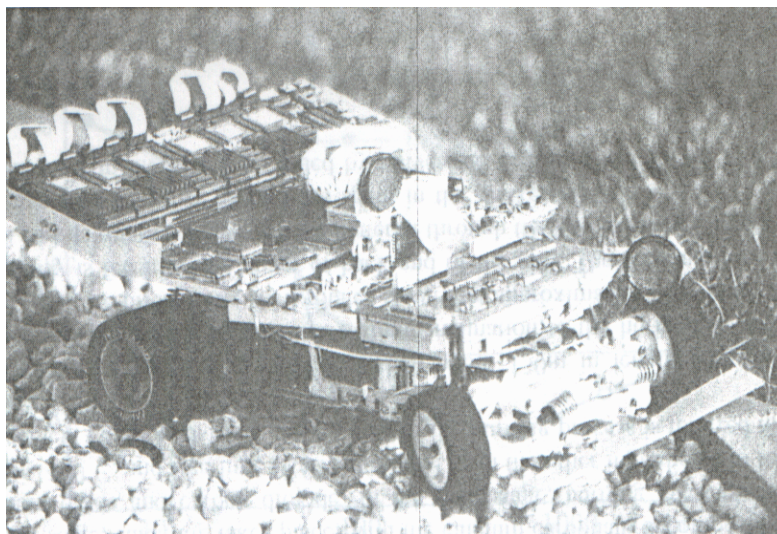


Figura 2.11 Modelo de carro controlado por um controlador difuso tipo Sugeno

Uma outra aplicação em [ZIMMERMANN, 1996] trata do controle de um motor marítimo a diesel por CLD, projetado por Murayama et al. em 1985. O objetivo era minimizar a taxa de consumo de combustível (FCR). A máquina era controlada através da

taxa de fluxo de combustível (Q), medição de injeção de combustível (U), duração da injeção de combustível (T), e pressão da linha de combustível (P). Especial atenção foi prestada na influência direta da medição de injeção de combustível na taxa de consumo de combustível (FCR).

Devido a ruídos nos dados, não podiam ser empregados diretamente métodos de gradiente. Então os autores usaram um método adaptável para verificar os resultados obtidos pela procura de gradiente. São empregados, então, números difusos e um método de ajuste que usa um conjunto difuso para avaliar a credibilidade dos resultados computados.

Nenhuma regra foi usada para calcular a saída de controle como nos controladores Mamdani e Sugeno. Este método pode ser considerado como uma aplicação de análise de dados difusos para um problema de controle. Os resultados obtidos com este método simples foram, porém, também muito encorajadores.

A empresa alemã AEG, fez uso do *software FuzzyTECH* e *NeuroFuzzy* para a construção de uma máquina de lavar roupas. Usando sensores, a máquina pôde obter informações sobre o volume de roupa e seu tipo e à partir disto escolher uma programação otimizada, economizando 20% de água e energia.

“... usando somente sensores iguais aos de máquinas do mesmo nível construídas pela concorrência, foi possível para a AEG descobrir o volume de roupas na máquina criada”; “... uma vez que não existe um modelo matemático definido para o problema, a AEG decidiu usar uma solução baseada em lógica difusa e o conhecimento de seus especialistas em lavagem”.

Infelizmente este primeiro teste não apresentou grande sucesso exatamente porque o conhecimento dos especialistas não tinha sido o suficiente. Uma nova abordagem foi feita usando como ponto de partida a mesma base de conhecimento e o *software NeuroFuzzy* para a aquisição dos demais dados. Após vários treinamentos foi criado um sistema de lógica difusa com 159 regras. Este sistema é capaz de estimar o consumo de água requisitado com uma diferença máxima de aproximadamente 350 mililitros do valor considerado como ideal. Além disso, todo este sistema, capaz de economizar 20% de água e energia elétrica, foi implementado em um controlador de 8 bits [PLANET, 1998].

Em 1947, a Boeing Co. desenvolveu uma solução para os freios de seus aviões para obter melhor frenagem. Hoje o sistema ABS é bastante conhecido e usado em carros de muitos países do mundo. O sistema é bastante simples.

“... sensores eletrônicos são usados para medir a velocidade do carro em cada uma das rodas. À partir desta informação, microcontroladores são usados para controlar os cilindros de frenagem”.

O modelo matemático é bastante simples, e com este modelo seria possível obter-se sempre *a melhor freada possível*, mas para que o tempo de acionamento dos freios seja o menor possível, é necessário que este cálculo seja muito rápido - o que seria impossível de ser implementado a um baixo custo. Decidiu-se então que o escorregamento máximo usado seria igual a 0.1 para qualquer caso nos sistemas ABS convencionais.

Até o momento este era o sistema de freios usados pelas maiores companhias automobilísticas do mundo como Honda, Mazda, Hyundai, BMW, Mercedes-Benz, Bosh, Peugeot, entre outras.

Como é possível notar, o uso da lógica difusa também pode ser aplicada aqui, pois mesmo existindo um modelo matemático, ele não é aplicado como deveria por sistemas computacionais. Num segundo momento, uma empresa Japonesa chamada Nippondenso começou uma pesquisa sobre como melhorar o sistema ABS partindo do princípio que cada tipo de estrada deveria ter um escorregamento ideal. Foram examinados diversos escorregamentos para diversas condições de estradas como mostra a tabela 2.3.

Condições da estrada	Escorregamento ideal
Estrada seca	0.20
Asfalto ou úmido	0.12
Gelo ou neve	0.05

Tabela 2.3 Taxa de escorregamento de estradas para teste de frenagem

O problema era descobrir, sem usar microcontroladores adicionais, o tipo de estrada, para então poder aplicar o escorregamento ideal, pois o custo de usar sensores capazes de fazer tal trabalho era proibitivo ao projeto. A idéia de ter um botão para o motorista pressionar de acordo com as condições da estrada para executar um determinado escorregamento na hora da frenagem foi abandonada.

A solução a que os técnicos chegaram foi muito simples: imagine-se dirigindo um carro equipado com freios ABS padrão a uma determinada velocidade. Após um determinado período de tempo pisa-se no freio, então o ABS começa a funcionar. Mesmo

que a condição da estrada não seja conhecida até o momento, seria possível fazer uma boa estimativa, observando somente a reação do carro.

Foi exatamente o que a Nippondenso fez: num primeiro momento o carro é freado e o sistema ABS usa um escorregamento igual a 0.1. De acordo com a reação do carro outros escorregamentos mais adequados são usados.

Experimentos com o primeiro protótipo que usava somente seis regras mostraram já grande vantagem de performance sobre o sistema ABS comum. Um dos testes alternava pistas em diferentes condições na hora da frenagem como molhado e neve. Neste teste o sistema de lógica difusa mostrou-se muito superior, sendo capaz de detectar as diferentes pistas mesmo durante a freada.

Atualmente os carros da Nissan e Mitsubishi são equipados com freios ABS com lógica difusa. Todas as outras companhias já citadas como Honda, Mazda, Hyundai, BMW, Mercedes-Benz, Bosh e Peugeot estão atualmente trabalhando em soluções similares [PLANET, 1998].

[ZIMMERMANN, 1996] enfatiza que com a popularidade ascendente dos CLD's, mais engenheiros serão treinados nesta área no futuro. Este treinamento conduzirá a mais aplicações de sistemas de CLD's e a um campo ascendente de experiência dos engenheiros envolvidos. E conclui: controlador lógico difuso é uma parte integrante da teoria de controle moderna e não substitui métodos convencionais, mas os complementa bastante.

Capítulo 3 O Processo Estudado

3.1 Introdução

Neste capítulo será descrito, em primeiro lugar e de forma objetiva, uma usina termoelétrica no contexto do sistema interligado de energia e seu fluxo de produção, a fim de facilitar o entendimento da definição do problema tratado neste trabalho.

O ponto básico do problema está abordado a seguir e resume-se na dificuldade de manter sob controle sistemas vitais do processo de geração. Um desses sistemas é o de água de alimentação da caldeira, cujo controle é complexo e efetuado por sistemas convencionais, que, em momentos críticos, nem sempre respondem com a velocidade requerida ou da forma desejada.

Em seguida, é apresentada a proposta para a solução do problema, através da modelagem matemática do sistema de água de alimentação da caldeira e da aplicação de técnicas de controle baseadas em controladores difusos (fuzzy based controllers), pelo qual se objetiva oferecer uma alternativa para obtenção de uma performance mais confiável em situações críticas de operação, e assim diminuir a frequência da intervenção humana.

Finalmente, serão detalhados os requisitos e as necessidades de *hardware* para a implementação do sistema de controle das bombas de água de alimentação.

Como ferramenta de trabalho foi utilizado o software Matlab 5.2 para a construção do modelo matemático e para simulação dinâmica do processo em tempo real.

3.2 Usinas Termoelétricas no Contexto de um Sistema Elétrico

O sistema elétrico brasileiro é constituído basicamente de usinas hidroelétricas e poucas termoelétricas de grande, médio e pequeno porte, interligadas por linhas de transmissão. Este sistema é monitorado e controlado regionalmente por centros de operação, conhecidos por *Despachos de Carga*, os quais, em geral, atendem a uma central nacional localizada na capital do país.

Por constituírem usinas de alta capacidade de geração, as grandes hidrelétricas são as responsáveis, em muito maior grau, pelo controle de frequência do sistema. Problemas operacionais, entretanto, ocorrem com certa periodicidade, tais como limitações, falhas ou

indisponibilidade forçada de equipamentos vitais das usinas. Outros fatores restritivos, como paradas para manutenção ou reduções de carga provocadas por baixo nível nos reservatórios em períodos de estiagem, podem comprometer ou provocar a instabilidade do Sistema Elétrico Interligado.

Neste contexto, as usinas termoeletricas passam a desempenhar uma função estratégica para o sistema, contribuindo, nos períodos críticos, como supridora de energia reguladora de tensão. Nas condições mais comuns, em que os reservatórios das usinas hidroelétricas apresentam nível normal, elas podem gerar à plena carga, enquanto as usinas termoeletricas, eventualmente, são desligadas, permanecendo em reserva fria ou operando em regime de carga mínima, economizando combustível. O regime de trabalho dessas usinas é regulado pelo *Despacho Central*, que, em geral, só solicita geração elevada ou máxima nos horários de pico ou em situações de emergência.

Neste regime intermitente de trabalho, os operadores de usinas termoeletricas estão sujeitos a receber, a qualquer momento, solicitações do *Despacho de Carga* para elevações ou reduções de geração. Seja o controle superordenado ou não, uma demanda de variação da geração exigida pelo sistema pressupõe a existência de uma função de controle, remota ou local, para a geração do *setpoint* de potência. Esta função de controle, ao nível de uma unidade geradora, tem hierarquia de primeiro nível, e comanda, automaticamente, todos os equipamentos e dispositivos responsáveis pelo controle coordenado da geração. Apenas para citar os principais sistemas, trabalham sob o comando do sistema de controle de carga: o sistema de água de alimentação da caldeira, os sistemas de combustível e de ar de combustão, os sistemas de controle de pressão e da temperatura do vapor.

3.3 Usina Termoeletrica

Uma usina termoeletrica de grande porte é uma planta bastante complexa, com uma variedade de processos que interagem continuamente e exigem sistemas de controle de alto desempenho e confiabilidade, capazes de proporcionar uma supervisão eficaz e uma interface homem-máquina simples e amigável.

O sistema de controle é capaz de manter a unidade operando em modo automático pleno, bem como comandar elevações e reduções normais de geração, ou mesmo manter condições seguras de operação em situações de emergência. Certas ocorrências, entretanto, levam alguns processos a operar além dos limites de controlabilidade dos sistemas de

malha fechada, situações em que a responsabilidade pela segurança da planta passa a ser ditada pelo sistema lógico de intertravamento e proteção. Portanto, apesar do alto grau de automação, muitas situações exigem a intervenção direta dos operadores para manter ou restabelecer a estabilidade da unidade geradora. Do ponto de vista de controle, certas situações de emergência ocorrem porque as velocidades de resposta dos diversos processos são muito distintas. Distúrbios no lado do turboalternador são da ordem de segundos ou milissegundos, enquanto do lado da caldeira esses números são da ordem de alguns minutos. Muitos processos não respondem com a velocidade determinada pela perturbação. Nestas ocasiões, os operadores precisam tomar decisões rápidas, algumas equivocadas, que podem levar ao desligamento da unidade.

O processo específico estudado neste trabalho foi o sistema de água de alimentação da caldeira e seu ciclo dentro do fluxo de produção. Usinas termoeletricas de grande porte são, normalmente, construídas em locais próximos a um manancial de água (um rio, por exemplo), com capacidade para fornecer água em quantidade suficiente para alimentação da caldeira, a todos os sistemas de refrigeração e demais aplicações.

O ciclo básico do sistema de água de alimentação de uma usina termoeletrica pode ser visto, de forma simplificada, na Figura 3.1.

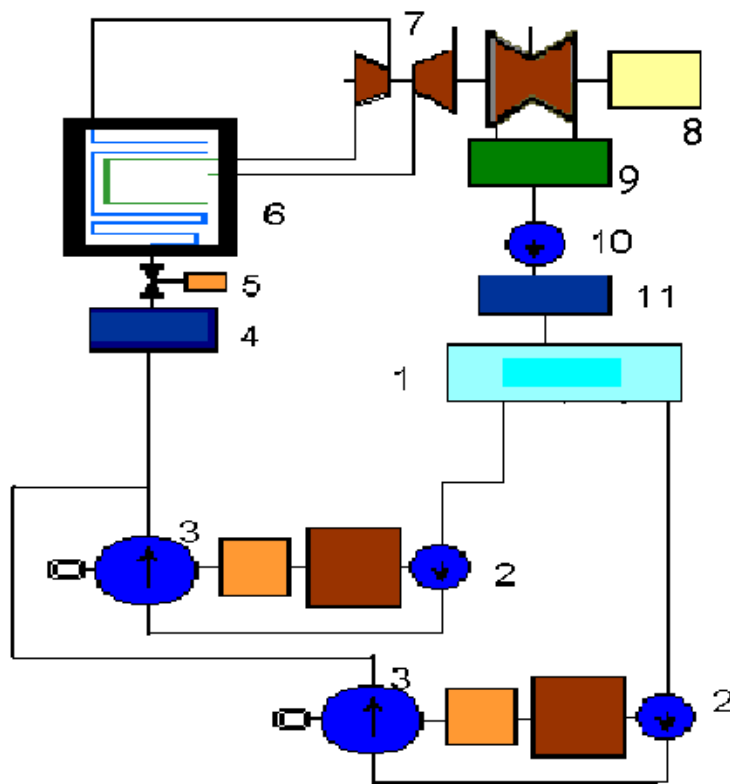


Figura 3.1 O ciclo de água de alimentação de uma usina termoeletrica

- A água captada da fonte disponível, após ser tratada e desmineralizada, é armazenada no tanque de alimentação (1), cuja reposição contínua é assegurada por uma sistema de *make-up* associado à estação de tratamento d'água.
- A bomba principal de água de alimentação (3) é suprida por um estágio *booster* (2), o qual recalca água do tanque e assegura a pressão mínima necessária na sucção da bomba principal.
- Antes de chegar à caldeira, a água passa por estágios de pré-aquecimento (4), por meio de trocadores de calor de alta pressão que aproveitam o calor latente do vapor de determinadas extrações da turbina para elevar a temperatura da água, com o objetivo de otimizar o rendimento do ciclo térmico da unidade.
- A válvula de controle (5) tem a função de assegurar um diferencial de pressão adequado entre a descarga das bombas e a caldeira. Esta é uma tarefa de controle importante, com dupla finalidade: (a) contribuir para manter as bombas operando dentro de suas características de projeto; (b) garantir a operação dos componentes de todo o sistema de injeção de água de atemperação dentro de limites normais de pressão diferencial.
- O vapor superaquecido na saída da caldeira (6), com parâmetros controlados dentro de certos limites de tolerância, é plenamente admitido no estágio de alta pressão da turbina (7). Reaquecedores do vapor, para ser admitido pelo estágio de média pressão da turbina, justificam o ganho de rendimento térmico.
- A conversão eletromecânica de energia ocorre no alternador (8), acoplado ao eixo da turbina, que é a máquina responsável pela conversão da energia cinética de rotação (movimento) em energia elétrica.
- Completado o salto entálpico, o vapor saturado na exaustão da turbina de baixa pressão é descarregado em um poço coletor (denominado poço quente), após atravessar o condensador (9), que constitui um grande trocador de calor com a função de condensar o vapor de baixo título.
- Para completar o ciclo, duas bombas de extração (10) têm a função de devolver o condensado ao tanque de alimentação. Antes disto, o condensado circula por pré-aquecedores de baixa pressão (11), que aproveitam calor latente de vapor extraído do estágio de média pressão da turbina com a finalidade de elevar a temperatura da água no tanque de alimentação. O sistema de pré-aquecimento melhora o desempenho térmico da unidade, e, embora contribua com uma pequena margem, garante um melhor rendimento.

Este é um processo bastante complexo, com muitos equipamentos envolvidos e com subsistemas de diferentes ordens. Em função disto, um grande número de variáveis são medidas e monitoradas por sistemas convencionais de intertravamento e proteção e controladas normalmente por redes do tipo P (proporcional), PI (proporcional + integral) e PID (proporcional + integral + derivativo). Um grande número de funções é necessário para configurar um determinado sistema de controle, com a finalidade de atender o modelo requerido para a operação otimizada do processo.

Muitos outros subsistemas, tão ou mais complexos quanto o descrito, tomam parte do ciclo de produção de uma usina termelétrica, tais como o sistema de combustível (óleo e carvão), o sistema de ar de combustão, o sistema de controle de pressão e temperatura do vapor, o sistema de produção de águas, o tratamento e o descarte de efluentes, citando apenas alguns dos mais importantes, mas que não fazem parte do escopo deste trabalho.

3.4 Bombas de Água de Alimentação

Em plantas industriais complexas, como uma usina termelétrica de grande porte, muitos equipamentos exigem monitoração e controle precisos, com a finalidade de assegurar a máxima disponibilidade operacional, com qualidade, confiabilidade e mínimo risco de danos. As bombas de água de alimentação (Figura 3.2) fazem parte desta classe de equipamentos.

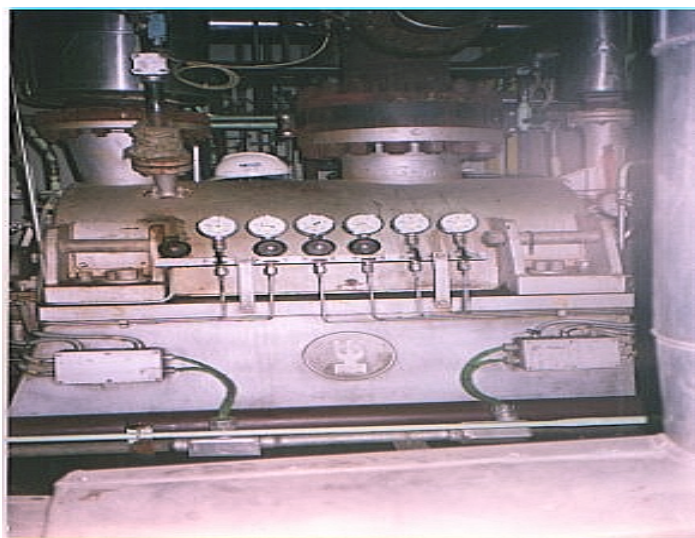


Figura 3.2 Bomba de água de alimentação da caldeira da unidade 7 do Complexo Termelétrico Jorge Lacerda de Capivari de Baixo

O conjunto de uma bomba de água de alimentação para caldeira é mostrado, esquematicamente, na Figura 3.3 com seus componentes principais.

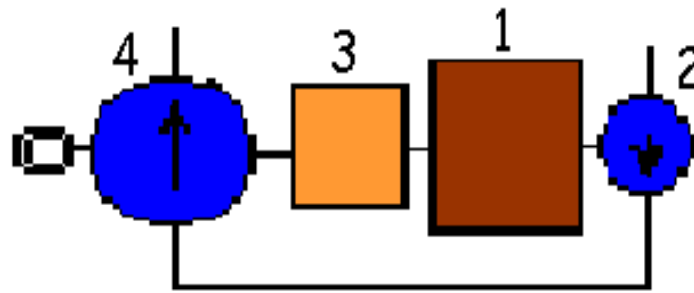


Figura 3.3 Esquema da bomba de água de alimentação

Basicamente, o conjunto é acionado por um motor (1), que numa usina de 350 MW consome cerca de 7 MW de potência a uma tensão de 6,3 KV. O mesmo motor aciona a bomba auxiliar (2), também denominada bomba *booster*, e, através de um acoplamento hidrodinâmico (3), também a bomba principal (4). A bomba *booster* succiona diretamente do tanque de alimentação e sua tarefa é garantir a pressão mínima para a bomba principal. A bomba principal, por sua vez, trabalha com velocidade variável e, portanto, com pressão e vazão variáveis. A variação de velocidade (rotação) é determinada pela caixa de acoplamento *Voith* (3), cujo dispositivo de regulação obedece ao sistema de controle de água de alimentação da caldeira.

3.5 O Problema

Nas entrevistas com engenheiros, técnicos de manutenção e operação do Complexo Termelétrico Jorge Lacerda, foram avaliados certos problemas de supervisão e controle de equipamentos importantes. Alguns destes problemas merecem atenção e dedicação para resolvê-los.

Destacamos o sistema de controle e supervisão das bombas de água de alimentação da caldeira 7, que tem proporcionado diversas ocorrências operacionais em função de alguns fatores restritivos. Tais ocorrências têm, com certa frequência, levado a perda das bombas e, conseqüentemente, ao desligamento da unidade, com reflexos negativos sobre a comercialização da energia. O problema básico reside na dificuldade de manter as bombas trabalhando dentro dos limites de carga permitidos, quando ocorrem certas dificuldades

operacionais, como instabilidade de alguns processos interativos e a atuação (indevida ou não) de proteções. Com frequência, a instabilidade leva a perda de uma bomba e a partida automática da bomba *stand-by*. Esta é uma condição transitória crítica e todos os esforços no sentido de contornar o problema nem sempre resultam em sucesso.

A unidade dispõe de três bombas de alimentação. Em regime normal de carga, duas bombas estão em operação e uma terceira permanece em *stand-by* (estado de espera). O acoplamento hidrodinâmico da bomba *stand-by* acompanha aquelas em operação, de modo que, em caso de entrada automática, minimiza-se o tempo de partida e conseqüentemente o risco de perda da unidade.

A seguir são apresentadas as condições normalmente esperadas quando da ocorrência de desligamentos (voluntários ou não) das bombas, nas variações de carga e nas ocasiões de instabilidade provocadas por falhas em equipamentos.

- Em caso de desligamento de uma das bombas, seja por necessidade operacional ou por paradas intespetivas, a bomba reserva deverá entrar automaticamente em operação, com a tarefa de manter a unidade em funcionamento sem a necessidade de reduzir a geração.
- As variações de geração da unidade são efetuadas diretamente pelo operador, através de uma estação de *setpoint* de carga, que, por sua vez, fornece o sinal de comando para o sistema de controle de água de alimentação. Os controles individuais das bombas são os responsáveis pelas correções necessárias para a nova condição. Estas manobras são feitas de maneira programada e gradual, permitindo ao operador o controle da situação.
- Nas falhas ou paradas intempestivas de equipamentos importantes para a produção, tais como moinhos de carvão, ventiladores de tiragem induzida ou forçada, pré-aquecedores de ar do combustão, bombas de extração de condensado, etc., é disparado um sistema de proteção denominado *run-back*. O modo *run-back* tem a função reduzir automaticamente a geração da unidade para o valor máximo possível, quando da ocorrência da perda de um desses equipamentos.

Para situações estáveis de operação, como numa variação programada de geração, por exemplo, o controle das bombas de alimentação apresenta bom desempenho. Em situações transitórias, porém, o desligamento ou partida de uma bomba de alimentação

pode gerar grandes transtornos, como, por exemplo, a perda de uma bomba e a entrada sem êxito da bomba *stand-by*, que disparam o modo *run-back*.

Em condições normais de operação, quando os parâmetros das bombas estão dentro dos limites admissíveis, o sistema de controle da válvula de água de alimentação controla a pressão diferencial entre a descarga das bombas e a caldeira.

Em qualquer condição de carga, as bombas de alimentação deverão ser mantidas dentro dos limites operacionais definidos pelas suas *curvas limites*. A operação fora da região delimitada pelas curvas limites significa sobrecarga, situação que levaria as bombas a um regime de cavitação, com riscos de danos de grandes proporções. Para evitar isto, o sistema de supervisão de *curva limite* desliga a máquina por proteção.

A atuação da proteção por curva limite é sempre precedida de uma curva de alarme, que estabelece uma margem de segurança pela qual se intervém no processo a tempo de contornar, transitoriamente, o risco de perda de uma bomba. Comandos em malha aberta são então disparados para a válvula de água de alimentação, que, ao fechar, recupera a pressão na descarga das bombas, trazendo o ponto de controle para dentro da região segura de operação.

Dois fatores, entretanto, dificultam esta manobra: (a) a velocidade de resposta da válvula, que nem sempre é suficiente para limitar a sobrecarga das bombas; (b) a falta de recursos de controle para calcular e determinar a excursão da válvula sem risco para as bombas e com mínimo de impacto sobre a alimentação de água para a caldeira.

O primeiro problema é de caráter construtivo e só pode ser resolvido se a válvula for dotada de um dispositivo especial de acionamento de alta velocidade. A segunda limitação, porém, pode ser contornada mediante a implementação de técnicas de controle mais eficazes.

Diante destas limitações, os operadores são muitas vezes obrigados a intervir no comando, transferindo o controle para modo manual na tentativa de manter, pelo menos, uma bomba em operação para evitar a perda da unidade, o que, além dos prejuízos decorrentes, sempre compromete a estabilidade e a confiabilidade da unidade.

Algumas vezes os operadores obtêm êxito. A prática porém, demonstra que é difícil a tarefa do operador, já que tem que tomar muitas decisões importantes num momento em que precisa dividir sua atenção com diversos outros processos que precisam ser rapidamente reajustados. O sucesso portanto, depende de muitos fatores e, muitas vezes, de sorte.

3.5.1 Curvas das Bombas de Água de Alimentação

A Figura 3.4 ilustra a região de trabalho das bombas de água de alimentação, delimitada por curvas limites que, como visto, não podem ser ultrapassadas.

As bombas operam com velocidade variável, sendo que, para cada valor de velocidade, uma dada vazão resulta em função da carga representada pela caldeira. Qualquer ponto da relação *pressão x vazão*, para qualquer situação, deve se situar dentro dos limites impostos pelas curvas.

Observando a Figura 3.4 pode ser verificado, por exemplo, que para uma rotação de 6000 rpm, a pressão deve ficar entre 230 e 340 bar e a vazão entre 180 e 750 m³/h. Para uma rotação de 4000 rpm a pressão deve ficar entre 150 e 200 bar e a vazão entre 120 e 490 m³/h.

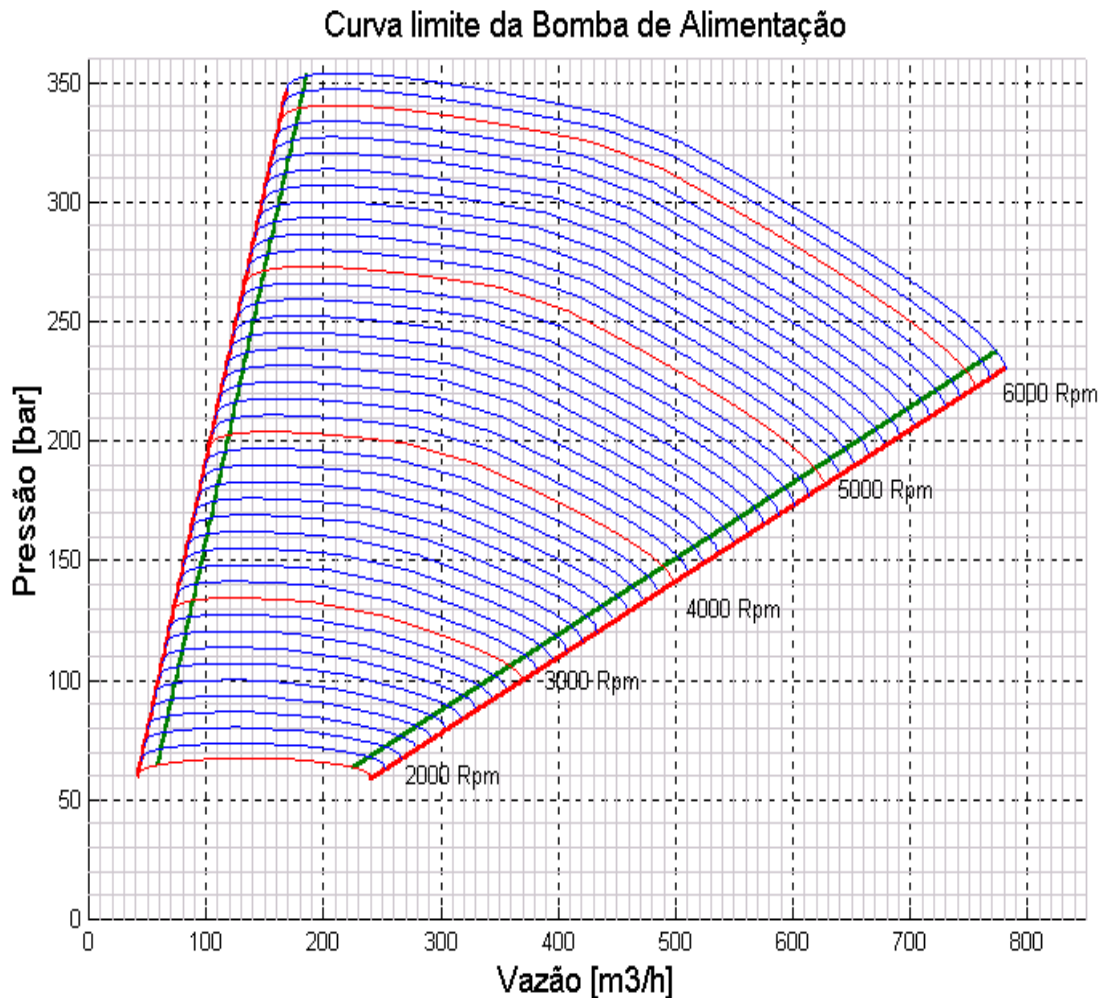


Figura 3.4 Curva característica das bombas de água de alimentação

3.5.2 Válvula Principal de Controle

A válvula principal de controle de água de alimentação (Figura 3.5) é um equipamento importante para a operação das bombas de alimentação da caldeira. A válvula assegura a manutenção de uma pressão diferencial constante entre a descarga das bombas e a caldeira, e deve ser suficiente para manter as bombas operando dentro da região segura de trabalho. O diferencial de pressão através da válvula não deve ultrapassar o limite de projeto e um valor mínimo é importante para garantir a operação satisfatória do sistema de injeção de água de atemperação. Altos diferenciais de pressão entre a descarga intermediária das bombas e a caldeira provocam o desgaste prematuro das válvulas de atemperação. Pressões diferenciais muito baixas, entretanto, desviam o ponto de trabalho das bombas, aproximando-as da curva limite de sobrecarga. Vê-se, portanto, que existem compromissos contraditórios a serem cumpridos, e é tarefa do engenheiro de controle encontrar uma condição satisfatória e segura.

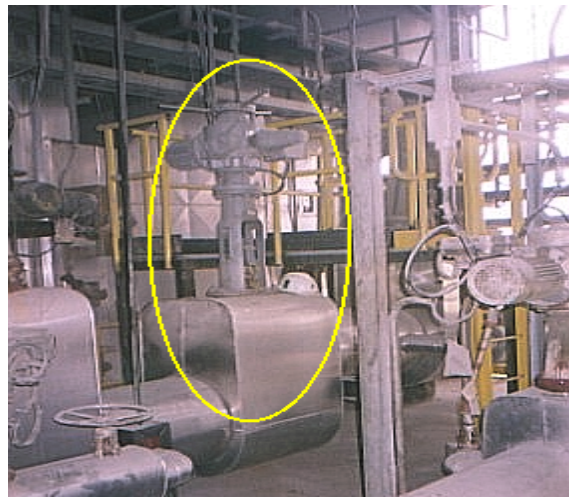


Figura 3.5 Válvula principal de controle

A válvula de água de alimentação não controla a pressão na descarga das bombas e tampouco a vazão de água para a caldeira, mas serve como elemento de controle importante para manter esses parâmetros dentro dos limites prescritos pelo projeto. Do ponto de vista de controle, a válvula segue as bombas de alimentação, abrindo ou fechando de acordo com a rotação das bombas. Um aumento de rotação, por exemplo, provoca um correspondente aumento da pressão a montante da válvula e, portanto, um aumento na pressão diferencial através da mesma. Em resposta, a válvula abre para manter a pressão diferencial em 6 Bar e a vazão de água de alimentação para a caldeira aumenta. Além

destas tarefas, a válvula é utilizada para intervir nas situações de emergência descritas, quando sua contribuição é essencial para recuperar as condições normais de operação da unidade.

A pressão diferencial através da válvula é a sua variável controlada quando não existe distúrbio no processo, ou seja, quando as bombas estão operando dentro dos limites especificados. Em Jorge Lacerda IV, a pressão diferencial através da válvula principal de controle de água de alimentação é mantida em torno de 6 Bar.

Esta válvula possui características construtivas e funcionais específicas e se diferencia da maioria das válvulas de controle usadas comumente (como as lineares, quadráticas ou de igual porcentagem). Pelo fato de não ser encontrada documentação do fabricante que fornecesse a curva característica da válvula, foi levantada uma família de curvas (Figura 3.6), baseada no comportamento da válvula em diferentes situações operacionais.

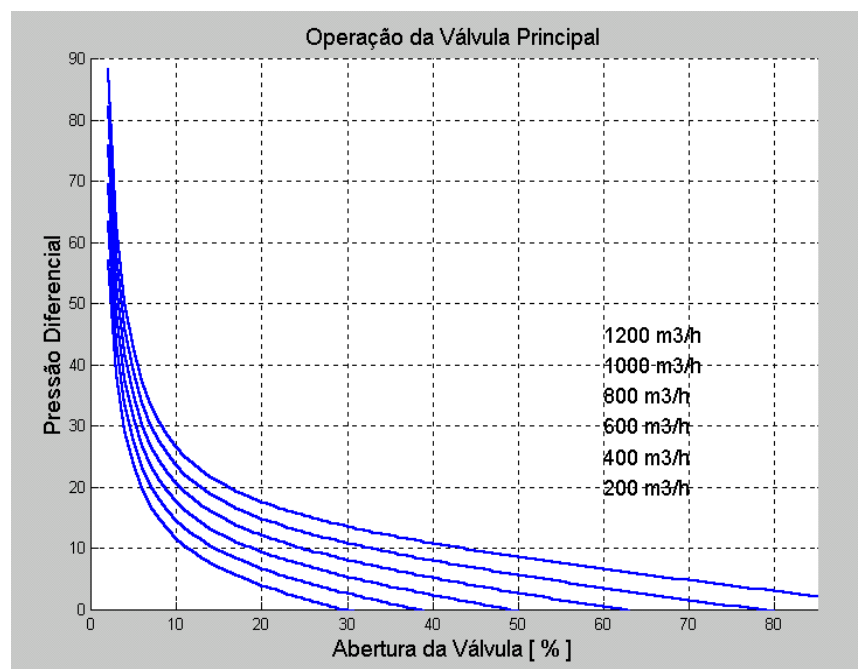


Figura 3.6 Família de curvas da válvula principal de controle

3.6 Proposta para Resolução do Problema

A solução para melhorar a contribuição da válvula no sentido de evitar a sobrecarga das bombas de alimentação passa pela adoção de técnicas de controle mais avançadas do que as disponíveis. Como alternativa, propõe-se a implementação de controladores difusos,

buscando com estes um desempenho mais adequado às necessidades do processo, de forma a garantir maior velocidade nas respostas aos distúrbios e estabilização mais rápida do sistema.

Para testar a flexibilidade e o desempenho dos controladores baseados em lógica difusa na solução do problema apresentado, a alternativa mais racional seria a de fazê-lo na própria usina, onde se poderia traçar comparativo real entre o sistema atual e o sistema proposto. Porém, além de vários outros motivos que justificam o impedimento deste intento, o tempo para implantação e testes trariam, com certeza, prejuízos à produção, fato bastante convincente para a procura de outros caminhos.

Diante desta dificuldade, restou a alternativa de desenvolver, em computador, um modelo matemático do ciclo de água de alimentação, com ênfase a modelagem das bombas, que é o processo a ser efetivamente controlado. Buscou-se a melhor aproximação possível através do levantamento de funções de transferência.

A opção pelo desenvolvimento do modelo no Matlab justifica-se por que este aplicativo atende todas as necessidades de implementação: interface, construção do modelo matemático, concepção dos controladores difusos e simulação dinâmica.

3.6.1 Requisitos para a Implementação do Modelo

Para uma modelagem criteriosa de um processo razoavelmente complexo como o estudado, além da mineração dos conhecimentos com base na experiência de especialistas, são necessários dados e funções obtidas da análise das planilhas de operação, gráficos de processos, manuais de montagem e operação dos equipamentos e procedimentos de teste e otimização de malhas de controle. As pesquisas sobre o funcionamento do processo real determinaram as principais funções a serem modeladas, que estão listadas a seguir.

- *Curvas das bombas de água de alimentação*
 - Fornecem os limites de rotação em função das condições de carregamento das bombas (pressão x vazão).

- *Curva da válvula de controle principal*
 - Determina a pressão diferencial de operação em função da abertura e de uma dada vazão.

- *Função de transferência de rotação*
 - Estabelece a vazão e a pressão determinadas pela curva limite das bombas.
- *Função de transferência de geração*
 - Fornece o valor de energia elétrica gerada pelo turboalternador.
- *Controlador difuso de pressão diferencial e curva limite*
 - Determina a abertura da válvula de controle principal em função das variáveis de entrada e decide pelo controle, ou da pressão diferencial ou da curva limite.
- *Controlador difuso de rotação*
 - Determina a velocidade da bomba de água de alimentação em função da carga exigida pelo turboalternador.
- *Transmissores*
 - Responsáveis pela medição das variáveis de processo (vazão, pressão e rotação) e normalização das diferentes escalas (range) para o valor padrão de saída (1 a 5 Volts é a faixa de medição adotada para os instrumentos).

3.6.2 Implementação do Modelo Matemático do Processo

A modelagem precisa dos valores e características de um processo industrial, mesmo para os que possuem bons conhecimentos sobre a sua dinâmica, quase sempre é acompanhada de sérias dificuldades. Se não é possível prever tudo, é importante a concepção de um modelo que possua as principais características do sistema real. Naturalmente, devem ser considerados fatores importantes como a ordem de controle do sistema, tempo morto e função de transferência dos instrumentos que compõem as malhas de controle.

O modelo matemático do processo estudado foi implementado com a caixa de ferramentas (*tool box*) *Simulink* do Matlab 5.2, que tem como propriedade permitir a implementação por blocos, como pode ser observado na Figura 3.7. Cada bloco visualizado representa uma máscara onde estão modelados os subsistemas, além de

disponibilizar a interface com outras caixas de ferramentas, como por exemplo, a *tool box fuzzy* para a concepção dos controladores difusos.

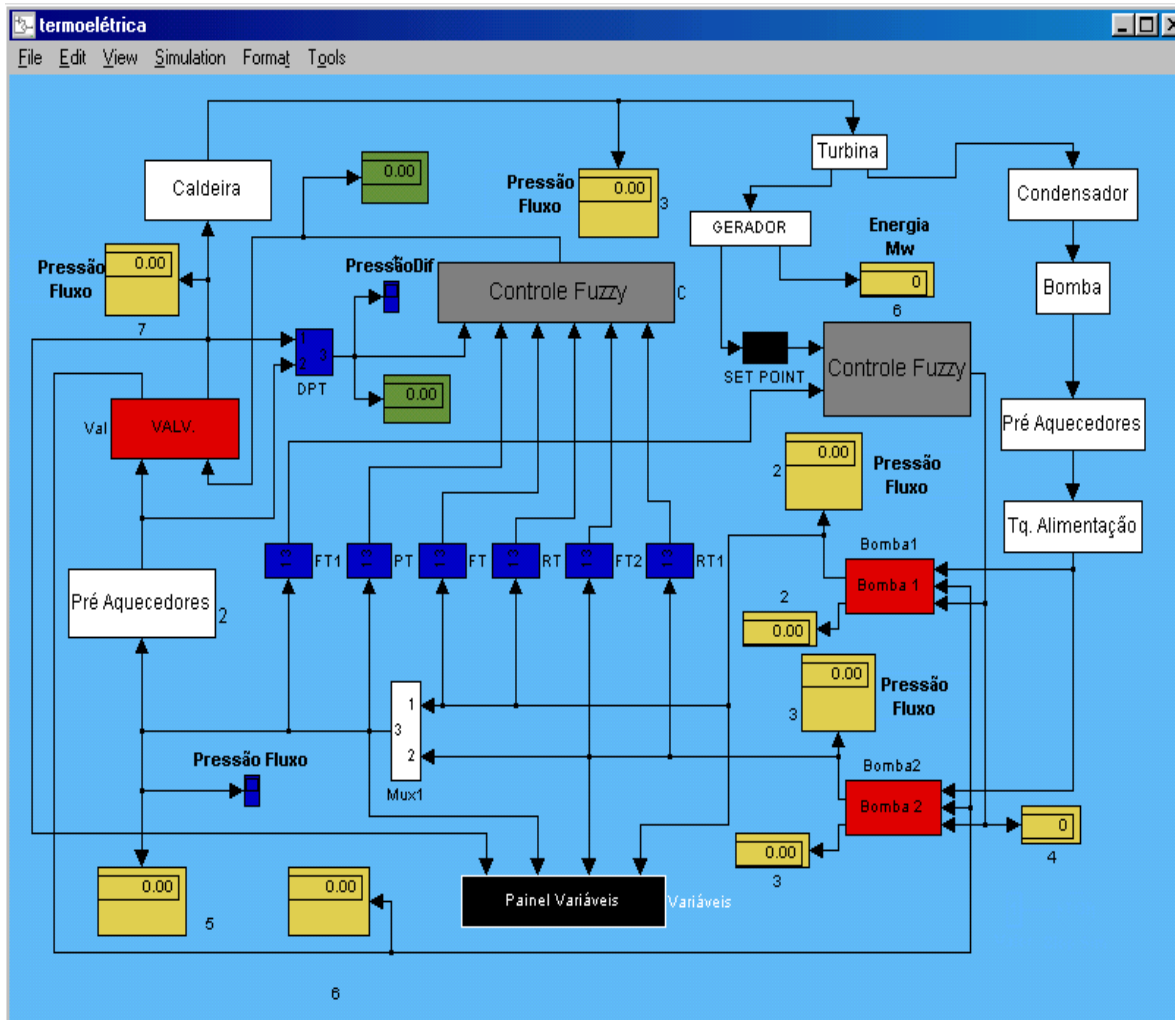


Figura 3.7 Termoelétrica - Primeiro nível do processo modelado no *Simulink*

No item 3.5 deste capítulo foi explicado que a caldeira é alimentada por três bombas, enquanto a Figura 3.7 mostra a modelagem de duas bombas apenas. Isto, porém, não inviabiliza o objetivo do trabalho e tampouco invalida o teste de comportamento do processo. A inclusão da terceira bomba levaria a uma repetição de procedimentos e cálculos, e não traria uma efetiva contribuição para a compreensão do modelo.

Não é de interesse, aqui, detalhar o desenvolvimento matemático das funções implementadas no que diz respeito às deduções de fórmulas e os cálculos. Estes procedimentos, além de extensos, podem ser deduzidos da documentação técnica consultada e das curvas características apresentadas, tanto das bombas de água de alimentação quanto da válvula principal de controle. O objetivo está centrado na filosofia

de implementação. Maiores detalhes podem ser extraídos dos documentos juntados ao Anexo C ou poderão ser baseados no exemplo desenvolvido no Anexo A.

A Figura 3.7 mostra todo o ciclo da água de alimentação, com a inclusão dos controladores difusos e acessórios necessários ao controle e medição tais como transmissores, registradores e indicadores, representando o nível mais externo, ou seja, o primeiro nível do modelo.

Com a finalidade de demonstrar a filosofia de implementação e propiciar meios para um bom entendimento do modelo, é mostrada a seguir uma sequência de abertura de máscaras a partir de um determinado bloco, como por exemplo o bloco da *Bomba1*. Com um duplo *click* do *mouse* no referido bloco um nível mais interno do modelo será aberto, conforme pode ser visualizado na Figura 3.8. Neste nível, ainda não é possível observar as

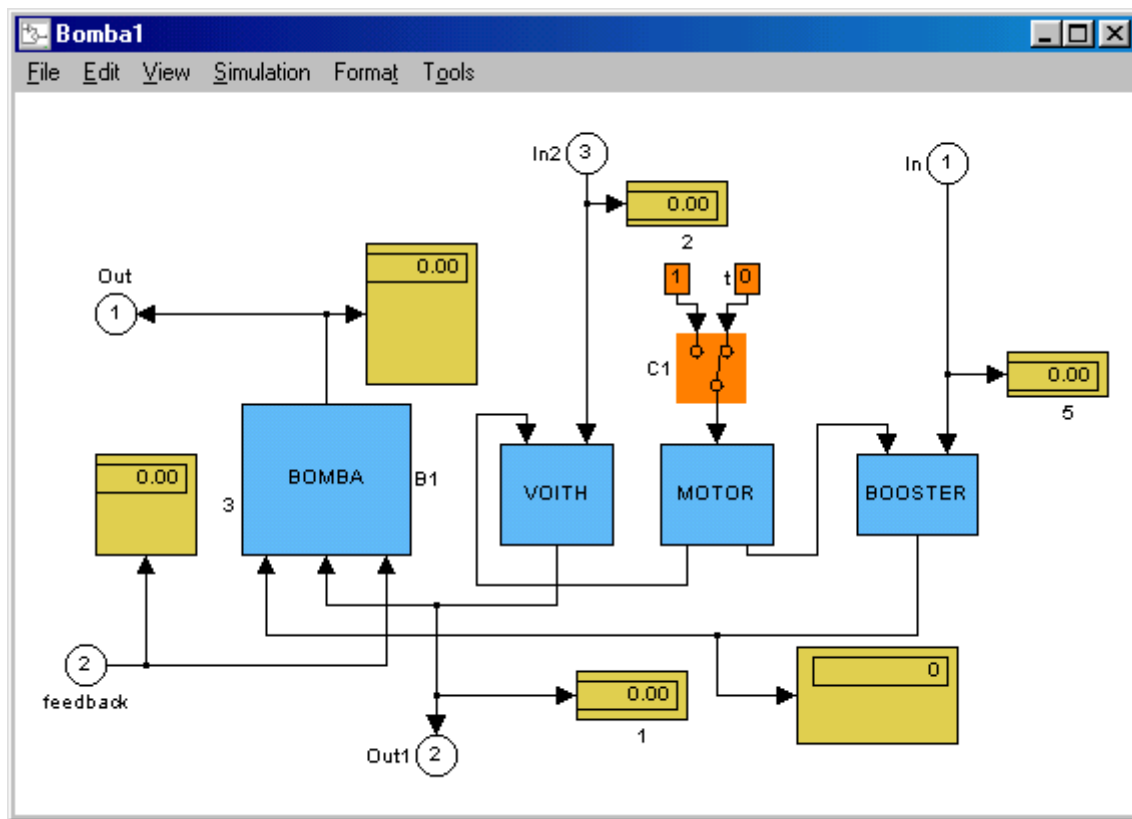


Figura 3.8 Bomba1 - Segundo nível do modelo

funções e os cálculos que representam a modelagem matemática propriamente dita. O que se observa são os componentes básicos da bomba1, tratados e modelados separadamente, indicadores para visualizar valores nos testes de modelagem, ligações com outros blocos e a chave de comando para ligar e desligar a bomba, que é acionada através de uma tela de interface (painel de controle), assunto que será tratado posteriormente, no Capítulo 4.

A Figura 3.9 mostra a abertura da máscara do bloco *Bomba*, num nível ainda mais interno de modelagem. Neste nível, já podem ser observados os indicadores necessários para os testes, interligações e outros blocos a serem abertos. Também aparecem funções de multiplexação, demultiplexação, saturação e valores que são tratados na área de trabalho do simulador para a construção dos gráficos requeridos nas telas de interface da simulação, a ser tratada, como já mencionado, no Capítulo 4.

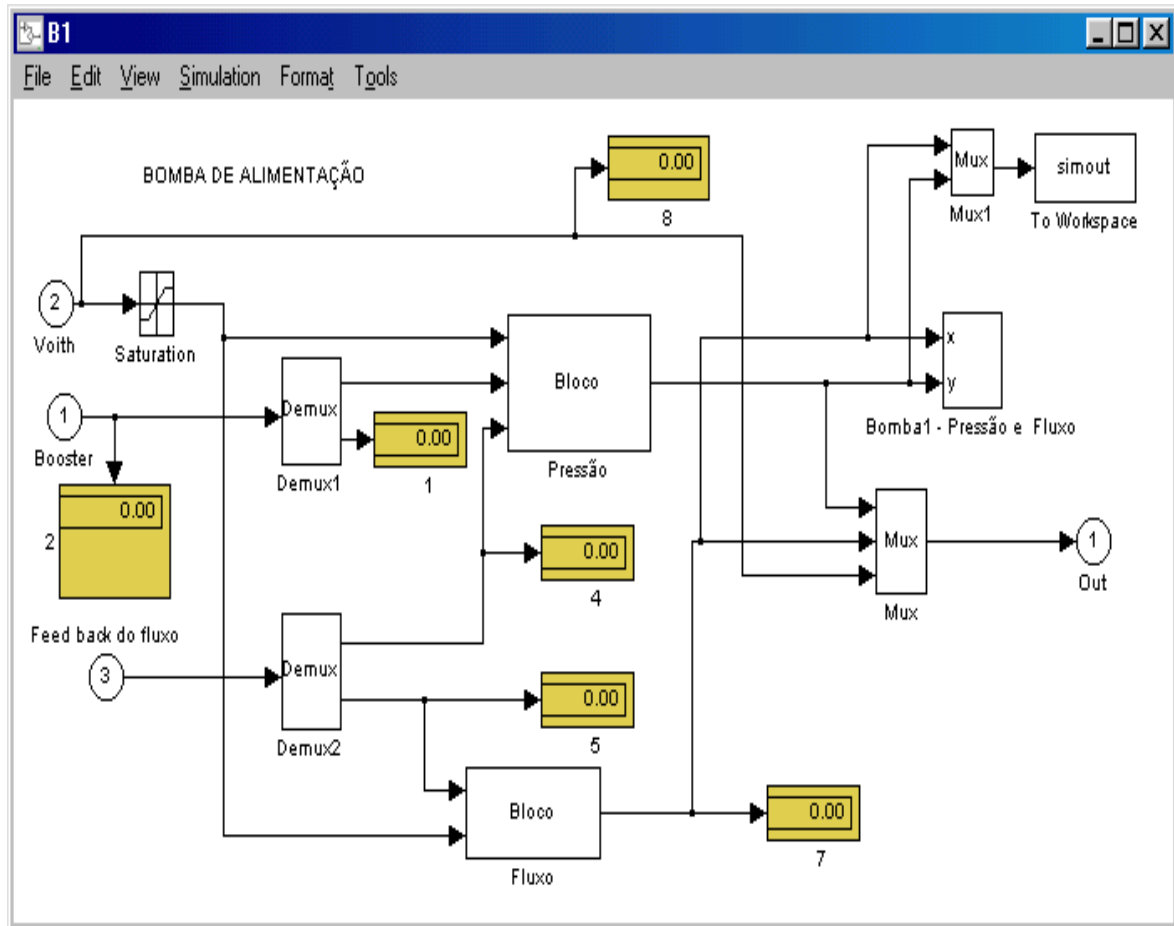


Figura 3.9 Bomba – Terceiro nível do modelo

A sequência escolhida para a demonstração atinge quatro níveis de abertura de máscaras quando, ao clicar na máscara *Bloco (Pressão)* da Figura 3.9, podem ser acompanhados, através da Figura 3.10, alguns cálculos efetivamente efetuados.

A partir dos primeiros blocos do primeiro nível, podem ser necessários mais ou menos níveis de abertura, obviamente seguindo os mesmos procedimentos, dependendo da maior ou menor complexidade dos cálculos e da maior ou menor necessidade de funções.

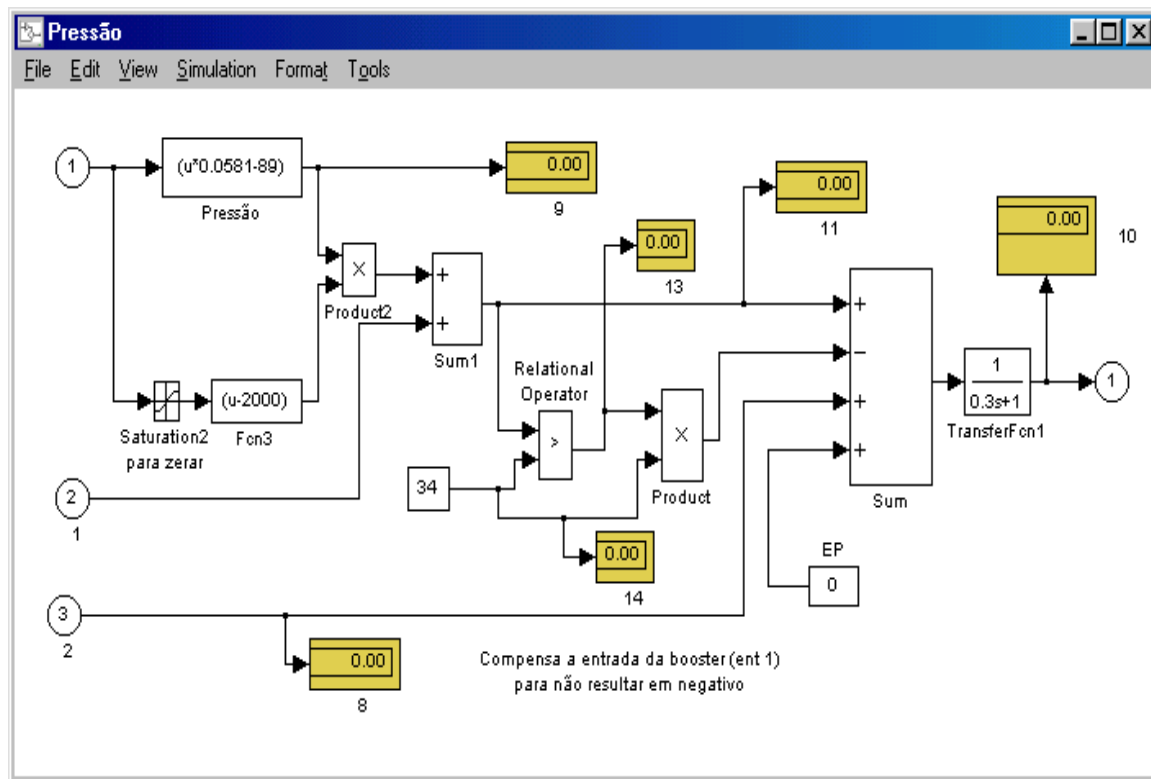


Figura 3.10 Função de transferência de vazão – Último nível do modelo

3.6.3 Modelo Proposto para o Controle do Processo

Conforme citado, para a concepção dos modelos dos controladores difusos, foi utilizada a caixa de ferramentas *Fuzzy* do Matlab 5.2 com controladores do tipo *Mamdani*, pelos motivos expostos no Capítulo 2.

Considerando que o *range* (faixa máxima) do sinal de saída dos instrumentos de medição e de atuação dos elementos finais de controle, tais como a válvula principal de controle e o variador de velocidade da bomba de água de alimentação, deve ser normalizado para uma faixa de 1 a 5, um *Span* (intervalo de trabalho) igual a 4 foi determinado para todas as variáveis.

Desta forma, nas funções de pertinência das variáveis de entrada e de saída dos controladores, seus qualificadores ficaram enquadrados nesta faixa. E pelos motivos definidos no Capítulo 2, as funções usadas são triangulares e trapezoidais.

Por terem apresentado uma performance bastante aceitável, nos controladores difusos concebidos para este trabalho foram utilizados, nas suas funções de pertinência, apenas três grupos na formação dos conjuntos para qualificação das variáveis linguísticas,

tanto para as de entrada (erro e taxa de variação do erro) quanto para as de saída (atuação dos elementos finais de controle).

O erro de controle é a diferença entre o *setpoint* e o valor real da variável controlada. A taxa de variação do erro é determinada pela variação de tempo, em segundos, entre os instantes t e t_1 , e é resultante do desvio entre o *setpoint* e o valor da variável controlada. A Figura 3.11 ilustra a forma para determinar a taxa de variação do erro.

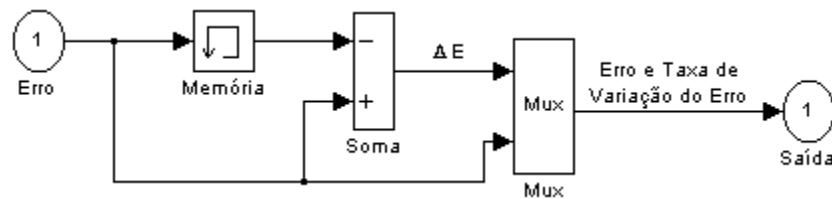


Figura 3.11 Avaliação da taxa de variação do erro

3.6.3.1 Implementação do Controlador de Rotação

Conforme descrito em itens anteriores, a bomba de água de alimentação é um dos principais componentes na modelagem do processo e possui peculiaridades que a diferem da maioria das bombas usadas em processos industriais. Além de se tratar de um equipamento de grande porte, razão para cuidados especiais na sua operação, e de se configurar como um equipamento vital para a produção, exigindo supervisão e controle apurados, é uma bomba de velocidade variável, com limites definidos na relação entre a pressão e a vazão, dados pela sua curva característica. A variação de velocidade das bombas situa-se entre 2000 rpm e 6200 rpm.

A rotação é determinada pelo *setpoint* de vazão de água, que acompanha a carga do turboalternador. Este *setpoint*, portanto, varia em função da potência elétrica requerida pelo sistema. A função do controle de água de alimentação é aumentar ou diminuir a rotação das bombas até obter a vazão desejada.

A função do controlador difuso de rotação é manter o erro em zero e, para isto, deverá responder aos desvios com maior ou menor taxa de variação, no sentido de estabilizar o controle de forma rápida e segura.

A Figura 3.12 mostra a concepção do controlador difuso de rotação e suas variáveis linguísticas: erro (E), variação do erro (VE) e saída para controle de rotação (R).

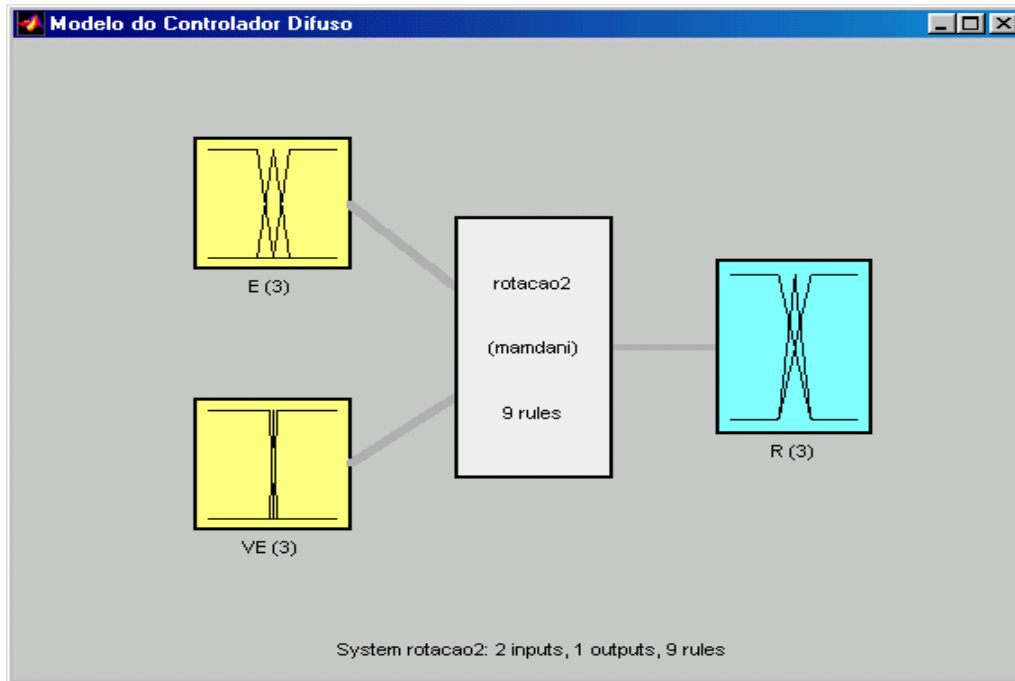


Figura 3.12 Controlador Difuso de rotação

3.6.3.1.1 Funções de Pertinência

Nas funções de pertinência das variáveis E (Figura 3.13) e VE (Figura 3.14), os qualificadores *negativo*, *zero* e *positivo* podem facilmente ser identificados como o comportamento da variável controlada em relação ao ponto pré-determinado para controle (*setpoint*).

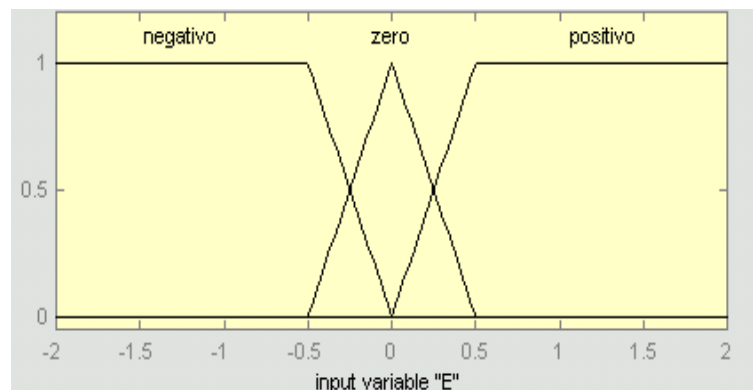


Figura 3.13 Função de pertinência de E (erro) e seus qualificadores

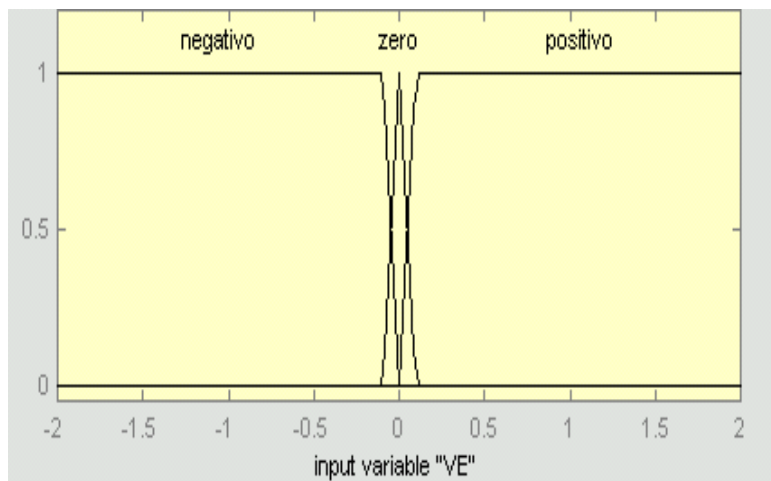


Figura 3.14 Função de pertinência de VE (variação do erro) e seus qualificadores

Na função de pertinência da variável R (Figura 3.15), os qualificadores *baixando*, *nula* e *aumentando* determinam a posição do variador de velocidade (*voith*) em relação a rotação requerida em função do erro.

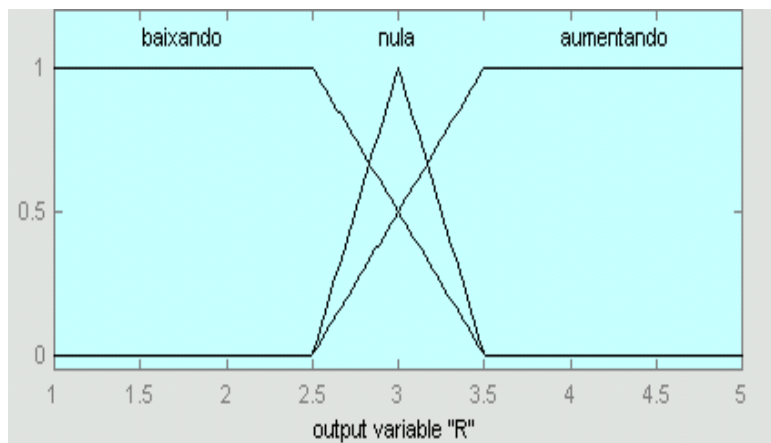


Figura 3.15 Função de pertinência de R (controle de rotação) e seus qualificadores

3.6.3.1.2 Regras do Controlador Difuso de Rotação

Uma vez determinados os conjuntos difusos para o controlador de rotação e suas funções de pertinência com os respectivos qualificadores, foi elaborado um conjunto de nove regras, que define os valores de saída em função do comportamento das variáveis de entrada, como pode ser visualizado na tabela 3.1.

01	If (E is negativo) and (VE is negativo) then (R is baixando)
02	If (E is negativo) and (VE is zero) then (R is baixando)
03	If (E is negativo) and (VE is positivo) then (R is nula)
04	If (E is zero) and (VE is negativo) then (R is baixando)
05	If (E is zero) and (VE is zero) then (R is nula)
06	If (E is zero) and (VE is positivo) then (R is aumentando)
07	If (E is positivo) and (VE is negativo) then (R is nula)
08	If (E is positivo) and (VE is zero) then (R is aumentando)
09	If (E is positivo) and (VE is positivo) then (R is aumentando)

Tabela 3.1 Conjunto de regras do controlador de rotação

3.6.3.1.3 Processamento Difuso

Para explicar melhor o processamento em um sistema difuso, seguindo o raciocínio descrito no item 2.6.2 do Capítulo 2, foi desenvolvido o seguinte exemplo:

Admitindo-se um erro de -0.20 a uma taxa de variação de 0.00 .

- *Fuzzificação*

De acordo com as funções de pertinência de E (erro) e de VE (variação do erro) e seus qualificadores, pode-se concluir que um erro de -0.20 implica em um erro *negativo* com grau 0.40 e um erro *zero* com grau 0.60 , conforme pode ser visualizado através da Figura 3.16.

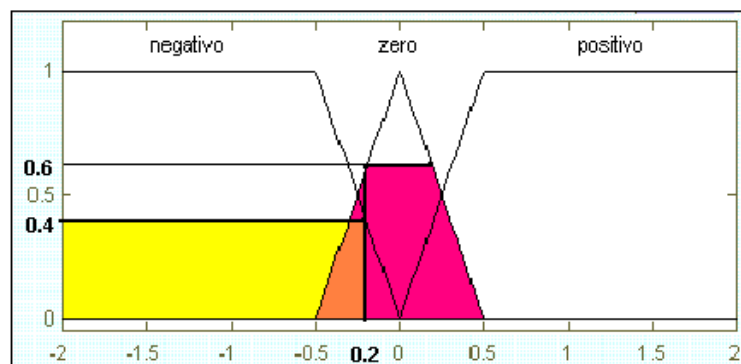


Figura 3.16 Fuzzificação de E (erro) - *Negativo(0.60)*, *zero(0.40)*

Na mesma Figura 3.16, pode-se verificar que para a fuzzificação da variação do erro, sendo este 0.00, fica evidente que isto representa para esta variável difusa, *zero* com grau 1.00, ou seja, para a variação do erro, *zero(1.00)*.

- *Avaliação das regras*

Na fuzzificação foram obtidos para *E* um erro *negativo(0.40)*, um erro *zero(0.60)* e para *VE* um erro *zero(1.00)*.

Utilizando o operador mínimo (Min), a variação do erro *zero(1.00)* é descartado e os válidos são:

Grau de contribuição do erro *negativo(0.40)*

Grau de contribuição do erro *zero(0.60)*

E, analisando o conjunto de regras, conclui-se que as regras válidas são a número 2 e a número 5.

2 - *If (E is negativo) and (VE is zero) then (R is baixando)*

5 - *If (E is zero) and (VE is zero) then (R is nula)*

resultando em duas saídas:

Saída(2) = baixando(0.40)

Saída(5) = nula(0.60)

O resultado é dado pelo operador máximo (Max).

Resultado = Max(Saída(i))

Resultado = Max(baixando(0.40), nula(0.60))

Resultado = baixando(0.40)

Como neste exemplo há apenas uma saída para cada qualificador, não será possível visualizar. Mas, supondo uma outra saída *baixando(0.80)*, por exemplo, esta seria a válida.

- *Defuzzificação*

Utilizando o método do cálculo do centro de área [MAZZUCCO, 1997], dado por

$$\Delta U = \frac{\sum_{j=1}^n F(\Delta U_j) \Delta j}{\sum_{j=1}^n F(\Delta U_j)}$$

e, tomando equidistantemente os pontos ao longo de $\Delta U, \Delta U(j)$, obtém-se:



$$\Delta U = 4.60 / 2.20 = 2.09$$

O resultado, teórico, da defuzzificação é 2.09, sendo este o sinal de saída do controlador de rotação para o variador de velocidade da bomba de água de alimentação, ou seja, o cálculo do centro de área da Figura 3.17.

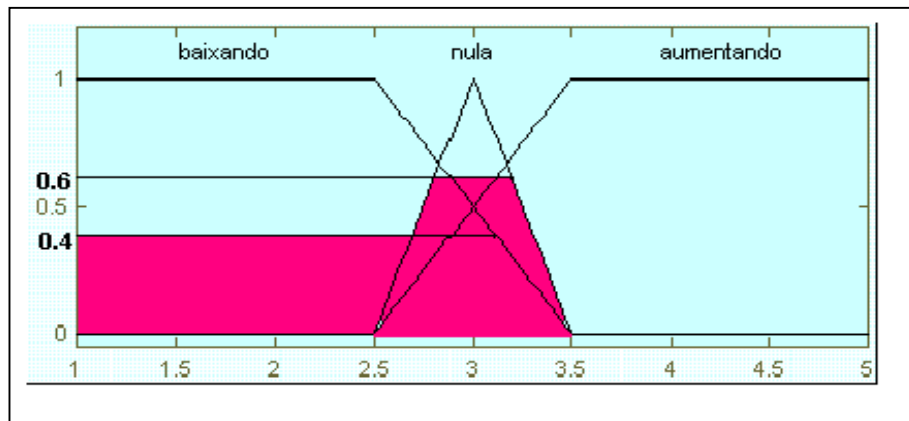


Figura 3.17 Saída do controlador de rotação para um erro de 0.20

3.6.3.2 Implementação do Controlador de Pressão Diferencial e Curva Limite

Na concepção do controlador de rotação, descrito no item anterior, a base de regras contempla apenas o controle de rotação em função da demanda de carga. Entretanto, é sabido e já frisado que há necessidade de manter a bomba de água de alimentação dentro dos limites da sua curva característica.

Como explicado no item 3.5, referente à descrição da definição do problema, em condições normais de operação, ou seja, sem distúrbios bruscos, a pressão diferencial na válvula deve ser controlada. Porém, nas situações extremas de instabilidade, a vazão e a pressão na bomba podem ser aproximar dos limites estabelecidos pela curva. Nestas ocasiões, o controlador de pressão diferencial e curva limite deve abandonar o controle da

pressão diferencial e agir sobre a válvula de modo a controlar a vazão e a pressão da bomba dentro dos limites, garantindo que o sistema de proteção não desligue a bomba e, por consequência, não haja redução de produção além do necessário.

Faz-se necessário, então, um sistema de controle diferenciado do anterior, que obedecia ao comando de um *setpoint*. Neste caso, as variáveis devem ser continuamente calculadas e comparadas com os parâmetros das curvas limites. Os qualificadores das funções de pertinência das variáveis e a base de regras se encarregam destas tarefas.

A Figura 3.18 mostra a concepção do controlador difuso de pressão diferencial e curva limite e suas variáveis lingüísticas.

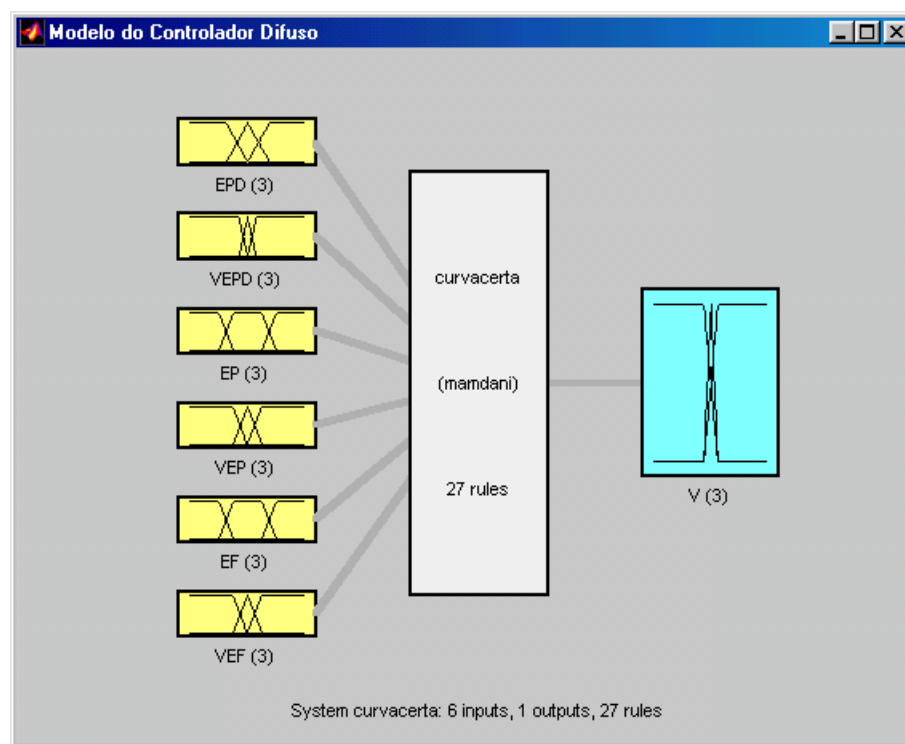


Figura 3.18 Controlador Difuso de pressão diferencial e curva limite

As variáveis de entrada *EPD* (erro de pressão diferencial) e *VEPD* (variação do erro de pressão diferencial) são as variáveis controladas nas situações normais, isto é, nas situações em que a bomba está funcionando dentro dos limites da curva.

As variáveis de entrada *EP* (erro de pressão), *VEP* (variação do erro de pressão), *EF* (erro de vazão) e *VEF* (variação do erro de vazão) estão relacionadas com a curva limite da bomba, a qual devem controlar nas situações críticas.

A variável de saída *V* (sinal para o atuador da válvula de controle) responde, evidentemente, ao disparo das regras para as situações exigidas de controle.

3.6.3.2.1 Funções de Pertinência

Nas funções de Pertinência das variáveis *EPD* (Figura 3.19) e *VEPD* (Figura 3.20) os qualificadores *negativo*, *zero* e *positivo* correspondem ao comportamento com relação à posição da variável pressão diferencial em função do valor definido para controle (em torno de 6 bar).

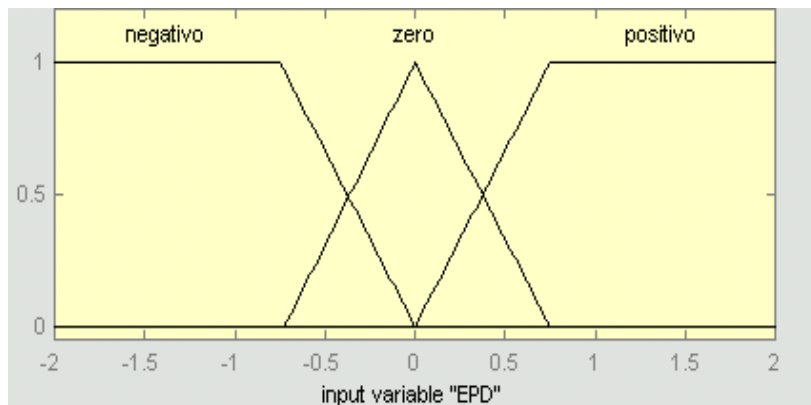


Figura 3.19 Função de pertinência de EPD e seus qualificadores

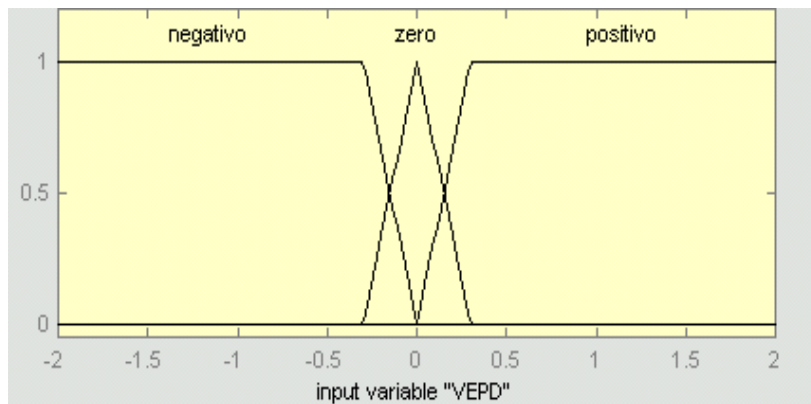


Figura 3.20 Função de pertinência de VEPD e seus qualificadores

Pode-se observar na Figura 3.21 que nas funções de pertinência das variáveis *EF* e *EP* foram usadas, diferentemente das outras, somente funções trapezoidais para seus qualificadores *Fbaixo*, *Fnormal*, *Falto*, *Pbaixo*, *Pnormal* e *Palto* em função da faixa de operação de pressão e vazão determinadas pelos parâmetros da curva limite. Por exemplo, para os qualificadores *Fnormal* e *Pnormal*, o grau de pertinência é 1.00 na faixa de -0.5 até 0.5 traduzidas como condições satisfatórias de vazão e de pressão da bomba. Já as funções de pertinência das variáveis *VEF* e *VEP* (Figura 3.22) que medem

as taxas de variação do erro de vazão e pressão, respectivamente, seguem os mesmos padrões das outras variáveis.

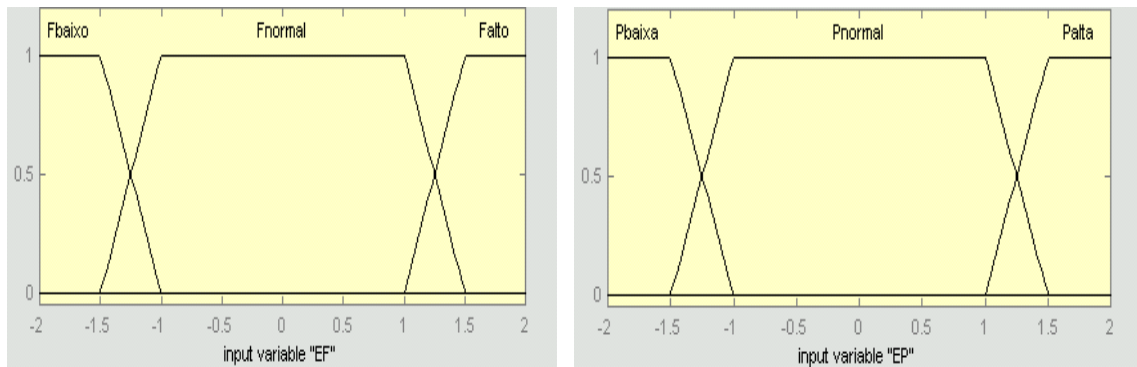


Figura 3.21 Funções de pertinência de EF e EP e seus qualificadores

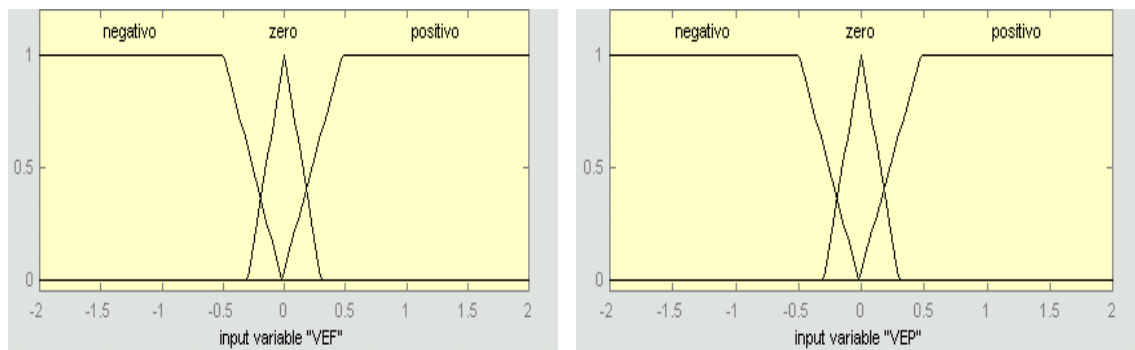


Figura 3.22 Funções de pertinência de VEF e VEP e seus qualificadores

A função de pertinência da variável V (Figura 3.23), os qualificadores *fechando*, *zero* e *abrindo* determinam a posição da válvula de controle principal com relação às necessidades de controle, ou da pressão diferencial da própria válvula ou da curva limite.

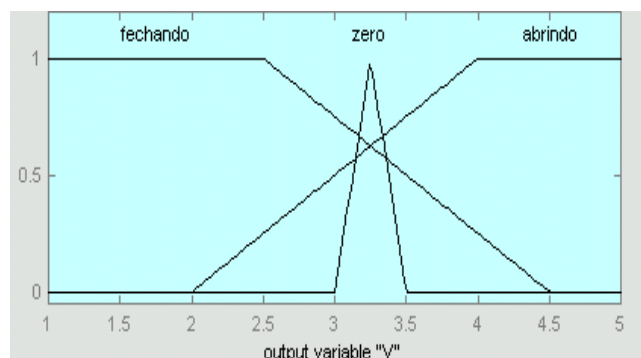


Figura 3.23 Função de pertinência de V e seus qualificadores

3.6.3.2.2 Regras do Controlador Difuso de Pressão Diferencial e Curva Limite

Definidos os conjuntos difusos para o controlador de pressão diferencial e curva limite e as funções de pertinência com seus qualificadores, um conjunto de 21 regras foi elaborado. As nove primeiras regras são responsáveis pelo controle de pressão diferencial, $EP = Pnormal$ e $EF = Fnormal$, sendo que as demais regras são para o controle da curva limite da bomba.

A tabela 3.2 mostra o conjunto de regras elaboradas para este controlador.

01	If (EPD is negativo) and (VEPD is negativo) and (EP is Pnormal) and (EF is Fnormal) then (V is fechando)
02	If (EPD is negativo) and (VEPD is zero) and (EP is Pnormal) and (EF is Fnormal) then (V is fechando)
03	If (EPD is negativo) and (VEPD is positivo) and (EP is Pnormal) and (EF is Fnormal) then (V is zero)
04	If (EPD is zero) and (VEPD is negativo) and (EP is Pnormal) and (EF is Fnormal) then (V is fechando)
05	If (EPD is zero) and (VEPD is zero) and (EP is Pnormal) and (EF is Fnormal) then (V is zero)
06	If (EPD is zero) and (VEPD is positivo) and (EP is Pnormal) and (EF is Fnormal) then (V is abrindo)
07	If (EPD is positivo) and (VEPD is negativo) and (EP is Pnormal) and (EF is Fnormal) then (V is zero)
08	If (EPD is positivo) and (VEPD is zero) and (EP is Pnormal) and (EF is Fnormal) then (V is abrindo)
09	If (EPD is negativo) and (VEPD is positivo) and (EP is Pnormal) and (EF is Fnormal) then (V is abrindo)
10	If (EP is Pbaixa) and (VEP is negativo) then (V is fechando)
11	If (EP is Pbaixa) and (VEP is zero) then (V is fechando)
12	If (EP is Pbaixa) and (VEP is positivo) then (V is zero)
13	If (EP is Palta) and (VEP is negativo) then (V is zero)
14	If (EP is Palta) and (VEP is zero) then (V is abrindo)
15	If (EP is Palta) and (VEP is positivo) then (V is abrindo)
16	If (EF is Fbaixo) and (VEF is negativo) then (V is abrindo)
17	If (EF is Fbaixo) and (VEF is zero) then (V is abrindo)
18	If (EF is Fbaixo) and (VEF is positivo) then (V is zero)
19	If (EF is Falto) and (VEF is negativo) then (V is zero)
20	If (EF is Falto) and (VEF is zero) then (V is fechando)
21	If (EF is Falto) and (VEF is positivo) then (V is fechando)

Tabela 3.2 Conjunto de regras do controlador de pressão diferencial e curva limite

3.7 Necessidades para a Implementação do Sistema

Para a implementação do sistema desenvolvido neste trabalho para o controle das bombas de água de alimentação da caldeira de uma usina termelétrica, serão necessários transdutores para a medição das variáveis, um módulo programado ou um microcomputador e placas de interface A/D e D/A compatíveis com os sinais de entrada e saída dos equipamentos, além de instrumentos de medição e controle.

A tabela 3.3 mostra a lista destes equipamentos com as suas respectivas funções.

Equipamento	Função
Transmissores de pressão	Converter pressão em sinal padrão
Transmissores de vazão	Converter vazão em sinal padrão
Transmissor de pressão diferencial	Converter diferença de pressão em sinal padrão
Transmissores de rotação	Converter rotação em sinal padrão
Módulo programado ou microcomputador	Abrigar o sistema e controladores difusos
Placa A/D	Converter os sinais analógicos em sinais digitais
Placa D/A	Converter os sinais digitais em sinais analógicos

Tabela 3.3 Lista de equipamentos necessários para a implementação do sistema

Os transmissores são os elementos que, ligados diretamente ao processo, recebem sinais de sensores ou de linhas de impulso, realizam os processamentos necessários e fornecem sinais padrão de saída, analógicos ou digitais, para posterior processamento. O sinal padrão de saída dos instrumentos do processo estudado é 1 a 5 Volts.

As saídas analógicas dos transmissores serão conectadas às portas do conversor A/D e convertidos em sinais digitais que servirão como entrada para os controladores difusos que já estão preparados para receber sinais com *span* de valor 4, igual ao dos instrumentos utilizados. As saídas dos controladores difusos serão convertidos em sinais analógicos na faixa de 1 a 5 Volts pelo conversor D/A e enviados aos elementos finais de controle, ou seja, a válvula principal e os variadores de velocidade das bombas (*Voith*).

Um esquema de montagem para a implementação do sistema está ilustrado na Figura 3.24

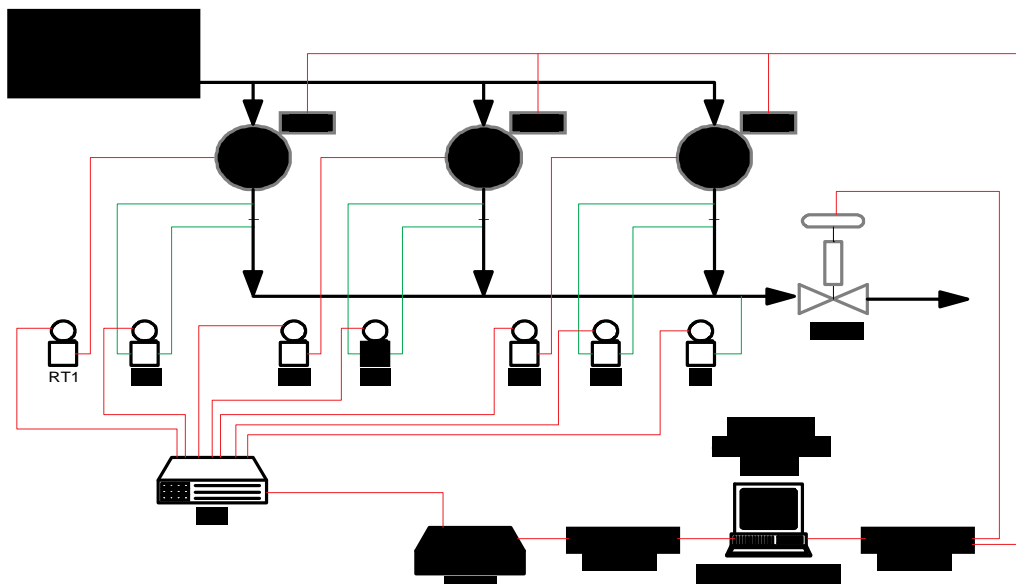


Figura 3.24 Esquema de montagem para implantação do sistema de controle das bombas

Capítulo 4 Resultados Obtidos

4.1 Introdução

Este capítulo é destinado a apresentação dos testes para verificação da eficácia do modelo frente a algumas situações operacionais, bem como da análise do comportamento do sistema quando submetido a tais situações. A fim de propiciar uma melhor avaliação dos resultados, algumas situações reais, ilustradas por gráficos com registros da medição da vazão de água de alimentação da caldeira e pressão antes e após válvula de água de alimentação, servirão como base para comparação com a situação simulada.

Em primeiro lugar serão mostradas manobras operacionais normais, tais como as de partida, elevação de geração e desligamentos intencionais das bombas, com o intuito de analisar o desempenho do controlador difuso de rotação.

Na sequência, manobras operacionais bruscas e simulação de *Run-back* (ocasionado pela perda de equipamentos vitais da planta) serão consideradas de forma a permitir a análise da performance do controlador difuso de pressão diferencial e curva limite.

4.2 Resultados e Análises

De modo a oferecer uma visão clara e objetiva da ação dos controladores diante dos distúrbios e desvios do processo modelado, serão desenvolvidas duas sequências de testes: na primeira, o controlador de rotação será o foco das análises e, na segunda, será focalizado o controlador de pressão diferencial e curva limite.

4.2.1 Controle de Rotação

Já foi visto que este sistema tem a função de controlar a rotação das bombas para manter a vazão de água necessária, determinada pelo sinal de *setpoint* de carga da unidade. Portanto, a sequência de manobras que será vista a seguir servirá para demonstrar o desempenho do controlador de rotação e sua habilidade em executar a tarefa de aumentar ou diminuir a velocidade das bombas de água de alimentação no sentido de manter com a

máxima segurança, em quaisquer condições operacionais, o volume de água requerido para uma dada carga.

Na Figura 4.1 podem ser visualizados, juntamente com a tela de interface (que simula o console do painel de controle das bombas), os gráficos dos registradores de monitoração de pressão diferencial, válvula, pressão/vazão e rotação.

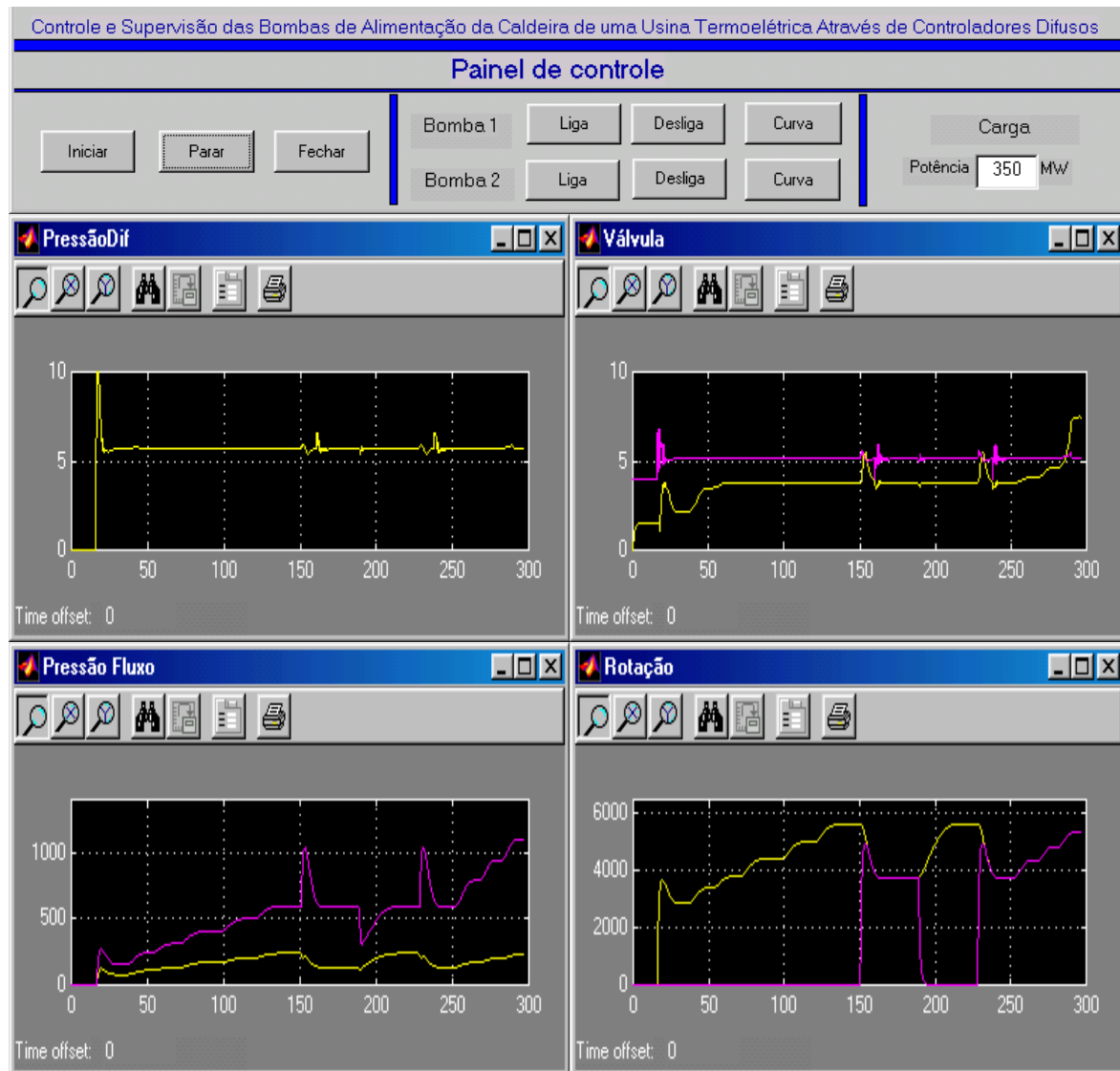


Figura 4.1 Sequência de testes do controlador de rotação

Com o objetivo de propiciar uma melhor compreensão em relação aos gráficos dos registradores da Figura 4.1, é importante detalhar cada um deles, de modo a garantir a correta interpretação dos resultados da simulação e um acompanhamento mais claro das análises que serão feitas.

- *Registrador de pressão diferencial*

Para uma pressão diferencial que deve ser controlada em torno de 6 bar, pode ser adotada uma escala de 0 a 10, apesar de que a pressão possa atingir valores mais elevados. No entanto, nestas ocasiões, o valor da pressão diferencial é desprezado por outras prioridades de controle, como visto no Capítulo 3.

- *Registrador de ações da válvula de controle*

Neste registrador podem ser percebidos dois canais de registro, onde o de cor amarela corresponde à posição da válvula de controle, em percentagem (a escala de 0 a 10 deve ser interpretada como 0 a 100% de abertura) e o de cor rosa corresponde ao comportamento da válvula em resposta às solicitações do controlador (em relação ao erro de controle). A indicação de 50% no registrador não deve ser interpretada como o valor de saída do controlador, cuja escala é de 1 a 5, mas sim uma cômoda visualização de sua ação.

- *Registrador de pressão e vazão*

O uso de registradores de dois canais facilita a observação das oscilações de variáveis com unidades e amplitudes diferentes, porém ligadas dinamicamente em relação aos desvios do processo. É o caso do registrador de vazão e pressão, no qual a pressão (registro de cor amarela) é medida bem abaixo do meio da escala devido a sua faixa de medição, que é de 0 a 250 bar, inserida num registrador cuja escala é de 0 a 1400. Esta escala, de 0 a 1400, é compatível com a medição de vazão (registro de cor rosa) que varia entre 0 e 1200 m³/h.

- *Registrador de rotação*

Este registrador, com faixa de medição de 0 a 6000, também de dois canais, registra a rotação das duas bombas, que varia entre 0 e 5200 rpm. O registro de cor amarela corresponde à medição de rotação da bomba 1 e o de cor rosa à da bomba 2.

O teste, como pode ser visto na Figura 4.1, foi iniciado com as duas bombas desligadas. O *setpoint* de carga foi fixado em 50 MW, correspondente à uma vazão de

aproximadamente $160 \text{ m}^3/\text{h}$. No tempo 15, a bomba 1 foi ligada. É razoável que nos períodos de partida haja uma certa instabilidade, bastante semelhante a ocorrida naquele instante da simulação, o que pode ser percebido com todas as variáveis envolvidas. Entretanto, no tempo 25 o valor desejado de vazão foi alcançado sem grandes oscilações no controle, por conta da ação do controlador de rotação.

A partir do tempo 40 e até o tempo 125, foi iniciada a elevação gradativa de geração, variando-se o *setpoint* para 80, 100, 130, 160 e 190 MW, correspondentes a vazões solicitados de 250, 315, 410, 500 e $600 \text{ m}^3/\text{h}$, respectivamente. Estas solicitações são prontamente atendidas pelo controle de rotação, como pode ser percebido pelos valores de vazão e, conseqüentemente, da pressão, sem provocar distúrbios no sistema. É possível perceber também, que nestas condições operacionais normais, as bombas são capazes de suprir a demanda de água sem dificuldade, enquanto a válvula de controle apenas segue o programa de variação de carga.

A geração máxima que uma só bomba pode sustentar gira em torno de 190 MW, razão porque, no instante 150, foi ligada a bomba 2. Imediatamente, o controle reduz a rotação da bomba 1, em consequência da subida de rotação da bomba 2. Em pouco tempo, as duas bombas entram em equilíbrio, suprindo vazões de água da mesma ordem. Estas ações podem ser vistas no registrador de rotação da Figura 4.1, através de dois sinais de medição sobrepostos. Esta é uma manobra operacional que causa impacto no processo, e por isso trouxe algumas consequências transitórias para o sistema. Pode-se observar, nos respectivos registradores, as variações de vazão e de pressão, que chegaram a interferir no controle da válvula principal para conter os desvios. A interferência na válvula de controle sacrificou o controle da pressão diferencial, mas garantiu, como se pretendia, a continuidade operacional do sistema, sem risco de perda de quaisquer das bombas.

No tempo 190 foi desligada a bomba 2, mas a perturbação provocada no sistema não chegou a comprometer a estabilidade nem a confiabilidade operacional da unidade. O impacto foi bem menor do que a situação anterior.

No tempo 230 a bomba 2 foi novamente ligada, e os resultados foram semelhantes aos observados a partir do tempo 150 (quando a mesma bomba tinha sido ligada e após desligada).

É relevante observar que nestas manobras, independentes das inevitáveis oscilações transitórias, a vazão de água necessária (em torno de $600 \text{ m}^3/\text{h}$ para uma carga de 190 MW) foi mantida satisfatoriamente por ação do controle de rotação.

Na sequência, foi retomada a elevação de geração, a partir do tempo 255, para 250, 300 e 350 MW, que demandam vazões respectivas de, aproximadamente, 790, 945 e 1100 m³/h. À partir daí, a válvula de controle foi se reposicionando, aumentando a abertura para manter o controle da pressão diferencial em 6 bar.

A Figura 4.2 mostra uma situação real de instabilidade da unidade com a elevação e redução acelerada da geração. O registro de cor vermelha da Figura 4.2a corresponde a vazão de água de alimentação para a caldeira seguindo a exigência de geração requerida. Através da Figura 4.2b é possível perceber que o sistema de controle não mantém o controle da pressão diferencial em 6 bar neste período de instabilidade. O range de medição das duas pressões é de 0 à 400 bar. Transferindo a escala do registrador para o range de medição destas variáveis a cada instante, constata-se que a pressão diferencial sofreu variações de 0 à aproximadamente 30 bar neste período. Entretanto, a vazão de água de alimentação para a caldeira foi prontamente atendida pelo controle de rotação das bombas de água de alimentação, sem distúrbios significativos no restante do sistema.

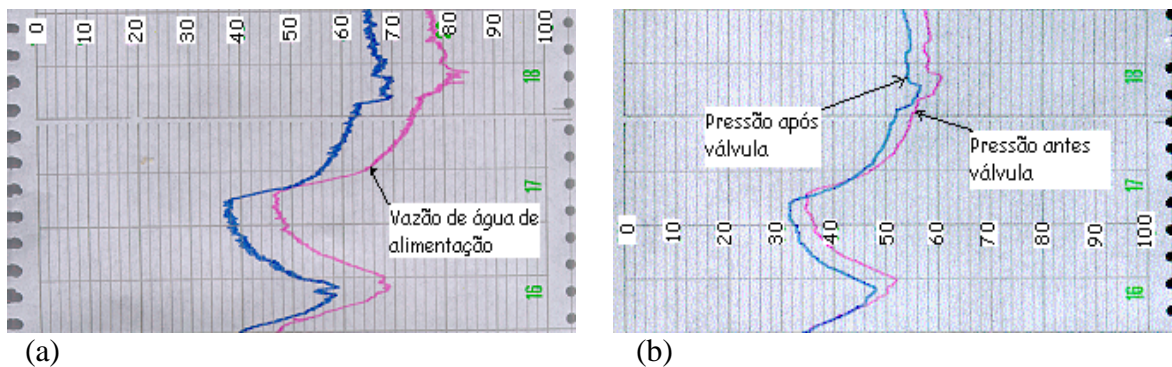


Figura 4.2 Vazão de água de alimentação e pressão diferencial através da válvula de controle numa situação real de elevação e redução acelerada da geração

Uma situação semelhante pode ser simulada através do modelo (Figura 4.3), na qual pode-se perceber que a pressão diferencial se mantém controlada em torno de 6 bar.

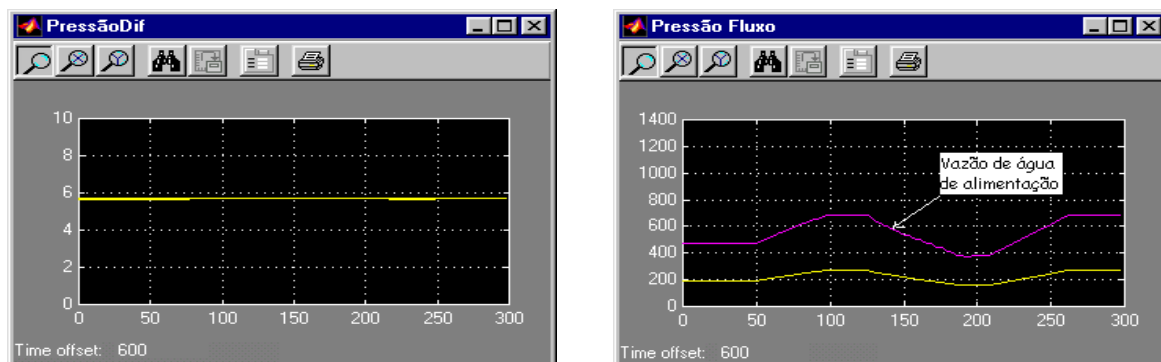


Figura 4.3 Simulação de elevação e redução acelerada da geração

4.2.2 Controle de Pressão Diferencial e Curva Limite

A função deste controle, conforme visto no capítulo anterior, é a de manter a pressão diferencial através da válvula principal em torno de 6 bar, em regime de operação normal. Nas situações de emergência, o controle deve agir sobre a válvula no sentido de assegurar, com a máxima rapidez, que os parâmetros de trabalho das bombas se mantenham dentro dos limites definidos pelas curvas de sobrecarga.

Na sequência de manobras seguintes, mostrada na Figura 4.4, serão enfatizadas as ocasiões nas quais o controlador agirá para manter os parâmetros das bombas dentro dos limites, em detrimento do controle da pressão diferencial.

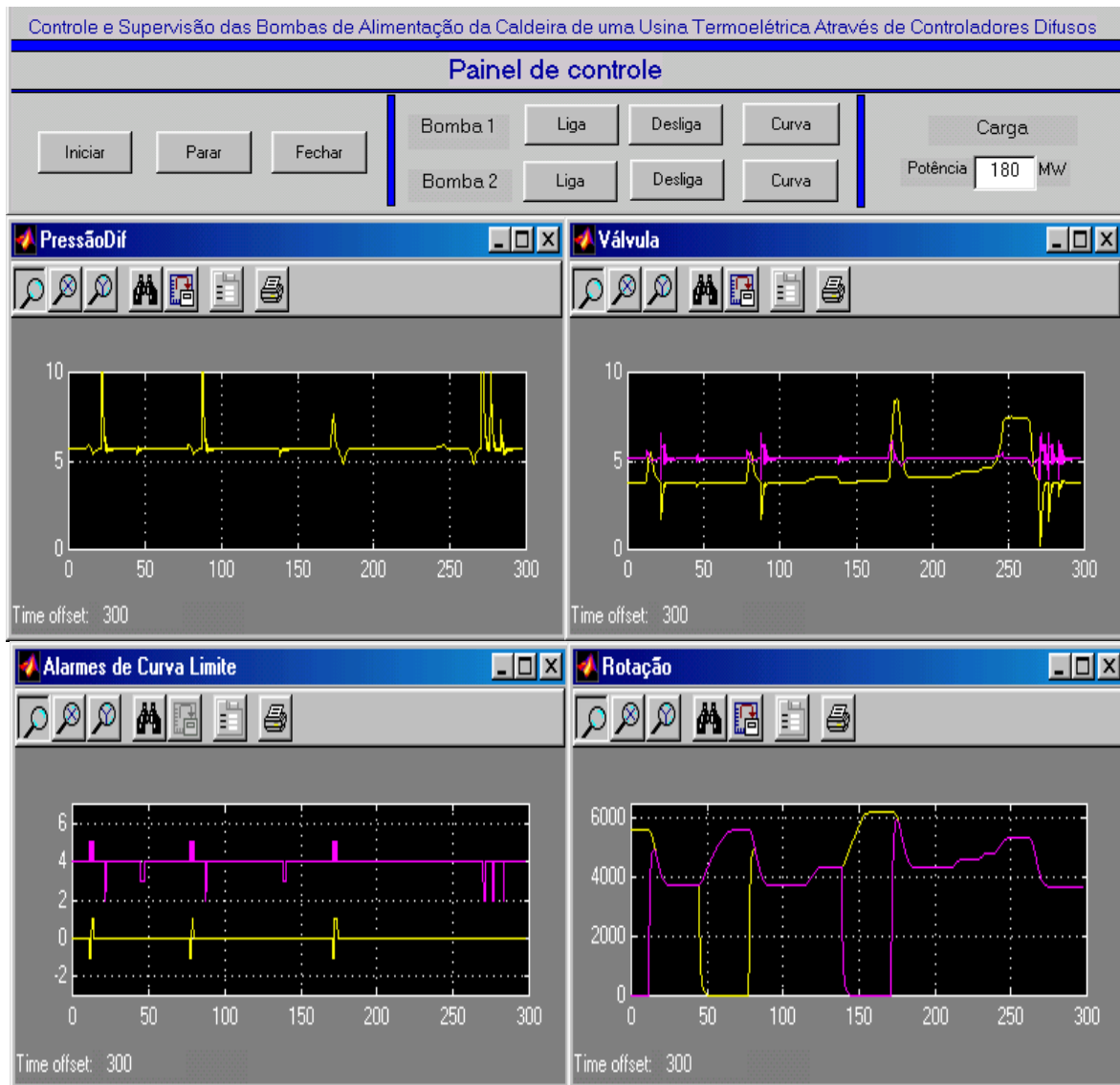


Figura 4.4 Sequência de testes do controlador de pressão diferencial e curva limite

A exemplo do apresentado no item anterior, vê-se o painel de controle e três registradores, identificados por *pressão diferencial*, *válvula* e *rotação*, além do registrador de alarme de curva limite das bombas. Este registrador, também de dois canais, fornece uma indicação de aproximação dos valores de vazão e pressão e dos limites da curva. O registro de cor amarela corresponde ao alarme de vazão e o de cor rosa ao alarme de pressão. Neste registrador, a escala e os valores registrados não representam os valores reais das variáveis, mas apenas valores convenientes para facilitar a compreensão das análises feitas e uma forma também conveniente de registrar os eventos. Vale ressaltar que a atuação dos alarmes já é uma situação crítica e que a não atuação destes não significa que o controle não vá reagir quando vazão e pressão estiverem se aproximando ou indo em direção dos limites.

A simulação foi iniciada com a bomba 1 ligada, com uma carga de 190 MW. No tempo 10 a bomba 2 foi ligada, provocando a atuação dos alarmes de pressão e vazão, exigindo, até o tempo 30, a movimentação da válvula de controle no sentido de recolocar estas variáveis dentro dos limites permitidos pela curva. Nota-se, neste intervalo, que o controle da pressão diferencial foi sacrificado.

No tempo 45 procedeu-se o desligamento da bomba1, ocorrendo o alarme de pressão por um breve instante, quando se pode perceber, também, uma pequena variação na abertura válvula de controle e, conseqüentemente, na pressão diferencial, mas sem maiores conseqüências. O resultado satisfatório obtido é decorrente da ação do controlador de rotação, que assume rapidamente a responsabilidade de repor vazão para seguir o *setpoint* de carga.

No tempo 80 foi religada a bomba 1, causando novos transtornos para o controle e obrigando-o a intervir na posição da válvula até o tempo 95, em decorrência dos desvios causados nos valores de vazão e pressão em relação à curva, fato que pode ser verificado no registrador de alarme de curva limite.

No tempo 115 a carga foi elevada para 250 MW e no tempo 140 foi desligada a bomba 2, sem grandes oscilações no controle, como já observado.

Já com carga mais alta, pode-se observar, ao se religar a bomba 2 (tempo 170) a ocorrência de alarme de vazão e de pressão. A reação do controle comanda a imediata abertura da válvula, enquanto as rotações das duas bombas ainda estavam altas, para recolocá-las nos limites desejados.

A partir do tempo 210 foi reiniciada a elevação da geração até o limite de 350 MW. Com o processo estabilizado, procedeu-se, no tempo 265, a simulação de uma situação de

runback, ou seja, uma redução forçada de geração em torno de 50% do valor nominal. O alarme de pressão atua e o controle da válvula comuta imediatamente de pressão diferencial para curva limite. Durante o período em que a relação pressão x vazão caminha além da curva de alarme, o controle se ocupa apenas em ajustar estes valores, fato que pode ser observado nas reações da válvula de controle e nas variações acentuadas da sua pressão diferencial.

Esta seqüência de testes vem demonstrar que o controlador de pressão diferencial e de sobrecarga das bombas funciona de forma eficiente, cumprindo bem o seu papel, especialmente quando o sistema é submetido a manobras operacionais de partida-parada das bombas e, principalmente, quando da ocorrência de paradas forçadas e/ou intempestivas.

A seguir são mostrados os registros de dois eventos reais, com o intuito de propiciar alguns parâmetros de comparação entre a ação do sistema de controle instalado, com a do sistema de controle proposto nas situações simuladas semelhantes.

A Figura 4.5 ilustra a elevação da geração (os registros de cor vermelha e azul correspondem a vazão de água de alimentação para a caldeira e vazão de vapor para a turbina, respectivamente) desde 16,30hs até aproximadamente 18,15hs, ocasião em que houve o desligamento inesperado de uma das bombas de água de alimentação e a perda da unidade por sobrecarga (curva limite) das outras duas bombas. Foi constatado pelo boletim de ocorrências de operação que o operador não obteve êxito em sua intervenção.

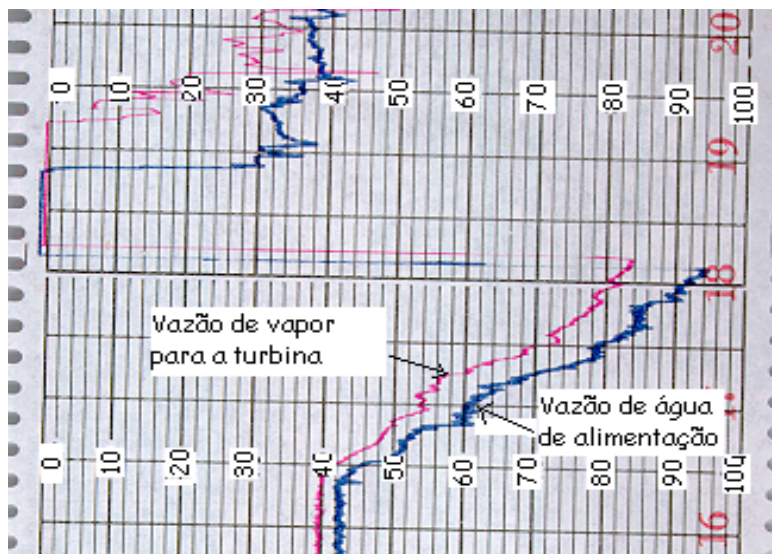


Figura 4.5 Registro de ocorrência real de perda da unidade por desligamento inesperado de uma das bombas de água de alimentação

Uma situação na qual o auxílio do operador foi fundamental na manutenção da geração sem oscilações expressivas no sistema, pode ser vista através da Figura 4.6. O boletim de ocorrências de operação registra que por volta das 16,23hs uma das bombas foi desligada por ação do sistema de bloqueio. A imediata intervenção do operador em comutar o sistema de controle do modo automático para o modo manual e fechar a válvula de controle no sentido de manter os parâmetros de sobrecarga dentro dos limites, impediu a perda da unidade sem redução de carga (Figura 4.6a).

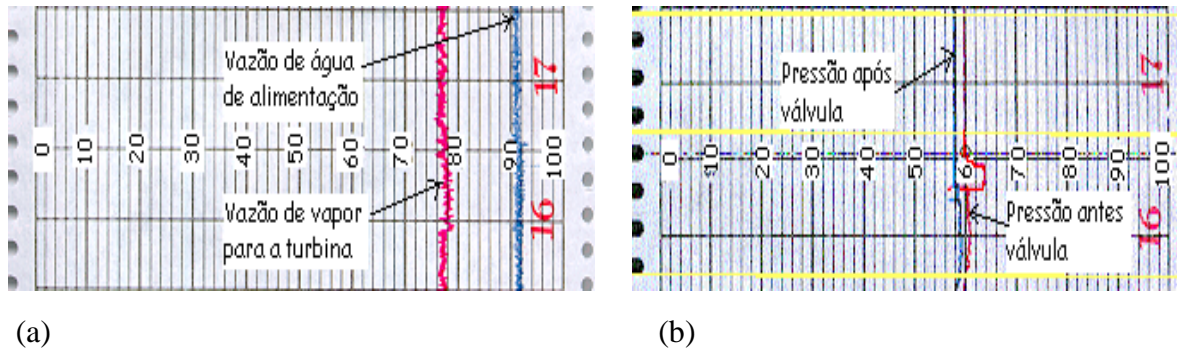


Figura 4.6 Registro de desligamento inesperado de uma das bombas de água de alimentação com intervenção do operador

O gráfico da Figura 4.6b mostra, através dos registros das pressões, que a ação do operador sacrificou a pressão diferencial através da válvula de controle (mantida durante um período de aproximadamente 30 minutos em torno de 16 bar), com pleno êxito na manutenção dos parâmetros de sobrecarga das bombas de água de alimentação dentro dos limites e mantendo, satisfatoriamente, a normalidade das condições operacionais da unidade.

As situações apresentadas são rotineiras para os engenheiros e técnicos de operação e manutenção e, apesar dos progressos no aperfeiçoamento do sistema de controle atual, justificam o esforço em busca de alternativas que possam minimizar os transtornos nas situações críticas. As novas técnicas têm-se apresentado como caminho para a solução de problemas robustos e complexos. Foi demonstrado que o sistema de controle baseado em controladores lógicos difusos, aplicado ao modelo concebido para simulação, apresentou um desempenho bastante satisfatório e pode se constituir numa ótima alternativa para a solução do problema tratado neste trabalho.

Capítulo 5 Conclusões e Recomendações

5.1 Introdução

Neste capítulo serão descritas, inicialmente, as conclusões com relação ao comportamento do processo, submetido aos comandos do modelo de sistema de controle concebido com controladores lógicos difusos e a eficiência destes controladores na manutenção do funcionamento do processo, em condições estáveis, nas situações adversas.

Finalmente serão abordadas sugestões e propostas para o aperfeiçoamento deste trabalho e recomendações para trabalhos futuros.

5.2 Conclusões

Para aumentar a segurança operacional, a confiabilidade e, por consequência, a produtividade em processos industriais, torna-se importante auxiliar as equipes de operação, bem como dotar os sistemas de controle com um suporte mais inteligente.

Este trabalho apresentou uma abordagem de desenvolvimento de sistema de controle pautado no modelamento linguístico, como alternativa ao modelamento matemático, visando demonstrar a eficiência de modelos que buscam uma aproximação ao raciocínio humano, com base na experiência e intuição de operadores de processos industriais. A importância desta abordagem reside nas seguintes características:

1 – O modelamento linguístico apresenta vantagens sobre o modelamento matemático quando há a necessidade de tomada de decisão. Enquanto o modelo matemático reage com precisão e rigor obedecendo a limites rígidos, o modelo linguístico permite tratar a incerteza e o conhecimento parcial em situações especiais obedecendo a limites de aproximação, como reage o operador de processos ao decidir por determinadas manobras. Entretanto, o operador pode tomar decisões equivocadas como *substituir o controle no momento errado*, ou *abrir/fechar a válvula um pouco mais/menos do que devia*, ou *parar o processo precipitadamente*, mas tem a percepção de que errou. O modelo linguístico é concebido para não cometer estes equívocos, porque é baseado tanto

na intuição do operador no julgamento da certeza ou da incerteza, quanto na sua experiência em decisões equivocadas.

2 – O modelo linguístico é mais apropriado que o modelo convencional quando da necessidade de adaptações rápidas do processo por ocasião de perturbações desconhecidas bruscas ou manobras operacionais intencionais abruptas. Observa-se no comportamento do processo, nestas ocasiões, os desvios normais e a rápida estabilização esperada de um bom sistema de controle.

Especificamente, as conclusões sobre a performance dos controladores lógicos difusos desenvolvidos podem ser sumarizadas como a seguir:

- O controlador de rotação responde às imposições de geração de forma satisfatória, e como era de se esperar, similar ao comportamento de um controlador clássico. Cabe ressaltar porém, que não foram realizados comparativos entre os dois modelos na simulação para uma afirmação definitiva sobre eficiência. Entretanto, deve ser destacada a possibilidade de desenvolvimento de um controlador lógico difuso para uma tarefa simples em uma unidade computacional, também com relativa simplicidade, aproveitando os recursos de I/O existentes.
- O controlador de pressão diferencial e curva limite, responsável pela estratégia de controle nas situações críticas, apresenta um comportamento determinante para a estabilização do sistema. Este controlador que tem por função a de controlar a pressão diferencial da válvula em condições normais de operação, é decisivo nas anormalidades ao abandonar o controle desta variável, a fim de manter os parâmetros da curva característica das bombas de água de alimentação dentro dos limites estabelecidos com a eficiência esperada. Em contraste com o modelo matemático real atual, este controlador demonstrou um desempenho, na simulação, altamente satisfatório.

Pode-se afirmar, finalmente, que os resultados obtidos com o modelo de sistema proposto se revelaram muito bons, correspondendo plenamente aos objetivos e às expectativas iniciais.

5.3 Recomendações

O modelo de sistema de controle desenvolvido neste trabalho pode ser aplicado a qualquer processo industrial estabelecendo, evidentemente, a aplicação de adaptações inerentes ao processo ao qual será aplicado. Entretanto, importantes aperfeiçoamentos sugerem o aprimoramento com outras pesquisas futuras, as quais algumas são aqui destacadas:

- Desenvolvimento de um módulo de alarmes para representação de riscos e de falhas, de modo a permitir maior facilidade para otimização das malhas de controle;
- Desenvolvimento de um módulo de bloqueio de equipamentos para avaliação de desempenho mais aproximado da realidade;
- Desenvolvimento de um módulo gráfico de curva característica capaz de fornecer, *on-line*, sobreposta ao mapa de curva limite (relação de rotação, vazão e pressão), o ponto exato desta relação dentro da curva em relação aos limites estipulados.

Além das sugestões relacionadas a ampliação do modelo para aprimorar a simulação, dois passos adiante podem ser vislumbrados como expectativa de trabalhos futuros:

- Completar o modelo matemático do processo, com a inclusão da terceira bomba, e incrementar a interface do sistema para servir como uma ferramenta de treinamento de novos operadores de processo;
- Viabilizar a implementação do sistema conforme sugerido no Capítulo 3, item 3.7, de forma a validar o desempenho do sistema desenvolvido em ambiente real.

Referências Bibliográficas

- BOUCHON, B. – **On the Forms of Reasoning in Expert Systems**. Aproximate Reasoning in Expert Systems, North-Holland, 1985.
- BRAAE, M., RUTHERFORD, D. A. – **Selection of Parameters for a Fuzzy Logic Controller**. Fuzzy Sets and Systems, n. 2, 1979.
- CAO, Z., KANDEL, A., LI, L. – **A New Model of Fuzzy Reasoning**. Fuzzy Sets and Systems, n. 36, 1990.
- DOMBI, J. – **Membership Function as an Evaluation**. Fuzzy Sets and Systems, n. 35, 1990.
- DUBOIS, D., PRADE, H. – **Fuzzy Sets and Statistical Data**. European Journal of Operational Research, n. 25, 1986.
- DURKIN, J. – **Expert Systems: Design and Development**. Prentice–Hall, New Jersey, 1994.
- HUDDLESTON, T., FLOWERS, S. – **Keep Complex Processes**. Chemical Engineering, September 1998.
- KICKERT, W. J. W., MAMDAMI, E. H. – **Analysis of a Fuzzy Logic Controller**. Fuzzy Sets and Systems, n. 1, 1978.
- KLEFENZ, G. – **Automatic Control of Steam Power Plants**. Bibliographisches Institut, 3. ed., Zúrich, Alemanha, 1986.
- MAZZUCCO, M. M. – **Implementação de um Controlador Preditivo Baseado em um Modelo Neural Associado a um Sistema especialista**. Dissertação de Mestrado, UFSC, Florianópolis, 1997.
- MOORE, C. G., HARRIS, C. J. – **Advances in Intelligent Control: Aspects of Fuzzy Control and Estimation**. 1. ed., Taylor & Francis, Bristol, USA, 1994.
- PLANET – **The Applications of Fuzzy Logic**. www.platem.com/ai/fuzzy.html, 1998.
- SIEMENS – **Siemens Corporation**. www.siemens.com/fuzzy/index.html, 1998.
- TCHOLAKIAN, A. B. – **Modelagem Linguística: Alternativa na Análise de Processos Complexos**. Dissertação de Mestrado, UFSC, Florianópolis, 1992.
- ZADEH, L. A. – **The Concept of a Linguistic Variable and its Applications**. Information Sciences, n. 8, 1975.
- ZIMMERMANN, H. J. - **Fuzzy Set Theory And its Applications**. 3. ed., Massachusetts, Kluwer Academic Publishers, 1996.

Bibliografia

- BUCHANAN, B. G., SHORTLIFFE, E. H. – **Rule Based Expert Systems**. MA, Addison-Wesley, 1984.
- CHEN, Y. Y., TSAO, T. C. – **A Description of the Dynamical Behavior of Fuzzy Systems**. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, vol. 19, n. 4, July/August 1989.
- CROSBY, R. W. – **Toward a Classification of Complex Systems**. European Journal of Operational Research, n. 30, 1987.
- DER RHEE, F. V., VAN NAUTA LEMKE, H. R., DUKMAN, J. G. – **Knowledge Based Fuzzy Control of Systems**. IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 35, n. 2, February 1990.
- FOGEL, D.B. – **System Identification Through Simulated Evolution: A Machine Learning Approach to Modeling**. Needham Heights, MA, Ginn Press, 1991.
- FURUTANI, T. – **Fuzzy Theory and its Industrial Applications**. DJIT, n. 254, 1989.
- GUPTA, M. M., KISZKA, J. B., NIKIFORUK, P. N. – **Modelling of Multivariable Fuzzy Systems**. IFAC 10th Triennial Word Congress, Munich 1987.
- GUPTA, M. M., KISZKA, J. B., TROJAN, G. M. – **Multivariable Structure of Fuzzy Control System**. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, vol. SMC-16, n. 5, September/October 1986.
- HUANG, L. J., TOMIZUKA, M. – **A Self-Paced Fuzzy Tracking Controller for Two-Dimensional Motion Control**. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, vol. 20, n. 5, September/October 1990.
- KARWOWSKI, W. – **Complexity, Fuzziness, and Ergonomic Incompatibility Issues in the Control of Dynamic Work Environments**. Ergonomics, vol. 34, n. 6, June 1991.
- KHOSLA, R., DILLON T. – **Engineering Intelligent Hybrid Multi-Agent Systems**. Massachusetts, Kluwer Academic Publishers, 1996.
- KING, P. J., MAMDAMI, E. H. – **The Application of Fuzzy Control Systems to Industrial Processes**. Automatica, vol. 13, 1977.
- KOSKO, B. – **Neural Networks and Fuzzy Systems**. Englewood Cliffs, New Jersey, Prentice Hall, 1991.
- KOSKO, B., ISAKA, S. – **Fuzzy Logic**. Scientific American, July 1993.
- KOUATLI, I., JONES, B. – **A Guide to the Design of Fuzzy Control Systems for Manufacturing Processes**. Journal of Intelligent Manufacturing, n. 1, 1991.

- LEE, C. C. – **Fuzzy Logic in Control Systems: Fuzzy Logic Controller.** IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, v.20, n.2, March/April 1990.
- MANDANI, E.H. – **Applications of Fuzzy Logic to Approximate Reasoning Using Linguistic Synthesis.** IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, v. c-26, n. 12, 1977.
- MIZUMOTO, M., ZIMMERMANN, H.J. – **Comparison of Fuzzy Reasoning Methods.** Fuzzy Sets and Systems, n. 8, 1982.
- PAPPIS, C. P., MAMDAMI, E. H. – **A Fuzzy Logic Controller for a Traffic Junction.** IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, vol. SMC-7, n. 10, January 1977.
- PROCYK, T. J., MAMDAMI, E. H. – **A linguistic Self-Organizing Process Controller.** Automatica, vol. 15, 1979.
- RAMOS, A. C. B. – **O Processamento do Conhecimento para Operação e Controle De Processos dos Sistemas Críticos de Tempo Real de uma Refinaria de Petróleo.** Tese de Doutorado, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, SP, 1996.
- RAY, K. S., MAJUMDER, D. D. – **Structure of an Intelligent Fuzzy Logic Controller and its Behaviour.** Approximate Reasoning in Expert Systems, North-Holland, 1985.
- ROSEN, R. – **On Complex Systems.** European Journal of Operational Research, n. 30, 1987.
- SHAO, S. – **Fuzzy Self-Organizing Controller and its Application for Dynamic Process.** Fuzzy Sets and Systems, n. 26, 1988.
- SUGENO, M., TANAKA, K. – **Successive Identification of a Fuzzy Model and its Applications to Prediction of a Complex System.** Fuzzy Sets and Systems, n. 42, 1991.
- SUGENO, M., KANG, G. T. – **Structure Identification of Fuzzy Model.** Fuzzy Sets and Systems, n. 28, 1988.
- TAKAGI, T., SUGENO, M. – **Fuzzy Identification of Systems and its Applications to Modeling and Control.** IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, vol. SMC-15, n. 1, January/February 1985.
- TONG, R. M. – **A Control Engineering Review of Fuzzy Systems.** Automatica, vol. 13, 1977.
- ZADEH, L. A. – **The Concept of a Linguistic Variable and its Applications.** Information Sciences, n. 8, 1975.

- ZADEH, L. A. – **The Role of Fuzzy Logic in the Management of Uncertainty.** Approximate Reasoning in Expert Systems, North-Holland, 1985.
- ZADEH, L. A. – **Outline of a New Approach to the Analysis of Complex Systems and Decision Processes.** IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, vol. SMC-3, n. 1, January 1973.
- ZIMMERMANN, H. J. – **Using Fuzzy Sets in Operational Research.** European Journal of Operational Research, n. 13, 1983.

Anexo A

Um modelo simples para abstração de um modelo complexo

Modelagem do Sistema de Controle de Óleo Combustível da Caldeira

Entre as muitas possibilidades de escolha de processos controlados automaticamente em uma indústria, principalmente em uma usina termelétrica, a opção por um sistema de controle de um processo simples para abstração de como conceber um modelo matemático para simulação no Matlab, deve-se ao fato que, é possível desenvolver todos os passos sequencialmente sem prejudicar a compreensão e fornecer subsídios para o entendimento de como modelar um processo complexo.

O sistema escolhido foi o controle de pressão de óleo combustível da caldeira, devido a algumas peculiaridades que o distinguem da maioria. O recalque do óleo é feito por uma bomba de deslocamento positivo que tem como característica manter a pressão constante na descarga. Por se tratar de uma caldeira à carvão, a queima do óleo combustível serve apenas para a partida e aquecimento da caldeira, exigindo partidas e paradas inesperadas, o que torna este processo descontinuado ao longo do período de produção. Em regime o sistema sofre variações bruscas com a necessidade de ligar e desligar queimadores durante a fase de acendimento e aquecimento da caldeira e nas manobras para a troca de moinho de carvão, que é o combustível principal. Enquanto nenhum queimador é colocado em operação, a válvula de controle assume todo a vazão de descarga da bomba controlando a pressão (fluxograma da Figura A.1).

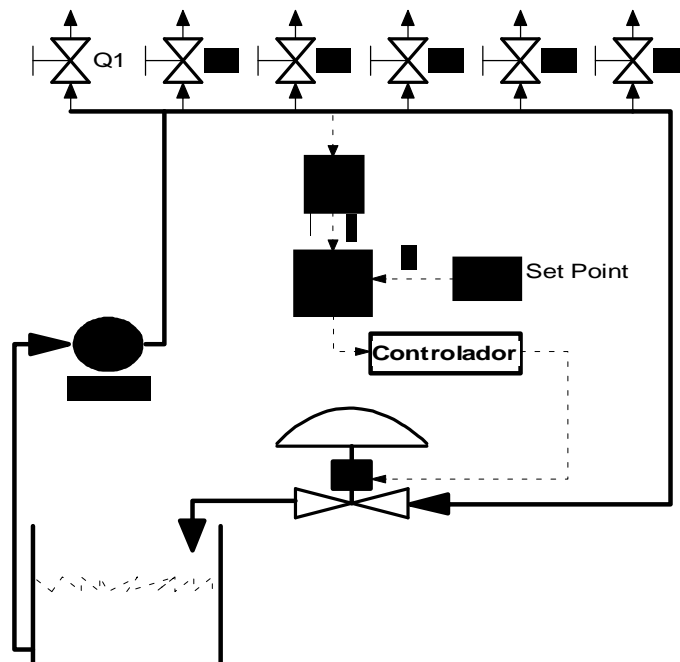


Figura A.1 Fluxograma do processo de controle de óleo combustível

A relação vazão vs. pressão da bomba está mostrada no gráfico da Figura A.2, que se expressa pela equação:

$$q = q_1 - k(p - p_1)$$

onde

p = pressão na descarga da bomba

p_1 = pressão mínima

q = vazão através da bomba

q_1 = vazão mínima

donde pode-se deduzir:

$$k = \frac{q_1 - q}{p - p_1}$$

e tratá-la matematicamente pela expressão (bloco 1 da Figura A.4):

$$q = q_1 - k(p - p_1)$$

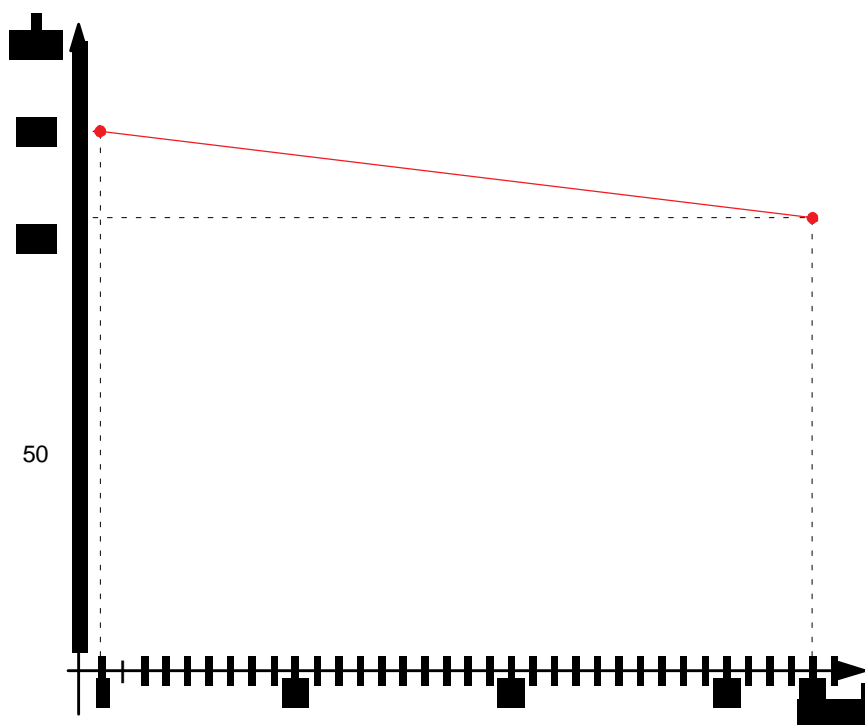


Figura A.2 Curva característica da bomba de óleo combustível

A Figura A.3 apresenta a curva característica da válvula, cuja vazão máxima é de $200\text{m}^3/\text{h}$ e passagem de $3,5\text{m}^3/\text{h}$ quando totalmente fechada (válvulas de controle não necessitam, normalmente, de vedação completa). A curva da válvula é do tipo igual percentagem e é expressa por:

$$q = q_0 + c \left(\frac{e^y - 1}{e^5 - 1} \right) (q_{\max} - q_0)$$

onde

q = vazão através da válvula

q_0 = vazão mínima através da bomba

c = constante

e = constante (número de Euler)

k = constante

y = curso da válvula (Range: 1 – 5 Volts)

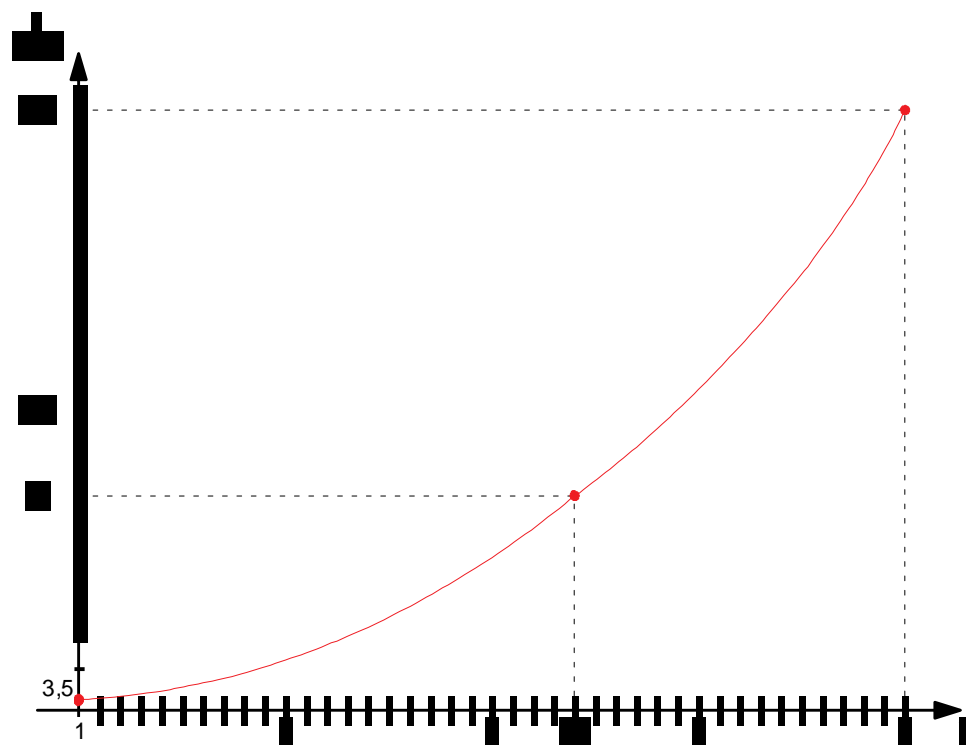


Figura A.3 Curva característica da válvula de controle de óleo combustível

Tomando dois pontos da curva:

$$y = 1 \rightarrow q = q_0 = 3,5$$

$$y = 5 \rightarrow q = q_{\max} = 200$$

Deduz-se:

$$\begin{aligned} & \rightarrow \frac{196,5}{81,5} = c.e \\ & \rightarrow 2,41 \\ & \rightarrow \\ & \rightarrow \\ & \rightarrow \boxed{C = 12,56} \end{aligned}$$

Logo, a equação da válvula se expressa por:

$$\dots$$

que permite o tratamento matemático da válvula de controle (bloco 2 da Figura A.4).

O modelo matemático do processo

Observando o fluxograma de processo da Figura A.1 pode-se perceber que, em condições normais de operação, em duas situações a pressão é afetada e pode sofrer variações: 1) com a entrada e saída de operação dos queimadores; 2) com a abertura e fechamento da válvula de controle para estabilização do sistema.

Considerando que a válvula é parte do sistema, sua atuação, na abertura e no fechamento, produz variações na pressão do óleo. A influência da válvula no processo está representada no bloco 3 da Figura A.4.

Um retardo de primeira ordem foi introduzido na entrada do sinal para a válvula, com o intuito de caracterizar o atraso inerente a sua resposta. A saturação na saída da válvula corresponde à pressão máxima do sistema (bloco 2 da Figura A.4).

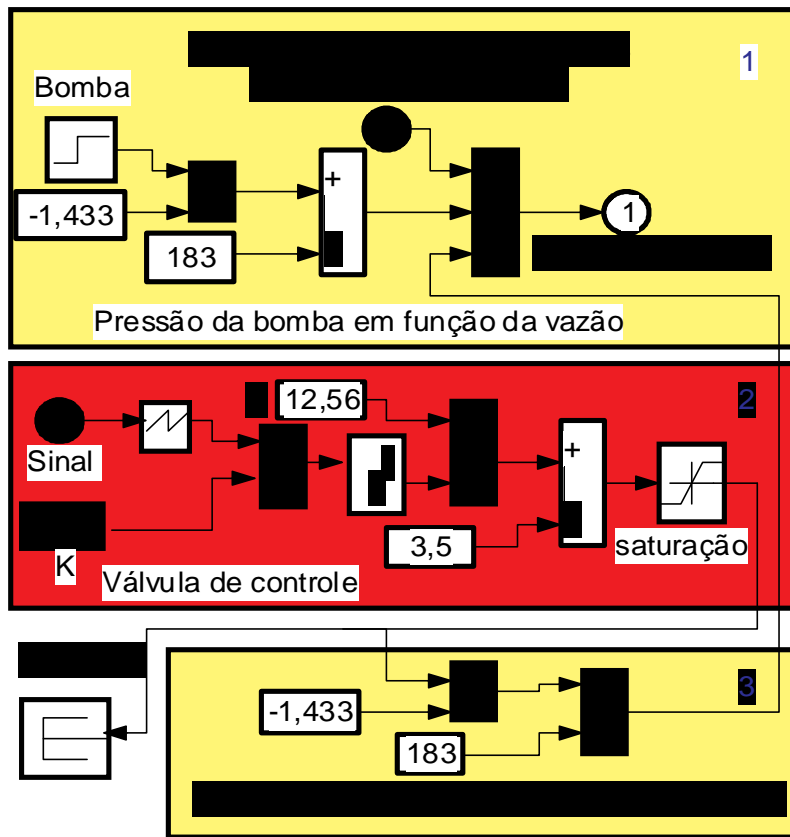


Figura A.4 Modelo matemático do processo de óleo combustível

Com relação à influência dos queimadores na pressão do processo, foram usadas constantes de $3,5 \text{ Kgf/cm}^2$. Este é um valor bastante aproximado para o consumo de cada queimador, que permite testar o comportamento do sistema ante variações rápidas do processo. Na Figura A.5 é mostrado este detalhe com o bloco do modelo matemático do processo e a malha de controle convencional completa.

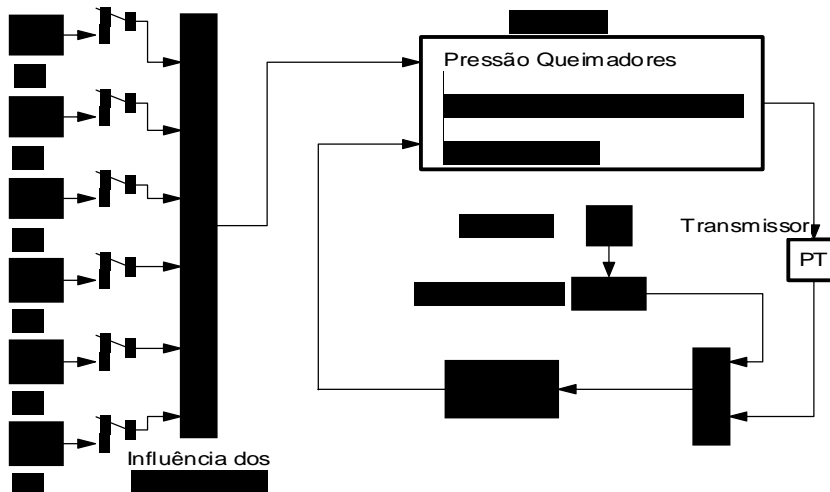


Figura A.5 Processo de óleo combustível com malha de medição e controle

Anexo B

Interface do Sistema

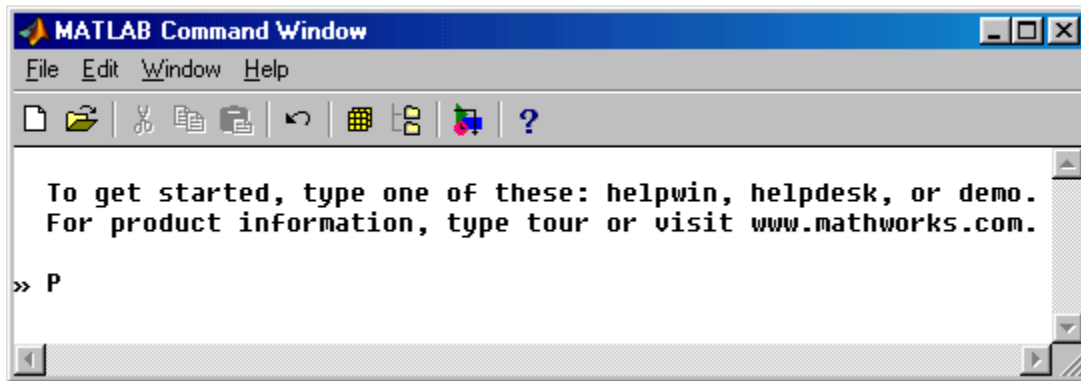


Figura B.1 Tela principal do Matlab – linha de comando

Para se ter acesso ao sistema de controle das bombas de água de alimentação, na linha de comando do Matlab (Figura B.1), deve ser digitada a letra P (maiúscula ou minúscula). A função “P” pode ser vista, no Anexo C.

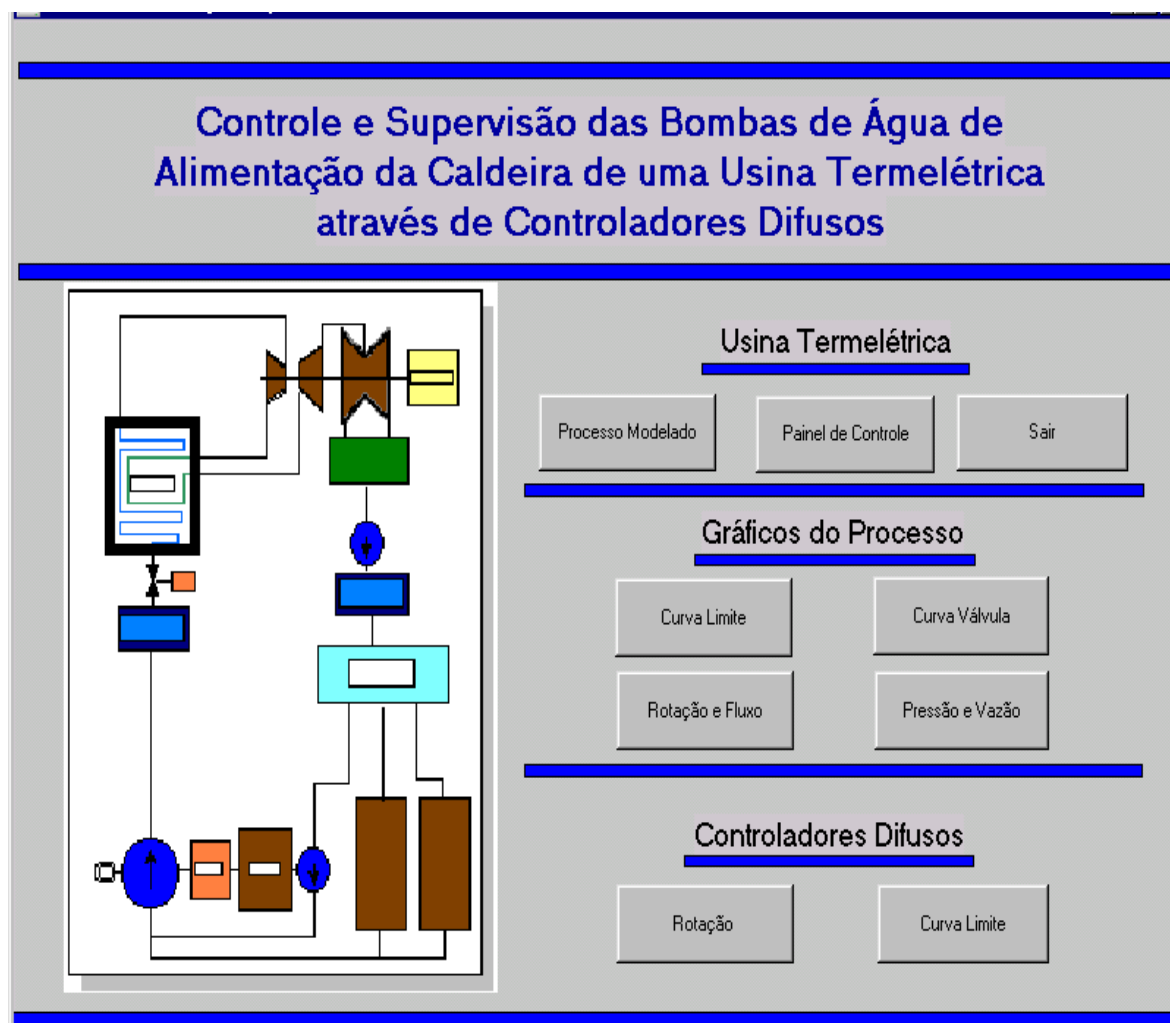


Figura B.2 Tela de entrada do sistema

A interface de entrada, como pode ser vista na Figura B.2, é dividida em três grupos:

1 - Usina Termelétrica

- a) O Botão *Processo Modelado* abre o bloco principal do modelo matemático do processo (Figura B.3), o qual permite o acesso a todos os blocos com as funções e operações matemáticas desenvolvidas no modelo, já detalhado no Capítulo 3 (item 3.6.2).

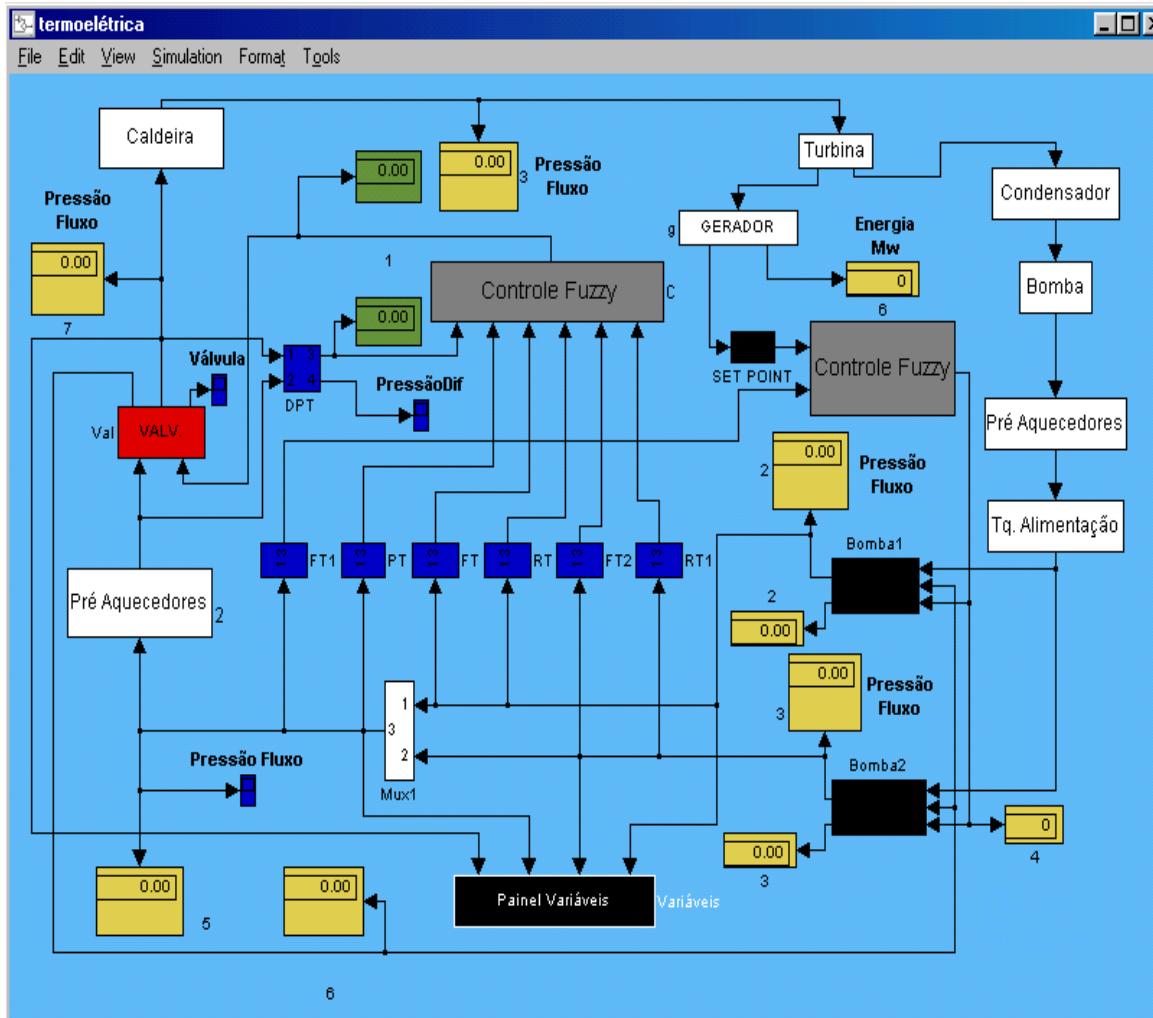


Figura B.3 Bloco principal

- b) O botão *Painel de Controle* abre a tela de simulação propriamente dita, conforme pode ser verificado observando a Figura B.4. Este assunto não requer maiores explicações por que no Capítulo 4 (Resultados Obtidos), foi extensivamente explorada, inclusive com relação à interpretação dos gráficos, registradores e botões de comando

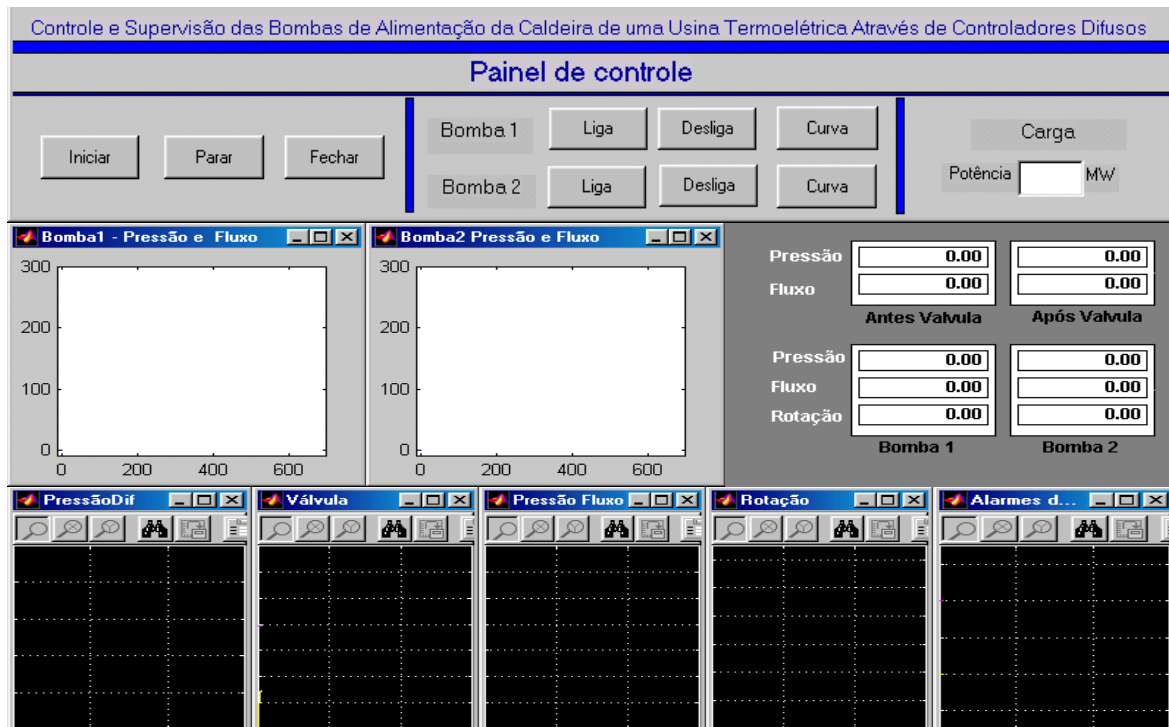


Figura B.4 Painel de Controle

c) O Botão *Sair* abandona o sistema e volta para a tela principal do Matlab.

2 – Gráficos do Processo

a) O botão *Curva Limite* fornece o gráfico da curva característica das bombas (Figura B.5), já apresentado no Capítulo 3.

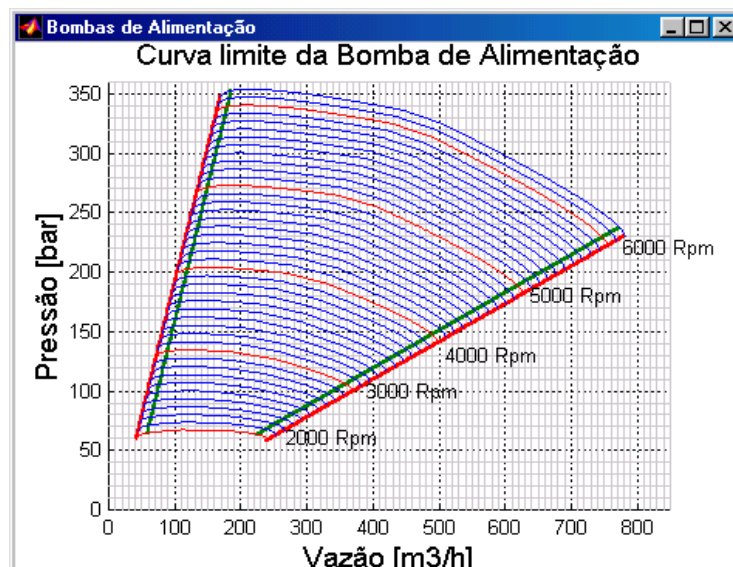


Figura B.5 Gráfico de curva limite das bombas de água de alimentação

- b) O botão *Curva Válvula* fornece a curva de operação da válvula principal de controle (Figura B.6), ou seja, a curva de pressão diferencial em função do fluxo e da abertura da válvula.

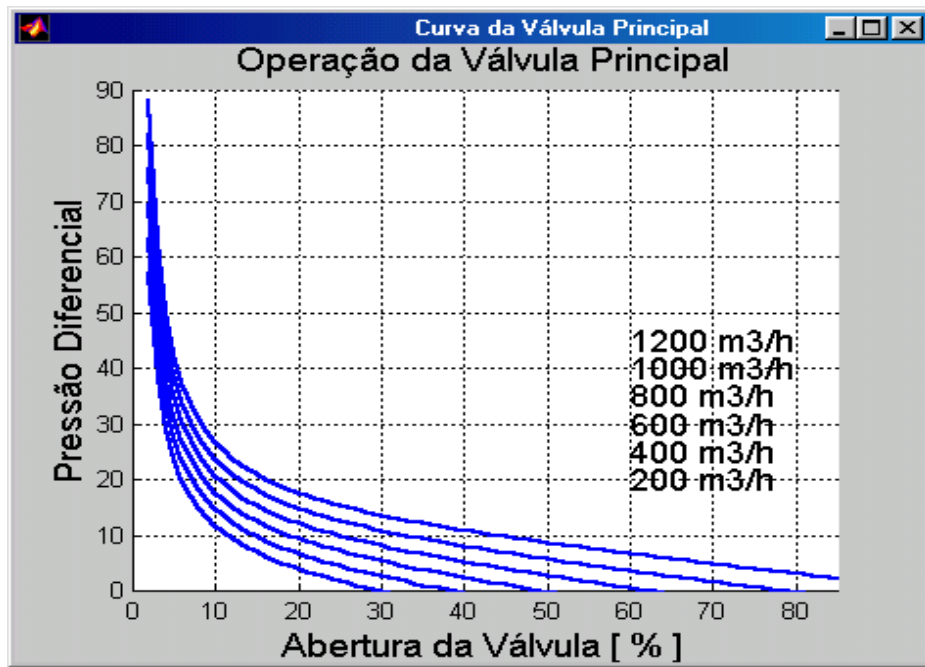


Figura B.6 Curva de operação da válvula principal de controle

- c) O botão *Rotação e Fluxo* fornece a curva de fluxo em relação à rotação (Figura B.7), definindo os pontos críticos para esta relação.

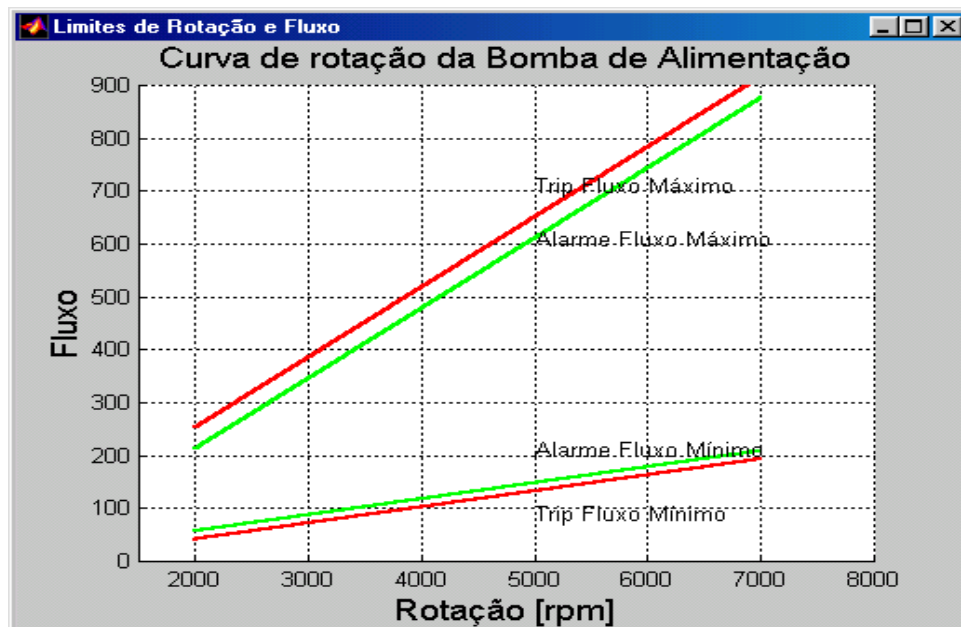


Figura B.7 Curva de Fluxo vs. Rotação das bombas de água de alimentação

- d) O botão *Pressão e Vazão* fornece a curva de fluxo em relação à pressão (Figura B.8), definindo os pontos críticos para esta relação.

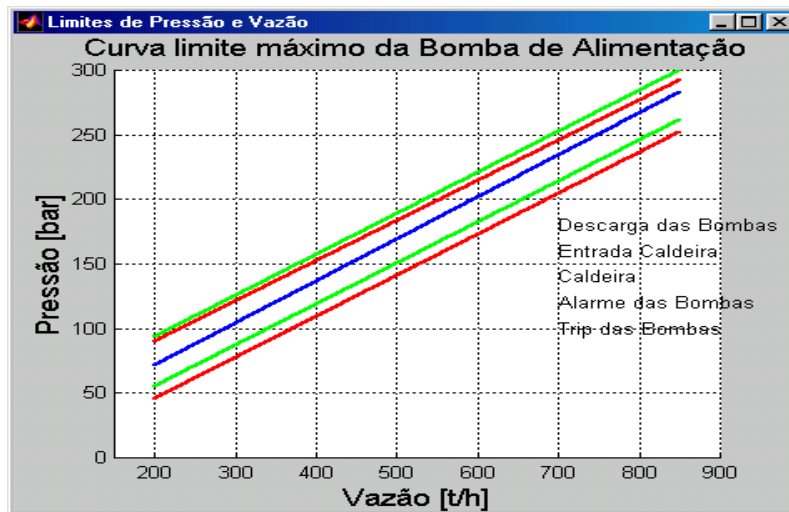


Figura B.8 Curva de Vazão vs. Pressão das bombas de água de alimentação

3 – Controladores Difusos

- a) O botão *Rotação* abre uma tela de opções para percepção de toda a implementação do controlador difuso de rotação, como pode ser notada na Figura B.9. Através desta interface, além da visualização das opções contidas na tela, é possível realizar testes e ajustes para otimização do controlador.

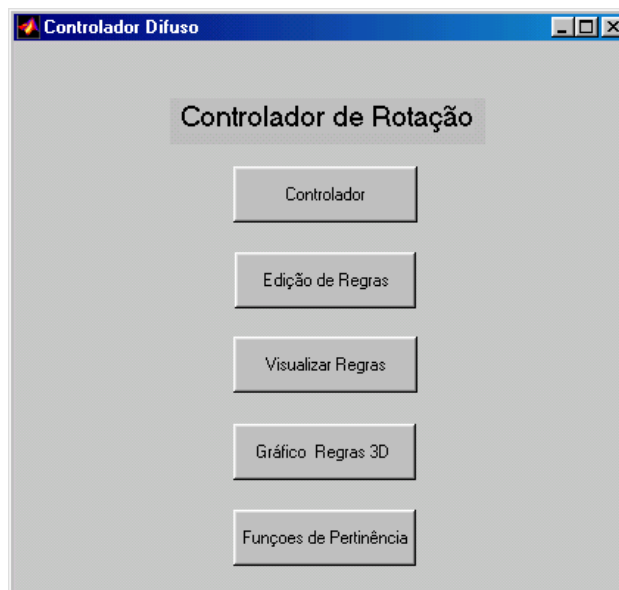


Figura B.9 Tela de opções do controlador difuso de rotação

- b) O botão *Curva Limite* abre uma tela de opções para percepção de toda a implementação do controlador difuso de pressão diferencial e curva limite, conforme Figura B.10, permitindo os mesmos procedimentos referidos no controlador difuso de rotação

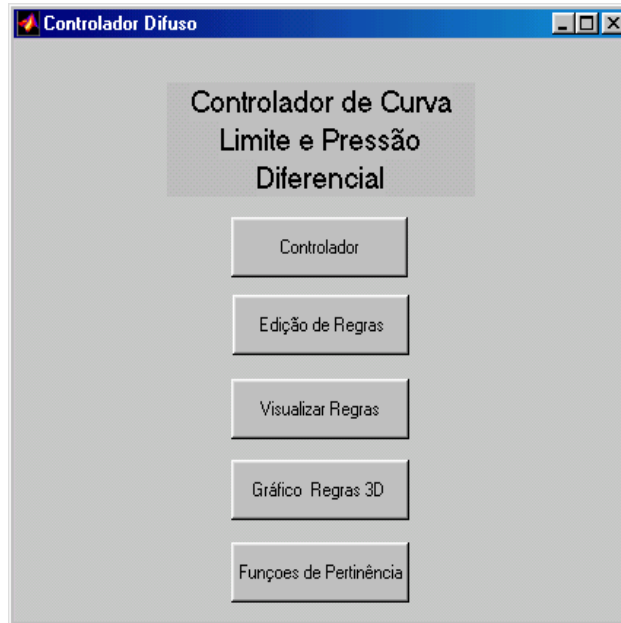


Figura B.10 Tela de opções do controlador difuso de pressão diferencial e curva limite

Anexo C

Principais Funções e Procedimentos de Programação Desenvolvidos no Matlab

1 – Função “P” (Iniciar Sistema)

```
simout=[];
simout2=[];
sistema;
h = waitbar (0,'Iniciando Sistema de Monitoração e Controle Difuso .....');
curvacerta = readfis('curvacerta.fis')
rotacao2=readfis('rotacao2.fis')
    for i = 1:100,
        % computation here %
        waitbar(i/100)
    end
close(h)
```

2 – Função para montagem da curva de Rotação vs. Fluxo

```
%Curva limite completa -climite
a = figure('position',[0 0 900 560],'name','Bombas de Alimentação','numbertitle','off', ...
'color','white','menubar','none');
%retirei 'menubar','none',
%axis([0 750 0 360]);
a = [1500 8000 ];
b = [0 900];
axis([a b]);
grid on;
xlabel('Rotação [rpm]','FontSize',14);
ylabel('Fluxo [m3/h]','FontSize',14);
title('Curva de Fluxo da Bomba de Alimentação','FontSize',14);
xlinf = 2000:1:7000;
%Alarme Fmínimo
ylinf = xlinf*0.0303 -3.67;
line(xlinf,ylinf,'linewidth',2);

%Trip f minimo
ytripf = xlinf*0.0303 -18.87;
line(xlinf,ytripf,'linewidth',2,'color','red');

%Amarme f maximo
%xlsup = 223:1:710;
%ylsup=xlinf*0.1326-52.70;
ylsup = xlinf*0.1271-21.17;
line(xlinf,ylsup,'linewidth',2);

%Trip f máximo
ytripsup = xlinf*0.1326-12.75;
line(xlinf,ytripsup,'linewidth',2,'color','red');

%Curva do email Superior
email = xlinf*0.1923 -382.3077;
%line(xlinf,email,'linewidth',2,'color','yellow');

%line(xlinf,yoper,'linewidth',2,'color','red');
% { ----- }
%Dados da operação
yoper = xlinf*0.1572-290.3383;
dados
for p = 1:20
    x(p) = dad(p,4)
    y(p) = dad(p,2)
end;
```

```

line(x,y,'linewidth',2,'color','black');
%line([40 223],[(40*2.28 -165*2.28 +345)(223*0.4045 -0.4045*710 +245)], 'linewidth',1,'color','red');
%ine([165 710],[(165*2.28 -165*2.28 +345)(710*0.4045 -0.4045*710 +245)], 'linewidth',1,'color','red');
%fr i = 1:350,
% line([200 210],[i i],'linewidth',2);
% end

```

3 – Função para montagem da curva limite

```

function climitec4()
%Curva limite completa -climite
figure('position',[0 0 900 560],'name','Bombas de Alimentação', ...
'numbertitle','off','color','white','menubar','none');
%tirei 'menubar','none',
zoom on;
echo on;
%axis([0 750 0 360]);
a = [0 850];
b = [0 360];
axis([a b]);
grid on;

%Faz grade
c = [0,850]
for i = 1:36
    if i = 5|i == 10|i == 20|i == 25|i == 30|i == 35
        % line(c,d,'color',[0 0 0])
        else
            line(c,[i*10 i*10],'color',[0.8 0.8 0.8])
        end;
    end;
d = [0,360]
for i=1:85
    if i = 10|i == 20|i == 30|i == 40|i == 50|i == 60|i == 70|i == 80
        % line(c,d,'color',[0 0 0])
        else
            line([i*10,i*10],d,'color',[0.8 0.8 0.8])
        end;
    end;

%*****
xlabel('Vazão [m3/h]','FontSize',14);
ylabel('Pressão [bar]','FontSize',14);
title('Curva limite da Bomba de Alimentação','FontSize',14);
%*****

%*****funções de operação*****

%CURVA DE TRIP FLUXO MÍNIMO
flu = 42:1:169;
y = flu*2.26 -35;
line(flu,y,'linewidth',2,'color','red');

%CURVA DE ALARME FLUXO MÍNIMO
%flu = 57:1:184;
flu=59:1:186;

```

```

y = flu*2.2677-69.2598;
line(flu,y,'linewidth',2,'color',[0 0.5 0]);

%CURVA DE ALARME FLUXO MÁXIMO
flu = 225:1:773;%(tirei 233 para 215)
y = flu*0.3175-8.26;
line(flu,y,'linewidth',2,'color',[0 0.5 0]);

%CURVA DE TRIP FLUXO MÁXIMO
flu = 240:1:780;
y = flu*0.3175-17.7938;
line(flu,y,'linewidth',2,'color','red');

%curvas de rotação
EX = 0.55;
R = 1000;
Rpm = 6200;
for i = 1:43,
    Rot(rpm,EX,R);
    Rpm = rpm-100;
    EX = EX-i/4000;
end;
% Rot(2000,EX,R);
% Rot(6200,EX,R);
text(270,60,'2000 Rpm');
text(390,100,'3000 Rpm');
text(510,130,'4000 Rpm');
text(640,180,'5000 Rpm');
text(780,220,'6000 Rpm');
echo on;
end% {-----}

function Rot(rot,EX,R)
% Trip f minimo
x1 = rot*0.0303 -18.87;
% Alarme Fmínimo
x2 = rot*0.0303 -3.40;
% Alarme f maximo
x3 = rot*0.1326-52.70;
% Trip f máximo
%x4 = rot*0.1326-12.75;
x4 = rot*0.1288-17.5;

%CURVA DE TRIP FLUXO MÍNIMO
y1 = x1*2.26 -35;
%CURVA DE ALARME FLUXO MÍNIMO
y2 = x2*2.2677-69.2598;
%CURVA DE ALARME FLUXO MÁXIMO
y3 = x3*0.3175-8.26;
%CURVA DE TRIP FLUXO MÁXIMO
y4 = x4*0.3175-17.7938;
%line([x1,x2,x3,x4],[y1,y2,y3,y4],'color','blue');
COR = 'blue';
linha(x1,y1,x4,y4,EX,R,COR);

if rot = 2000|rot == 3000|rot == 4000|rot == 5000|rot == 6000,
    %line([x1,x2,x3,x4],[y1,y2,y3,y4],'color','red')
    COR = 'red';
    linha(x1,y1,x4,y4,EX,R,COR);
end;
end

```

```

function linha(x1,y1,x2,y2,EXP,R,COR)
%Comp = ((y1-y2).^2)+(x2-x1).^2).^0.5
VAR=R;
Xc = (x2-x1)/2+x1;
Yc = (y1-y2)/2+y2;
X = x1:1:[xc-30];
%equação da reta principal
m = (y2-y1)/(x2-x1)
y = x*m-m*x1+y1;

%equação da primeira parte do DELTA
m2 = (1-0)/(xc-x1)
Ay = x*m2-m2*x1+0;
Ay2 = (Ay*VAR).^EXP+y;
line(x,Ay2,'linewidth',1,'color',COR);
%Primeira variação
xb = [xc-30]:1:[xc];
yb = xb*m-m*x1+y1;
Aymax = [xc-30]*m2-m2*x1+0
Ay2b = (Aymax*VAR).^EXP+yb;
line(xb,Ay2b,'linewidth',1,'color',COR);

%Segunda variação

xb = [xc]:1:[xc+30];
yb = xb*m-m*x1+y1;
Aymax = [xc-30]*m2-m2*x1+0
Ay2b = (Aymax*VAR).^EXP+yb;
line(xb,Ay2b,'linewidth',1,'color',COR);

%equação da segunda parte do DELTA
xx = [xc+30]:1:x2;
yy = xx*m-m*x1+y1;
m2 = (0-1)/(x2-xc)
Ay2 = xx*m2-m2*xc+1;
Ay3 = (Ay2*VAR).^EXP+yy;
line(xx,Ay3,'linewidth',1,'color',COR);
end;

```

4 – Função para montagem da curva Fluxo vs. Pressão

```

%Curva limite do processo
%Curva limite completa -climite
figure('position',[0 0 900 560],'name','Bombas de Alimentação', ...
'numbertitle','off','color','white','menubar','none');
%tirei 'menubar','none',
zoom on;
echo off;
%axis([0 750 0 360]);
a = [0 850];
b = [0 360];
axis([a b]);
grid on;

%Faz grade
c = [0,850]
for i=1:36
    if i==5|i==10|i==20|i==25|i==30|i==15|i==35

```

```

% line(c,d,'color',[0 0 0])
else
line(c,[i*10 i*10],'color',[0.8 0.8 0.8])
end;
end;
d=[0,360]
for i=1:85
if i==10|i==20|i==30|i==40|i==50|i==60|i==70|i==80
% line(c,d,'color',[0 0 0])
else
line([i*10,i*10],d,'color',[0.8 0.8 0.8])
end;
end;

% *****
xlabel('Vazão [m3/h]', 'FontSize',14);
ylabel('Pressão [bar]', 'FontSize',14);
title('Curva limite da Bomba de Alimentação', 'FontSize',14);
% *****

% *****funções de operação *****

%CURVA DE TRIP FLUXO MÍNIMO
flu=42:1:169;
y=flu*2.26 -35;
line(flu,y,'linewidth',2,'color','red');

%CURVA DE ALARME FLUXO MÍNIMO
%flu=57:1:184;
flu=59:1:186;
y=flu*2.2677-69.2598;
line(flu,y,'linewidth',2,'color',[0 0.5 0]);

%CURVA DE ALARME FLUXO MÁXIMO
flu=225:1:773;%(tirei 233 para 215)
y=flu*0.3175-8.26;
line(flu,y,'linewidth',2,'color',[0 0.5 0]);

%CURVA DE TRIP FLUXO MÁXIMO
flu=240:1:780;
y=flu*0.3175-17.7938;
line(flu,y,'linewidth',2,'color','red');

%curvas de rotação
EX=0.55;
R=1000;
rpm=6200;
%for i=1:43,
% Rot(rpm,EX,R);
% rpm=rpm-100;
% EX=EX-i/4000;
% end;
%% Rot(2000,EX,R);
%% Rot(6200,EX,R);
text(270,60,'2000 Rpm');
text(390,100,'3000 Rpm');
text(510,130,'4000 Rpm');
text(640,180,'5000 Rpm');
text(780,220,'6000 Rpm');
%curva da simulação
%function Rot(rot,EX,R)
%Trip f minimo

```

```

%x1=rot*0.0303 -18.87;
%Alarme Fmínimo
%x2=rot*0.0303 -3.40;
%Alarme f maximo
%x3=rot*0.1326-52.70;
%Trip f máximo
%x4=rot*0.1326-12.75;
%x4=rot*0.1288-17.5;

%CURVA DE TRIP FLUXO MÍNIMO
%y1=x1*2.26 -35;
%CURVA DE ALARME FLUXO MÍNIMO
%y2=x2*2.2677-69.2598;
%CURVA DE ALARME FLUXO MÁXIMO
%y3=x3*0.3175-8.26;
%CURVA DE TRIP FLUXO MÁXIMO
%y4=x4*0.3175-17.7938;
%line([x1,x2,x3,x4],[y1,y2,y3,y4],'color','blue');
%COR='blue';
% linha(x1,y1,x4,y4,EX,R,COR);

%if rot==2000|rot==3000|rot==4000|rot==5000|rot==6000,
%line([x1,x2,x3,x4],[y1,y2,y3,y4],'color','red')
% COR='red';
% linha(x1,y1,x4,y4,EX,R,COR);
%end;

%end

%function linha(x1,y1,x2,y2,EXP,R,COR)
%Comp=((y1-y2).^2)+(x2-x1).^2).^0.5
%VAR=R;
%xc=(x2-x1)./2+x1;
%yc=(y1-y2)./2+y2;
%x=x1:1:[xc-30];
%equação da reta principal
%m=(y2-y1)/(x2-x1)
%y=x*m-m*x1+y1;

%equação da primeira parte do DELTA
%m2=(1-0)/(xc-x1)
%Ay=x*m2-m2*x1+0;
%Ay2=(Ay*VAR).^EXP+y;
%line(x,Ay2,'linewidth',1,'color',COR);
%Primeira variação
%xb=[xc-30]:1:[xc];
%yb=xb*m-m*x1+y1;
%Aymax=[xc-30]*m2-m2*x1+0
%Ay2b=(Aymax*VAR).^EXP+yb;
%line(xb,Ay2b,'linewidth',1,'color',COR);

%Segunda variação

%xb=[xc]:1:[xc+30];
%yb=xb*m-m*x1+y1;
%Aymax=[xc-30]*m2-m2*x1+0
%Ay2b=(Aymax*VAR).^EXP+yb;
%line(xb,Ay2b,'linewidth',1,'color',COR);

%equação da segunda parte do DELTA
%xx=[xc+30]:1:x2;
%yy=xx*m-m*x1+y1;

```



```

% m2=(0-1)/(x2-xc)
% Ay2=xx*m2-m2*xc+1;
% Ay3=(Ay2*VAR).^EXP+yy;
% line(xx,Ay3,'linewidth',1,'color',COR);
%end;

```

5 – Função para montagem da curva de operação da válvula principal de controle

```

function curva3005()
% This is the machine-generated representation of a Handle Graphics object
% and its children. Note that handle values may change when these objects
% are re-created. This may cause problems with any callbacks written to
% depend on the value of the handle at the time the object was saved.
%
% To reopen this object, just type the name of the M-file at the MATLAB
% prompt. The M-file and its associated MAT-file must be on your path.

```

```
load curva3005
```

```

a = figure('Color',[0.8 0.8 0.8], ...
    'Colormap','mat0', ...
    'MenuBar','none', ...
    'Name','                               Curva da Válvula Principal', ...
    'NumberTitle','off', ...
    'PointerShapeCData',mat1, ...
    'Position',[-5 25 804 560], ...
    'Tag','Fig2', ...
    'WindowButtonDownFcn','zoom down', ...
    'WindowButtonUpFcn','ones;');
b = axes('Parent',a, ...
    'CameraUpVector',[0 1 0], ...
    'CameraUpVectorMode','manual', ...
    'Color',[1 1 1], ...
    'ColorOrder',mat2, ...
    'Position',[0.129353 0.1125 0.774876 0.814286], ...
    'Tag','Axes1', ...
    'XColor',[0 0 0], ...
    'XGrid','on', ...
    'XLim',[0 85], ...
    'XLimMode','manual', ...
    'YColor',[0 0 0], ...
    'YGrid','on', ...
    'YLim',[0 90], ...
    'YLimMode','manual', ...
    'ZColor',[0 0 0], ...
    'ZGrid','on');
c = text('Parent',b, ...
    'Color',[0 0 0], ...
    'FontSize',14, ...
    'HandleVisibility','callback', ...
    'HorizontalAlignment','center', ...
    'Position',[42.4318 -4.73684 0], ...
    'String','Abertura da Válvula [ % ]', ...
    'Tag','Axes1Text10', ...
    'VerticalAlignment','cap');
set(get(c,'Parent'),'XLabel',c);
c = text('Parent',b, ...
    'Color',[0 0 0], ...
    'FontSize',14, ...

```

```

    'HandleVisibility','callback', ...
    'HorizontalAlignment','center', ...
    'Position',[-3.41091 44.8026 0], ...
    'Rotation',90, ...
    'String','Pressão Diferencial', ...
    'Tag','Axes1Text9', ...
    'VerticalAlignment','baseline');
set(get(c,'Parent'),'YLabel',c);
c = text('Parent',b, ...
    'Color',[0 0 0], ...
    'FontSize',14, ...
    'HandleVisibility','callback', ...
    'HorizontalAlignment','center', ...
    'Position',[42.4318 91.3816 0], ...
    'String','Operação da Válvula Principal', ...
    'Tag','Axes1Text8', ...
    'VerticalAlignment','bottom');
set(get(c,'Parent'),'Title',c);
c = line('Parent',b, ...
    'Color',[0 0 1], ...
    'LineWidth',2, ...
    'Tag','Axes1Line6', ...
    'XData',mat3, ...
    'YData',mat4);
c = line('Parent',b, ...
    'Color',[0 0 1], ...
    'LineWidth',2, ...
    'Tag','Axes1Line5', ...
    'XData',mat5, ...
    'YData',mat6);
c = line('Parent',b, ...
    'Color',[0 0 1], ...
    'LineWidth',2, ...
    'Tag','Axes1Line4', ...
    'XData',mat7, ...
    'YData',mat8);
c = line('Parent',b, ...
    'Color',[0 0 1], ...
    'LineWidth',2, ...
    'Tag','Axes1Line3', ...
    'XData',mat9, ...
    'YData',mat10);
c = line('Parent',b, ...
    'Color',[0 0 1], ...
    'LineWidth',2, ...
    'Tag','Axes1Line2', ...
    'XData',mat11, ...
    'YData',mat12);
c = line('Parent',b, ...
    'Color',[0 0 1], ...
    'LineWidth',2, ...
    'Tag','Axes1Line1', ...
    'XData',mat13, ...
    'YData',mat14);
c = text('Parent',b, ...
    'Color',[0 0 0], ...
    'FontSize',13, ...
    'Position',[60 20 0], ...
    'String','200 m3/h', ...
    'Tag','Axes1Text7');
c = text('Parent',b, ...
    'Color',[0 0 0], ...

```

```

        'FontSize',13, ...
        'Position',[60 25 0], ...
        'String','400 m3/h', ...
        'Tag','Axes1Text6');
c = text('Parent',b, ...
        'Color',[0 0 0], ...
        'FontSize',13, ...
        'Position',[60 30 0], ...
        'String','600 m3/h', ...
        'Tag','Axes1Text5');
c = text('Parent',b, ...
        'Color',[0 0 0], ...
        'FontSize',13, ...
        'Position',[60 35 0], ...
        'String','800 m3/h', ...
        'Tag','Axes1Text4');
c = text('Parent',b, ...
        'Color',[0 0 0], ...
        'FontSize',13, ...
        'Position',[60 40 0], ...
        'String','1000 m3/h', ...
        'Tag','Axes1Text3');
c = text('Parent',b, ...
        'Color',[0 0 0], ...
        'FontSize',13, ...
        'Position',[60 45 0], ...
        'String','1200 m3/h', ...
        'Tag','Axes1Text2');
c = text('Parent',b, ...
        'Color',[0 0 0], ...
        'HandleVisibility','callback', ...
        'HorizontalAlignment','right', ...
        'Position',[-14.1894 97.6974 0], ...
        'Tag','Axes1Text1', ...
        'Visible','off');
set(get(c,'Parent'),'ZLabel',c);
b = uicontrol('Parent',a, ...
        'Style','text', ...
        'Tag','ZOOMFigureFcns', ...
        'UserData',mat15, ...
        'Visible','off');

```

Anexo D

Principais documentos técnicos e de operação

