



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

BERNARDO CESAR DE OLIVEIRA LIMA

USO DE ENGENHARIA DE SOFTWARE NO DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA  
ESPECIALISTA FUZZY PARA AUXÍLIO À MANUTENÇÃO PREDITIVA EM  
HIDROGERADORES

UFPA – ITEC – PPGEE  
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DO GUAMÁ  
66.075-900 – BELÉM – PARÁ – BRASIL



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

BERNARDO CESAR DE OLIVEIRA LIMA

USO DE ENGENHARIA DE SOFTWARE NO DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA  
ESPECIALISTA FUZZY PARA AUXÍLIO À MANUTENÇÃO PREDITIVA EM  
HIDROGERADORES

Dissertação submetida à Banca  
Examinadora do Programa de Pós-  
Graduação em Engenharia Elétrica da  
UFPA para a obtenção do Grau de Mestre  
em Engenharia Elétrica.

UFPA – ITEC – PPGEE  
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DO GUAMÁ  
66.075–900 – BELÉM – PARÁ – BRASIL

---

L732u      Lima, Bernardo Cesar de Oliveira

Uso de engenharia de software no desenvolvimento de sistema especialista fuzzy para auxílio à manutenção preditiva em hidrogeradores / Bernardo Cesar de Oliveira Lima; orientador, Marcus Vinicius Alves Nunes.-2010.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia, Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, Belém, 2010.

1. Usinas hidrelétricas – automação. 2. Automação industrial. 3. Sistemas fuzzy. I. orientador. II. título.

CDD 22. ed. 621.312134

---



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
 INSTITUTO DE TECNOLOGIA  
 PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

USO DE ENGENHARIA DE SOFTWARE NO DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA  
 ESPECIALISTA FUZZY PARA AUXÍLIO À MANUTENÇÃO PREDITIVA EM  
 HIDROGERADORES

AUTOR: BERNARDO CESAR DE OLIVEIRA LIMA

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À AVALIAÇÃO DA BANCA EXAMINADORA APROVADA PELO COLEGIADO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ E JULGADA ADEQUADA PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA COM ÊNFASE EM COMPUTAÇÃO APLICADA.

APROVADA EM \_\_/ \_\_/ \_\_\_\_

BANCA EXAMINADORA:

---

PROF. DR. MARCUS VINICIUS ALVES NUNES  
 (ORIENTADOR - UFPA)

---

PROF. DR. ROBERTO CÉLIO LIMÃO DE OLIVEIRA  
 (EXAMINADOR)

---

PROF. DR. ADAMO LIMA DE SANTANA  
 (EXAMINADOR)

---

PROF. DR. ALEXANDRE LUIZ AMARANTE MESQUITA  
 (EXAMINADOR)

VISTO:

---

PROF. DR. MARCUS VINICIUS ALVES NUNES  
 (COORDENADOR DO PPGEE - UFPA)

UFPA – ITEC – PPGEE  
 CAMPUS UNIVERSITÁRIO DO GUAMÁ  
 66.075-900 – BELÉM – PARÁ – BRASIL

## AGRADECIMENTOS

Aos meus familiares que me apoiaram nas decisões mais difíceis e me deram a chance de estar concluindo esse mérito.

À amiga e companheira, Rafela Strympl que nos momentos em que não via a solução, deu-me dicas e motivação.

Aos amigos Anderson Sena, Roger da Silva e Antenor pelo auxílio com as tecnologias e a paciência em explicar conceitos avançados no diagnóstico.

Aos profissionais da Eletronorte por acreditarem no projeto e nos estudos conduzidos.

Ao engenheiro Jaccques Sanz e ao professor Dr. Roberto Limão por conduzirem com brilhantismo o projeto de pesquisa que estimulou esse trabalho.

Ao meu orientador por pelas suas dicas e por me conduzir e acreditar no potencial do meu trabalho.

*“No meio da dificuldade encontra-se a oportunidade”*

*Albert Einstein*

## RESUMO

Os hidrogeradores são peças chaves no circuito brasileiro de energia, sua indisponibilidade e mau funcionamento podem causar multas altíssimas a concessionárias aplicadas pela ANEEL por não atenderem a demandas e até por paradas impróprias para efetivar manutenções, além de agravar confiabilidade na garantia do fornecimento aos consumidores finais. Para garantir que isso não venha acontecer, a manutenção preditiva fornece técnicas que podem apontar as falhas analisando os “sinais vitais” originados pelo próprio equipamento. Desta forma as condições mecânicas e operacionais são periodicamente monitoradas e quando as tendências são detectadas insalubres, as peças incômodas na máquina são identificadas e programadas para manutenção. Para que essa tendência seja encontrada, utiliza-se da lógica *fuzzy* para modelar o comportamento dos hidrogeradores, sendo mais específico: mancais, estator e anel coletor, inferindo conclusões prováveis de falhas. Neste trabalho, mostra o processo de construção do sistema que auxilia no diagnóstico da manutenção preditiva, desde sua metodologia de desenvolvimento por macro-atividades, definição arquitetural, conformidade dos requisitos e análise do conhecimento inserido a inteligência do sistema. O sistema foi desenvolvido em plataforma *labview* para servir como ferramenta de apoio. Todo o conhecimento inserido no sistema foi obtido com o corpo especialista de Eletronorte e outra parte na literatura, foi necessário aplicar o conceito de regras ao maquina de inferência *fuzzy*, para uma forma lingüística de fácil compreensão, para que os próprios especialistas ampliem e evolua o software.

Palavras Chaves: Diagnóstico, Manutenção Preditiva, Lógica Fuzzy

## ABSTRACT

The hidrogeradores are keys-parts in the Brazilian circuit of energy, its non-availability and bad functioning can causes highest fines for the concessionaires applied for the ANEEL for not taking care of the demands and for improper to accomplish maintenances, beyond aggravating trustworthiness in the guarantee of the supply to the final consumers. To guarantee that this does not come to happen, the predivite maintenance supplies techniques that can point the imperfections analyzing the “vital signals” originated by the proper equipment. Thus the mechanical and operational conditions periodically are monitored and when the trends are detected unhealthy, the bothering parts in the machine are identified and programmed for maintenance. So that this trend is found, logic fuzzy is used of the shape the behavior of the hidropower, being more specifies: “mancais”, “estator”, “anel coletor”, inferring probable conclusions of imperfections. In this work, she shows the process of construction of the system that assists diagnosiss in it of the predivite maintenance, since its methodology of development for “*macro-activities*”, architectural definition, conformity of the requirements and analysis of the inserted knowledge the intelligence of the system. The system was developed in platform labview to serve as support tool. All the inserted knowledge in the system was gotten with the body specialist of Eletronorte and another part in literature, was necessary to apply the concept of rules to it schemes of inference fuzzy, for a linguistic form of easy understanding, so that the proper specialists extend and evolve software.

Keyword : Diagnostic, Predictive Maintenance, Fuzzy Logic

## SUMÁRIO

<b>RESUMO .....</b>	<b>VI</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>VII</b>
<b>SUMÁRIO.....</b>	<b>VIII</b>
<b>LISTA DE ILUSTRAÇÃO.....</b>	<b>XI</b>
<b>LISTA DE TABELAS .....</b>	<b>XIII</b>
<b>LISTA DE QUADROS .....</b>	<b>XIV</b>
<b>LISTA ABREVIATURAS E SIGLAS .....</b>	<b>XV</b>
<b>LISTA DE SIMBOLOS.....</b>	<b>XVI</b>
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS .....	1
1.2 OBJETIVO DESTE TRABALHO .....	2
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO .....	3
<b>2 MANUTENÇÃO PREDITIVA.....</b>	<b>4</b>
2.1 INTRODUÇÃO .....	4
2.2 OUTRAS FORMAS DE MANUTENÇÃO .....	5
2.2.1 Manutenção corretiva ou Orientada por Dano.....	5
2.2.2 Manutenção Preventiva ou orientada no tempo.....	6
2.2.3 Manutenção Proativa.....	6
2.3 CONCEITO DE MANUTENÇÃO PREDITIVA.....	7
2.4 BENEFÍCIOS DO SISTEMA DE DIAGNÓSTICO PARA MANUTENÇÃO PREDITIVA.....	9
2.5 CONCLUSÃO DO CAPITULO 2.....	10
<b>3 LÓGICA FUZZY .....</b>	<b>12</b>
3.1 INTRODUÇÃO .....	12
3.2 FUNDAMENTOS DA LÓGICA FUZZY .....	13
3.3 CONJUNTOS <i>FUZZY</i> .....	14
3.4 FUNÇÃO PERTINÊNCIA FUZZY .....	15
3.5 OPERAÇÕES COM CONJUNTOS FUZZY .....	15
3.6 VARIÁVEIS LINGÜÍSTICAS.....	18
3.7 SISTEMA FUZZY .....	19
3.7.1 Fuzzyficador .....	21
3.7.2 Regras <i>Fuzzy</i> .....	21

3.7.3	Operador THEN.....	22
3.7.4	Operador de Agregação.....	22
3.7.5	Inferência <i>Fuzzy</i> .....	23
3.7.6	Defuzzyficador.....	24
3.8	CONCLUSÃO.....	25
<b>4</b>	<b>ANÁLISE DO SISTEMA DE AUXÍLIO AO DIAGNÓSTICO.....</b>	<b>26</b>
4.1	INTRODUÇÃO.....	26
4.2	METODOLOGIA DE DESENVOLVIMENTO DE SOFTWARE.....	26
4.3	ANALISE DE REQUISITOS E DESCRIÇÃO DE CASOS DE USO.....	28
4.3.1	Atores do Sistema.....	30
4.3.2	Caso de uso – Administrar usuários.....	31
4.3.3	Caso de uso – Configuração.....	31
4.3.4	Caso de uso – Validar.....	31
4.3.5	Caso de uso – Diagnosticar.....	31
4.4	ARQUITETURA DO SISTEMA.....	31
4.4.1	Arquitetura do sistema especialista em diagnóstico de hidrogeradores.....	32
4.5	ESTRUTURA RELACIONAL COM OUTROS SISTEMAS.....	35
4.6	CONCLUSÃO DO CAPITULO 4.....	36
<b>5</b>	<b>SISTEMA DE AUXÍLIO AO DIAGNÓSTICO DE MANUTENÇÃO</b>	
	<b>PREDITIVA EM HIDROGERADORES.....</b>	<b>37</b>
5.1	INTRODUÇÃO.....	37
5.2	DESCRIÇÃO DO SISTEMA.....	37
5.3	DESCRIÇÃO DO MÓDULO <i>FUZZY</i> .....	39
5.3.1	Controle de Acesso.....	40
5.3.2	Descrição do Modulo de Seleção de Dados.....	41
5.3.3	Configuração do sistema <i>fuzzy</i> .....	42
5.4	DESCRIÇÃO DO MÓDULO DE VALIDAÇÃO.....	46
5.5	RESULTADOS.....	47
5.5.1	Teste com Mancais.....	48
5.6	CONCLUSÃO DO CAPITULO 5.....	50
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>51</b>
6.1	PRINCIPAIS CONTRIBUIÇÕES DESTE TRABALHO.....	51
6.2	TRABALHOS FUTUROS.....	52
	<b>REFERENCIAS.....</b>	<b>53</b>

**APÊNDICE A – CONFIURAÇÃO DO SISTEMA DE DIAGNÓSTICO DE  
HIDROGERADORES.....56**

## LISTA DE ILUSTRAÇÃO

Figura 1- Tipos de manutenção. Fonte (Do Vale, 2003) .....	5
Figura 2 - Processo evolutivo da manutenção preditiva. Fonte: (SOUZA,2008) .....	8
Figura 3 - Representação de condições por faixa precisamente definida. Fonte: (NASCIMENTO e YONEYAMA, 2002).....	14
Figura 4 Representação de condições afebril e febril utilizando pertinência. Fonte: (NASCIMENTO e YONEYAMA, 2002).....	14
Figura 5 - Funções pertinência em um conjunto fuzzy .....	15
Figura 6 - União de conjuntos fuzzy.....	16
Figura 7 - Interseção de conjunto fuzzy.....	17
Figura 8 - Representação do sistema <i>fuzzy</i> . Fonte: ( WANG,1997 ).....	20
Figura 9 - Diagrama do processo de inferência fuzzy Fonte: (FUJIMOTO,2005) .....	23
Figura 10 - Processo de desenvolvimento de um sistema especialista. ....	27
Figura 11 - Diagrama de Caso de Uso .....	30
Figura 12 - Arquitetura do sistema de diagnóstico de hidrogeradores .....	33
Figura 13 - Integração do sistema de diagnóstico com outros sistemas de monitoramento ....	35
Figura 14 - Módulo <i>Fuzzy</i> do sistema de diagnóstico: tela principal com as variáveis de entrada e saída .....	40
Figura 15 - <i>Menu</i> com a ação conectar e desconectar com o banco de dados .....	40
Figura 16 - <i>Menu</i> de acesso ao banco de dados.....	41
Figura 17 - Mensagem de alerta caso não exista conexão com o banco o usuário não tenha o feito .....	41
Figura 18 - Área de seleção de eventos.....	42
Figura 19 - Interface de configuração das variáveis do sistema.....	43
Figura 20 - <i>Menu</i> com as opções de salvar ou carregar as regras em .fis .....	43
Figura 21 <i>Menu</i> que redireciona a telas específicas de edição de dos componentes fuzzy .....	44
Figura 22 - Edição de Variáveis .....	44
Figura 23 - Edição dos conjuntos , inserindo suas pertinências e funções .....	45
Figura 24 - Tela de edição de regras.....	46
Figura 25 - Módulo de Validação.....	47
Figura 26 - Diagrama representativo do sistema .....	48
Figura 27 - Tendência de defeito de excentricidade na turbina.....	49
Figura 28 - Defeito de excentricidade na turbina encontrado .....	50



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Opção de operador THEN. ....	22
Tabela 2 - Opção de operador agregação, sendo $\mu_{\text{CFF}}$ as funções de pertinência resultante do sistema fuzzy. ....	22
Tabela 3 - Variáveis que serão utilizadas na elaboração da base de regras do sistema de diagnóstico da UGH- 01 TUCURUÍ para Mancais .....	56
Tabela 4 - Variáveis que serão utilizadas na elaboração da base de regras do sistema de diagnóstico da UGH- 01 TUCURUÍ para o Estator .....	57
Tabela 5 - Prováveis dos mancais Defeitos nas Saídas do Sistema Fuzzy para Mancais.....	58
Tabela 6 - Prováveis dos mancais Defeitos nas Saídas do Sistema Fuzzy para Estator .....	59
Tabela 7 - Predicado dos Conjuntos Fuzzy das saídas e suas respectivas áreas de operação nos mancais da UGH-01 mancais .....	59
Tabela 8 - Predicado dos Conjuntos Fuzzy das saídas e suas respectivas áreas de operação nos mancais da UGH-01 estator .....	59

**LISTA DE QUADROS**

QUADRO 1 - PRINCIPAIS DIFERENÇAS ENTRE SISTEMA ESPECIALISTA E CONVENCIONAL.....	32
QUADRO 2 - RELAÇÃO DE GRANDEZAS MONITORADAS (VARIÁVEIS DE ENTRADA) COM DEFEITOS (VARIÁVEIS DE SAIDA).....	38

**LISTA ABREVIATURAS E SIGLAS**

SGBD	Sistema de gerenciamento de banco de dados
ELN	Eletronorte
VI	<i>Virtual Instruments</i>
LACEN	Laboratorio Central da Eletronorte
CTE	Centro de tecnologia da Eletronorte
DLL	<i>Dynamic-link library</i>
SQLServer	<i>Structure Query Language Server</i>
LabView	<i>Virtual Instrument Engineering Workbench</i>
MGT	Mancal Guia da Turbina
ME	Mancal de escora
DP	Descargas parciais
MAX	Maximo

**LISTA DE SIMBOLOS**

$\mu$	Função Pertinência
OU ou OR	Operador União
E ou AND	Operador intersecção
Não, Not, $\sim$	Operador negação
Min, $\cap$	Função mínimo
Max, $\cup$	Função Maximo
T-Norma	Operador And

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

A energia elétrica possui características que a diferenciam dos demais insumos industriais. Ela precisa ser gerada concomitantemente com o consumo, não é armazenada pelos consumidores, não pode ser transportada pelos meios usuais de transporte e, mais importante, sua qualidade depende tanto das empresas de energia elétrica que a produzem, transmitem e distribuem como também do consumidor.

Um acompanhamento confiável e um rápido diagnóstico sob a geração de energia, associados a custos de automação bastante atrativos, tem sido argumento fundamental na expansão de sistemas que garantam a confiabilidade do sistema e a qualidade da energia distribuída.

O Brasil possui uma geração de energia elétrica fortemente ligada as hidroelétricas, cujas máquinas hidrogeradoras são peças chaves que necessitam de um cuidado especial. E os maus funcionamentos dessas máquinas podem provocar paradas não planejadas, altíssimas multas, intervenção na capacidade produtiva das hidrelétricas e interrupção no sistema energético do país.

Dos consumidores domésticos aos setores industriais, de serviços e de desenvolvimento tecnológico, podem vir a ter prejuízos consideráveis por necessitarem de um fornecimento contínuo de energia (BRAMATTI, 2005). Além de que as empresas esperam um retorno sobre o investimento, necessitando de altos índices de disponibilidade e confiabilidade. Tais níveis de desempenho só podem ser obtidos através da redução do número de falhas e gerenciamentos de suas severidades (AZEVEDO, 2005; SOUZA, MARTINS, 2005).

O desafio de melhorar a produção é um processo que envolve a avaliação de funções, tarefas e atividades com o objetivo de conseguir um equilíbrio entre atividades reativas, preventivas e preditivas para garantir a preservação das funções dos ativos. Este processo é conseguido através da identificação dos defeitos dos equipamentos, assim como, das respectivas conseqüências de defeitos.

No contexto, em que se tem o objetivo de otimizar a eficiência dos ativos de produção para atingir o mais elevado nível de confiabilidade com menor investimento em componentes e mão-de-obra, a tecnologia da informação tem um papel fundamental, identificar automaticamente sintomas e distribuí-los.

A tecnologia da informação permite a integração de resultados de processamento de dados (como dos dados da instrumentação, históricos de variáveis monitoradas e dos relatórios de manutenção preventiva e corretiva) proveniente de diversas fontes distribuídas em varias usina hidroelétricas no país, propiciando a criação de um sistema real de apoio à decisão cujo objetivo é fundir esses variados tipos de dados tornando possível uma tomada de decisão apropriada com vista no planejamento de manutenção.

O desenvolvimento de novas tecnologias para análise (identificação, classificação e localização) de falhas em sistemas elétricos é plenamente plausível para a obtenção de diagnósticos rápidos e confiáveis de suas causas.

Neste trabalho é sintetizado um sistema de diagnóstico para hidrogeradores criado em um projeto de pesquisa com a Eletronorte e Universidade Federal do Pará, que beneficiaria a manutenção dos hidrogeradores auxiliando os técnicos no planejamento, compras de peças e redução dos custos com a parada do equipamento agindo direto no ponto de falha.

O sistema é composto por três componentes: mancais, estator e anel coletor, escolhidos por apresentarem alto índice de problemas de acordo com os engenheiros da Eletronorte. O sistema utilizará da lógica *fuzzy* para inferir possibilidades de defeitos ativadas pela base de conhecimento fornecidas pelos técnicos da Eletronorte. Foram feitas alguns estudos sobre a viabilidade dos sistemas, treinamentos ao corpo técnicos da Eletronorte para aquisição de regras.

## 1.2 OBJETIVO DESTES TRABALHOS

Ao final desse trabalho será possível ter conhecimento de como fazer um software de diagnóstico em conjunto com a manutenção preditiva. Utilizando das vantagens de um sistema especialista *fuzzy*, que conclui com base em eventos (dados monitorados em outros sistemas) a possibilidade de defeitos em hidrogeradores que mais tem ocasionado problemas nas usinas hidroelétricas.

Os objetivos atingidos com a criação de um sistema especialista de auxílio a diagnóstico de hidrogeradores viabilizará uma ferramenta que disponibilizará informações *online* aos operadores, pessoal de manutenção e aos especialistas no equipamento, através da rede corporativa de computadores da Eletronorte e de módulos que permitam a análise remota dos sinais monitorados.

Assim como ter implementado uma sistemática de apresentação de alarmes de fácil compreensão, armazenamento em banco de dados e gerenciamento das informações recebidas pelos sistemas de monitoração.

### 1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Essa dissertação está dividida na seguinte forma:

No capítulo 2 são apresentados os conceitos da manutenção preditiva, além de mostrar os benefícios de se utilizar um sistema para auxiliar a manutenção.

No capítulo 3 é abordado a lógica *fuzzy*, descrevendo suas características, um abordagem de sistemas especialista, suas estruturas e vantagens. Também descrevendo fundamentos teóricos: conjuntos *fuzzy*, funções, inferência, regras, variáveis, *fuzzyficação* e *defuzzyficação*.

No capítulo 4 é mostrado o método de desenvolvimento do LACEN de desenvolvimento de *software* que ajudou na construção do *software*, propiciando uma comunicação entre a universidade e a empresa no acompanhamento da evolução do desenvolvimento do sistema de auxílio a diagnóstico. Além da análise do escopo do sistema.

O capítulo 5 segue mostrando detalhadamente o sistema de diagnóstico: os módulos e alguns resultados com o sistema e regras obtidos com treinamentos para alimentar o sistema.

No capítulo 6 são descritas as conclusões obtidas e as sugestões para os trabalhos futuros.

## 2 MANUTENÇÃO PREDITIVA

### 2.1 INTRODUÇÃO

Como descrito por Mobley (2002) em seu livro, era senso comum, a 10 ou 20 anos atrás, se dizer que "A manutenção é um mal necessário" ou "Nada pode ser feito para melhorar os custos de manutenção" pois, as condições tecnológicas eram outras, mas com o advento do microprocessador ou do computador industrial tornou-se fácil usá-los para monitorar a condição de funcionamento de equipamentos e máquinas, fornecendo os meios para gerenciar a operação de manutenção. Tal instrumentação fornece os meios para reduzir ou eliminar os reparos desnecessários, evitar falhas catastróficas da máquina e reduzir o custo sobre o impacto negativo da operação de manutenção das fábricas e unidades de produção.

O resultado da gestão da manutenção ineficiente representa uma perda considerável da capacidade de fabricar produtos de qualidade e sem perda de tempo de produção, que são pontos competitivos no mercado mundial. Essa gestão da manutenção deficiente ou inadequada causa um impacto dramático sobre a capacidade das indústrias para competir com quem implementou a mais avançada gestão de fabricação e filosofias de manutenção (MOBLEY,2002).

A filosofia de manutenção, para Nascimento Jr e Yoneyama (2002), é a criação de um planejamento para manter o bom estado de vida de uma máquina corresponde ao ato de preservação ou cuidado na existência das condições que são necessário, a fim de que o equipamento funcione como era inicialmente. Transformando em conjunto de atividades, processos, métodos, indicadores e controles que tem por objetivo manter em funcionamento dentro dos padrões de qualidades (MUNAKATA,2008). Ou seja, como Do Vale (2003) escreveu em seu trabalho, são todas as medidas para conservação e reposição à condição devida de um sistema, assim como a apreciação de sua condição técnica atual, sendo que um defeito ou dano é definido como a redução de uma característica de utilização específica de uma máquina. No caso da perda da característica de utilização fala-se de falha ou colapso.

A manutenção preditiva se utiliza da monitoração da condição de deterioração do equipamento, a fim de manter o uso para o qual os equipamentos e sistemas foram originalmente concebidos e instalados, realiza testes de diagnóstico e inspeções durante as operações a fim de detectar pontos fracos ou iminentes as falhas, possibilitando programar

tarefas específicas de manutenção, somente quando elas forem de fato necessárias (ALMEIDA, 2009). Mais detalhes sobre a manutenção preditiva serão vistos na seção 2.3.

## 2.2 OUTRAS FORMAS DE MANUTENÇÃO

Antes, para entender com maior facilidade a manutenção preditiva deve-se compreender os tipos de manutenção existentes. Se fôssemos fazer um levantamento das filosofias de manutenção empregadas por processo em diferentes plantas, como afirmado por GIRDHAR (2004), é possível notar um pouco de similaridade, apesar da grande variação na natureza das suas operações.

Os tipos de manutenção são:



Figura 1- Tipos de manutenção. Fonte (Do Vale, 2003)

### 2.2.1 Manutenção corretiva ou Orientada por Dano

A filosofia básica por trás de manutenção corretiva é permitir que a máquina opere até ocorrer algum dano e só reparar ou substituir componentes danificados pouco antes ou quando o equipamento vem de uma parada completa. Esta abordagem funciona bem se o desligamento de equipamentos não afetar a produção e se o trabalho e os custos de material forem irrelevantes.

A desvantagem é que o departamento de manutenção perpetuamente opera em um modo não planejado. Quando ocorrer inesperadas interrupções, as atividades de manutenção requerem um grande estoque de peças sobressalentes para se reagir imediatamente.

Este tipo de manutenção é aplicável na indústria com poucas máquinas e de baixo valor unitário, nas quais há redundância e máquinas sobressalentes para entrar em operação imediatamente sem perda significativa de produção. A vantagem desse procedimento está na total utilização da vida útil do componente mais frágil da máquina. Essa estratégia é possível com eletrodomésticos tais como aspiradores de pó ou aparelhos de cozinha. Esse conceito não

se aplica na maioria das indústrias, principalmente em instalações que operam continuamente. Nesse caso em geral, não compensa monitorar a condição das máquinas.

### 2.2.2 Manutenção Preventiva ou orientada no tempo

A filosofia da manutenção preventiva é para programar atividades de manutenção em intervalos de tempo pré-determinado, com base em dias ou horas de tempo de operação de máquinas, rotina de inspeções, ensaios e serviços de modo que problemas iminentes possam ser detectados. Aqui a reparação ou substituição do equipamento danificado é realizada antes que os problemas óbvios ocorram. Esta é uma boa aproximação para o equipamento que não é operado de forma contínua, e onde o pessoal tem habilidade suficiente, conhecimento e tempo para realizar o preventivo trabalho de manutenção (GIRDHAR, 2004).

A principal desvantagem é que a manutenção de rotina pode alterar o desempenho da máquina, agendando tarefas de manutenção muito cedo ou muito tarde. O equipamento deve ser retirado para a revisão após um determinado número de horas de funcionamento. É possível que, sem qualquer evidência de falhas funcionais, os componentes sejam substituídos quando ainda há vida residual deixada neles. É, portanto, perfeitamente possível que a redução da produção possa ocorrer devido à desnecessária manutenção. Em muitos casos, há também a possibilidade da diminuição do desempenho devido a incorretos métodos de reparação. Em alguns casos, máquinas em perfeito estado são desmontadas, e suas boas partes removidas e descartadas, e novas peças são instaladas inadequadamente com resultados problemáticos (GIRDHAR, 2004).

A manutenção Preventiva ou Manutenção Orientada por Tempo resulta em um excesso de inspeções, isto é, inspeção da instalação a intervalos de tempo pré-estabelecidos. As máquinas entram em revisão, em sincronismo com o planejamento da produção. Elas são paradas, precisam ser desmontadas, componentes devem ser inspecionados, peças são trocadas devido a condições de desgaste, dano ou simplesmente porque expirou o prazo previsto para a sua troca. O procedimento desperdiça tempo e dinheiro.

A manutenção preventiva pode ser aplicada quando existe escassez de conhecimento de danos, em máquinas complexas que devem satisfazer altos requisitos de confiabilidade, sendo que alguns exemplos são turbo-máquinas em usinas de geração de energia e em aviões.

### 2.2.3 Manutenção Proativa

A manutenção proativa cria ações conetivas que objetivam as causas da falha-raiz, não apenas sintomas. Seu objeto central é aumentar a vida da máquina mecânica ao invés de fazer

reparos quando em geral nada está quebrado, aceitar a falha como rotina e normal substituindo a manutenção de falha de crise pela manutenção de falha programada.

Tal como no programa orientado no tempo, é possível programar os reparos de manutenção em equipamento de forma ordenada, mas são necessários esforços adicionais para fornecer melhorias para reduzir ou eliminar os potenciais problemas que ocorrem repetidamente.

Novamente, o planejamento adequado da manutenção de tempo permite levar à compra de peças para as reparações necessárias. Isto reduz a necessidade de um grande estoque de peças de reposição, porque o trabalho de manutenção é executado somente quando for necessário. Esforços adicionais são feitos para investigar minuciosamente a causa da falha e determinar formas de melhorar a confiabilidade da máquina. Todos estes aspectos levam a um aumento substancial na capacidade de produção.

A desvantagem é que os funcionários necessitam ser extremamente conhecedor das práticas de manutenção preventiva, preditiva e pró-ativa. É também possível que o trabalho pode exigir os fornecedores de *outsourcing*<sup>1</sup> experientes, que terão que trabalhar estreitamente com o pessoal da manutenção na fase de análise da origem da causa das falhas. Manutenção pró-ativa também requer aquisição de equipamento especializado e pessoal devidamente treinado para executar todas estas funções.

### 2.3 CONCEITO DE MANUTENÇÃO PREDITIVA

A filosofia subjacente à manutenção preditiva consiste em programar as atividades de manutenção somente quando uma falha funcional é detectada. Pois essa indica as condições reais de funcionamento das máquinas com base em dados que informam o seu desgaste ou processo de degradação. Trata-se da manutenção que prediz o tempo de vida útil dos componentes das máquinas e equipamentos e as condições para que esse tempo de vida seja bem aproveitado (GIRDHAR, 2004).

Condições mecânicas e operacionais são periodicamente monitoradas, e quando as tendências são detectadas insalubres, as peças incômodas na máquina são identificadas e programadas para manutenção. A máquina seria, então, desligada no momento em que for mais conveniente, e os componentes danificados serão substituídos, se deixadas sem monitoração, estas falhas podem resultar em falhas secundárias.

---

<sup>1</sup> *Outsourcing* designa a ação que existe por parte de uma organização em obter mão-de-obra de fora da empresa, ou seja, mão-de-obra terceirizada. Está fortemente ligada a idéia de sub-contratação de serviços.

A prática da manutenção preditiva ou condicional envolve três fases: detecção do defeito, estabelecimento de diagnóstico e estabelecimento de prognóstico. A figura 2 apresenta um diagrama evolutivo do processo envolvendo as três fases desta manutenção (Souza, 2008).

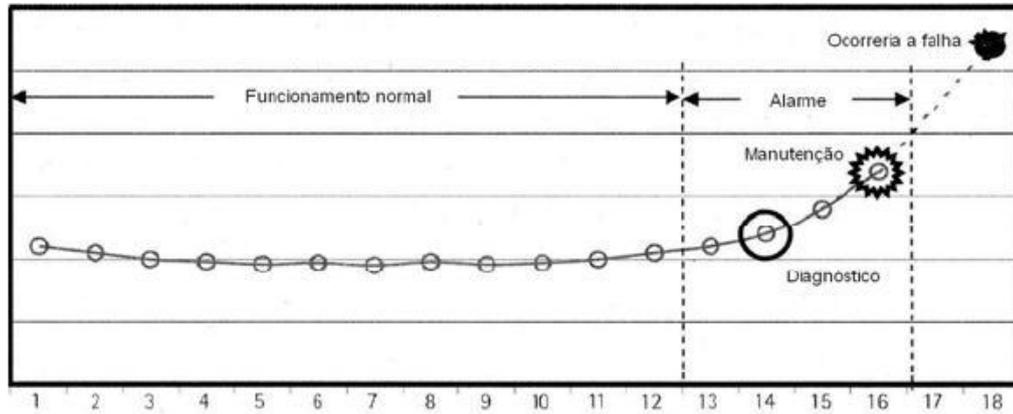


Figura 2 - Processo evolutivo da manutenção preditiva. Fonte: (SOUZA,2008)

A detecção do defeito consiste na observação de que os valores medidos dos parâmetros de controle indicam uma evolução mais acelerada que a decorrente da degradação normal do equipamento (SOUZA, 2008).

O objetivo da manutenção preditiva consiste em disponibilizar os meios produtivos e auxiliares, na quantidade necessária e em condições operacionais adequadas, para executar as missões que lhe são atribuídas, isso se referindo ao processo de manutenção.

A manutenção preditiva baseia-se na aquisição de sinais do equipamento que possam permitir uma análise da sua condição. Pode-se ter qualquer valor de desgaste emitido de alguma forma pela máquina, como um valor mensurável para avaliar sua condição, como por exemplo, vibração, temperatura, ruído, análise de óleo e partículas, ultra-som, etc. Sendo necessário apenas que os equipamentos de coleta de dados sejam confiáveis e robustos, capazes de suportar os rigores do trabalho diário, em ambientes agressivos.

A premissa da manutenção preditiva é que o monitoramento regular das condições mecânicas reais das máquinas e do rendimento operativo dos sistemas de processo assegurará o intervalo máximo entre os reparos. Ela também minimizará o número e o custo das paradas não programadas criadas por falhas da máquina e melhorará a disponibilidade global das plantas operacionais. A inclusão da manutenção preditiva em um programa de gerência da planta oferecerá a capacidade de aperfeiçoar a disponibilidade da maquinaria de processo e reduzirá bastante o custo da manutenção. Na realidade, a manutenção preditiva pode ser vista como um programa de manutenção preventiva acionada por condição (ALMEIDA, 2009).

Almeida (2009), em seu trabalho, mostra que a manutenção preditiva traz benefícios na redução de falhas das máquinas e nos custos de parada para reparo, devido ao monitoramento regular das máquinas e na análise das condições das máquinas que identificaram o(s) componente(s) específico(s) com falha; e habilita o pessoal de manutenção a planejar cada reparo; e devido à capacidade de se predeterminar as peças defeituosas, ferramentas e as habilidades de mão-de-obra requeridas, reduzem o estoque de peças sobressalentes. Ao invés de adquirir todas as peças de reparo para estoque, as plantas industriais pesquisadas tem tempo marginal suficiente para encomendar as peças de reparo ou de substituição, conforme necessário.

Com o cálculo da frequência de reparos, da severidade dos danos da máquina, e da condição real do maquinário após reparo, é possível diagnosticar o aumento da vida operacional útil com a manutenção preditiva, o que possibilitou a redução da severidade dos danos nas máquinas (ALMEIDA, 2009).

Além do que, Almeida (2009) ressalta que há um aumento da produtividade por reduzir o tempo de paradas nas máquinas, bem como um aumento na segurança reduzindo a o risco de falhas destrutivas.

#### 2.4 BENEFÍCIOS DO SISTEMA DE DIAGNÓSTICO PARA MANUTENÇÃO PREDITIVA

Uma das vantagens dessa de usar a manutenção preditiva é que os eventos de manutenção podem ser agendados de forma ordenada, permitindo o *lead-time*<sup>2</sup> de compra para peças necessárias para os trabalhos de reparação e, assim, reduzindo a necessidade de um grande estoque de peças sobressalentes.

Outra vantagem é que a investigação e a análise da manutenção preditiva de um equipamento elétrico possibilitam que todos os dados de sua condição de operação sejam visualizados pelo gerente de manutenção enquanto o equipamento elétrico estiver sendo utilizado.

No final da década de 90, foi publicado pelo IEEE (1999), um documento mapeando os potenciais benefícios da utilização da monitoração permanente com sistemas de diagnóstico

---

<sup>2</sup> *Lead-Time* ou tempo de aprovisionamento é um dos conceitos mais importante da logística. É o tempo de compra mais o tempo de transporte. No contexto, é o tempo das compras do material para manutenção e a manutenção. Deve ser levado em consideração em todas as atividades, pois está associado ao custo da operação.

preditivo em usinas geradoras de energia elétrica, em uma forma resumida analisada Freitas *et al.* (2008), são :

- a) Redução na frequência de parada para inspeção;
- b) Redução na frequência de parada para manutenção;
- c) Redução na frequência de parada para reparo;
- d) Redução na frequência de parada forçada;
- e) Redução no derramamento de água;
- f) Redução no homem-hora de manutenção;
- g) Aumento da eficiência operativa da unidade geradora;
- h) Aumento da capacidade da unidade geradora;
- i) Aumento da segurança dos equipamentos;
- j) Aumento da segurança pessoal;
- k) Redução do estoque de peças sobressalentes;
- l) Aumento da habilidade de operação e manutenção;
- m) Aumento da vida útil da planta;
- n) Operação desassistida de geradores.

## 2.5 CONCLUSÃO DO CAPITULO 2

Como Mobley, Higgins e Wikoff (2008) apresentam em *Maintenance Engineering Handbook*, a manutenção é como uma ciência, já que depende da execução, mais cedo ou mais tarde, da maioria ou da totalidade das ciências. É uma arte, porque os problemas aparentemente idênticos demandam regularmente e recebem diferentes abordagens e ações, porque alguns gerentes, supervisores e técnicos de manutenção mostram maior aptidão em atingi-la. É, sobretudo, uma filosofia, porque é uma disciplina que pode ser aplicado de forma intensiva, modestamente, ou nada, dependendo de uma vasta gama de variáveis que freqüentemente transcendem as soluções mais imediatas e óbvias. Além disso, a manutenção é uma filosofia porque ela deve ser tão cuidadosamente montada para a operação ou organização.

O que nos remete a afirmar, que como Mobley (2002), a manutenção não é apenas manutenção preventiva, embora este aspecto seja um ingrediente importante. Manutenção não é a lubrificação, embora a lubrificação seja uma de suas principais funções. Nem é simplesmente uma corrida frenética para reparar uma peça de máquina quebrada ou um segmento de construção, embora isso seja muitas vezes a atividade de manutenção dominante.

Contudo, a monitoração da condição dos equipamentos tem recebido grande atenção em virtude do crescimento do consumo de energia, necessitando de novos e urgentes investimentos na área de energia elétrica, o que faz aumentar a importância da manutenção preditiva que visa diminuir paradas desnecessárias.

### 3 LÓGICA FUZZY

#### 3.1 INTRODUÇÃO

A teoria dos conjuntos *fuzzy* foi introduzida em 1965 pelo professor Lotfi A. Zadeh, como extensão dos conjuntos clássicos. A abordagem, desenvolvida por Zadeh, fornece uma ferramenta para modelagem de sistemas “*centrado-humano*” (KLIR e YUAN, 1995). Pelo fato de que a imprecisão parece permear a maioria da percepção humana, processos de pensamento, e a capacidade da mente humana de raciocinar e aprender em um ambiente de incerteza e imprecisão (KLIR e YUAN, 1995; KONAR, 2006).

A incerteza nos dados, presente nas informações a serem processadas durante a solução de uma grande variedade de problemas, tem sido representada e tratada utilizando modelos estatísticos, a teoria da probabilidade e processos estocásticos. Apesar de bastante útil, estas teorias e modelos podem não ser capazes de perceber e representar adequadamente diversos aspectos das informações fornecidas por especialistas humanos (MEZA, 2006). O que favorece a lógica *fuzzy*, pois se adéqua ao raciocínio incerto ou aproximado, especialmente para o sistema cujo modelo matemático é difícil de calcular.

A lógica *fuzzy*, permite tomada de decisões, com valores estimados com base nas informações incompletas. Note-se que a decisão não pode ser correta, e isso pode ser mudado em um momento posterior, quando a informação adicional estiver disponível (MUNAKATA, 2008). Para os problemas difíceis, métodos convencionais não-*fuzzy* são geralmente caros e dependem de aproximações matemáticas, o que pode levar ao mau desempenho. Por exemplo, sob tais condições, sistemas de controle *fuzzy* muitas vezes superam os métodos convencionais de controle, tais como o controle PID (controle proporcional, integral e diferencial) (IBRAHIM, 2004).

O que está por trás de toda essa versatilidade da utilização da teoria *fuzzy* é a possibilidade de modelar e manipular matematicamente informações vagas e imprecisas, naturais da linguagem humana e, portanto, as fornecidas pelos especialistas (não matemáticos) ao caracterizar os processos estudados.

Esta manipulação é feita a partir da composição de variáveis escolhidas para modelar matematicamente o processo em questão, quando a implicação das variáveis independentes nas dependentes é estabelecida por um conjunto de regras lingüísticas baseadas no conhecimento de especialistas (MUNAKATA, 2008).

As técnicas da teoria dos conjuntos *fuzzy* têm alcançado as mais diversas áreas de aplicação. Uma das mais aprofundadas é de controle *fuzzy*, que tem possibilitado a automação de diversos processos, que vão de tarefas domésticas a controle de sofisticados processos industriais. Outras são: em sistemas especialistas *fuzzy*, que pode utilizar regras *fuzzy if-then* (se-então); "engenharia de software", que pode incorporar imprecisões em seus programas e dados; bancos de dados nebulosos que armazenam e recuperam informações *fuzzy*; modelo *fuzzy* para reconhecimento de padrões, que lida com sinais visuais ou de áudio; aplicações à medicina, economia e os problemas de gestão que envolvem o processamento de informações difusas (MUNAKATA, 2008).

### 3.2 FUNDAMENTOS DA LÓGICA FUZZY

A idéia fundamental comum a todos estes domínios *fuzzy* é a exploração de conceito de imprecisão. O conceito-chave da indefinição é que permite que um processo gradual e de transição contínua, digamos, de 0 a 1, e não uma mudança abrupta e nítida entre valores binários 0 e 1, o que expande as áreas tradicionais da lógica, incorporando a veracidade parcial (MUNAKATA,2008).

Na teoria clássica dos conjuntos, uma proposição é verdadeira ou falsa, ou seja, o conjunto de pertinência de um elemento A em um conjunto fica bem definido. Dado um conjunto A em um universo X, os elementos deste universo simplesmente pertencem ou não aquele conjunto. Isto pode ser expresso pela função característica  $f_A$  definida da seguinte maneira:

$$f_A(x) = \begin{cases} 1, & \text{se e somente se } x \in A \\ 0, & \text{se e somente se } x \notin A \end{cases} \quad (3.1)$$

Já no conjunto *fuzzy*, a função característica, proposta é generalizada de modo que ela possa assumir um numero infinito de valores no intervalo  $[0,1]$ . Um conjunto *fuzzy* A, em um universo X é definido por função pertinência  $\lambda_A(x): X \rightarrow [0,1]$ , representado por um conjunto de pares ordenados:

$$A = \{(x, \mu_A), x \in X\}, \quad (3.2)$$

Sendo que  $\mu_A(x)$  representa o valor da função pertinência do conjunto nebuloso A corresponde ao elemento x, ou seja, o quanto x é compatível com o conjunto A.

### 3.3 CONJUNTOS FUZZY

Um conjunto é uma coleção de objetos. Na teoria clássica, um objeto possui apenas duas possibilidades quanto à sua relação com um conjunto, ou seja, um dado objeto é ou não e um elemento do conjunto.

Os conjuntos *fuzzy* admitem a possibilidade de uma pertinência parcial. Um objeto possui variados graus de pertinência (NASCIMENTO e YONEYMA, 2002). Ou seja, é descrito por uma função que designa graus de pertinência entre zero e um aos seus elementos. Um elemento que tenha grau de pertinência igual a zero não pertence ao conjunto. Grau de pertinência igual a um, indica que o elemento pertence totalmente ao conjunto. Graus de pertinência entre zero e um significam que o elemento pertence parcialmente ao conjunto (DO VALE, 2003). Um exemplo é o conjunto de sensação térmica que é um conjunto onde o limite exato não pode ser precisamente definido.

Na lógica clássica um paciente é dito estar com febre se sua temperatura ultrapassar 37,8°C. Assim alguém que tenha 37,7°C não pertence ao conjunto de pacientes febris. Por outro lado, usando o conceito de conjuntos *fuzzy*, as imprecisões quanto ao que seria estado febril ficariam representadas por um grau de pertinência:

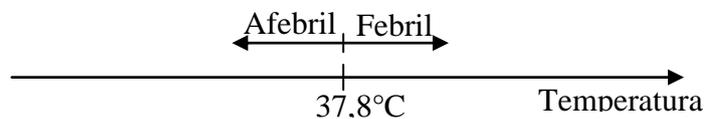
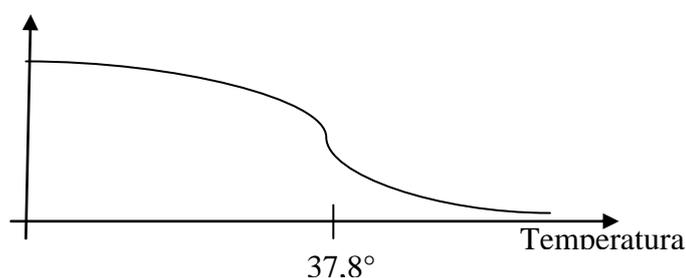


Figura 3 - Representação de condições por faixa precisamente definida. Fonte: (NASCIMENTO e YONEYAMA, 2002)

Matematicamente podemos definir um conjunto *fuzzy* da seguinte forma: Seja  $U$  uma coleção de objetos denotados genericamente por  $\{u\}$ , onde  $U$  é chamado de universo e  $u$  representa um elemento genérico de  $U$ . Um conjunto fuzzy  $F$  pertencente a um universo  $U$  é caracterizado por um grau de pertinência  $\mu_F$  que assume valores no intervalo  $[0, 1]$ , isto é:

Figura 4 Representação de condições afebril e febril utilizando pertinência. Fonte: (NASCIMENTO e YONEYAMA, 2002)



$$\mu_F: U \rightarrow [0,1] \quad (3.3)$$

Um conjunto *fuzzy*  $F$  em  $U$  pode ser representado como um conjunto de pares ordenados de um elemento genérico  $u$  e seu grau de pertinência  $\mu_F$  na função:

$$F = \{(u, \mu_F(u)) / u \in U\} \quad (3.4)$$

### 3.4 FUNÇÃO PERTINÊNCIA FUZZY

As funções de pertinência representam os aspectos fundamentais de todas as ações teóricas e práticas de sistemas *fuzzy*. Uma função de pertinência é uma função numérica gráfica ou tabulada que atribuem valores de pertinência *fuzzy* para valores discretos de uma variável, em seu universo de discurso (SIMÕES e SHAW,2007).

Existem diferentes tipos de funções de pertinências: triangular, trapezoidal, gaussiana, exponencial, entre outras. As mais comuns são a funções de pertinência triangular e trapezoidal. A Figura 5 mostra as características da função pertinência para a variável temperatura de um determinado processo, na qual a temperatura está em graus Celsius, variando de 0 a maior do que 75.

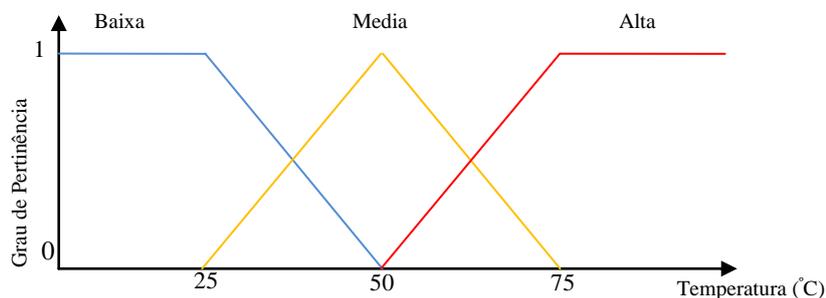


Figura 5 - Funções pertinência em um conjunto fuzzy

O grau de pertinência é determinado pela projeção horizontal do parâmetro de entrada do eixo horizontal no limite mais alto da função de pertinência, o qual tem valores entre 0 e 1.

### 3.5 OPERAÇÕES COM CONJUNTOS FUZZY

A operação com lógica *fuzzy*, ou operação de agregação, consiste em definir uma função de transferência que combinem conjuntos *fuzzy* distintos em um único conjunto, ou seja, aplicar parcialmente ou simultaneamente um mesmo atributo à função de transferência (agregação dos  $n$  conjuntos) gerando um novo conjunto.

As operações que utilizam a lógica *fuzzy* são derivadas da teoria dos conjuntos clássicas e são baseadas nos conceitos de pertinência. Essas operações são listadas a seguir, considerando dois conjuntos A e B os quais estão contidos no universo U:

**a) Igualdade**

Se para todo  $x \in U$ ,  $\mu_A(x) = \mu_B(x)$ , então diz-se que o conjunto A é igual ao conjunto B.

**b) Subconjunto**

Se para todo  $x \in U$ ,  $\mu_A(x) \leq \mu_B(x)$ , então diz-se que o conjunto B contém o conjunto A, isto é,  $A \subset B$ .

**c) Complementar**

O conjunto complementar de A, denotado por  $\bar{A}$ , é definido pela seguinte função de pertinência:

$$\mu_{\bar{A}}(x) = 1 - \mu_A(x) \quad (3.6)$$

**d) União**

A operação de união entre conjuntos *fuzzy* é semelhante à operação de união entre conjuntos clássicos, onde a união de dois conjuntos, por exemplo, A e B, seria dada pelo menor conjunto formado pelos elementos de ambos os conjuntos da união. A união *fuzzy* pode ser escrita em termos das funções de pertinências de A e B como:

$$\mu_{A \cup B}(x) = \max[\mu_A(x), \mu_B(x)] \quad (3.7)$$

A Figura 6 ilustra tal representação, onde pode-se observar a operação de união de conjunto *fuzzy*.

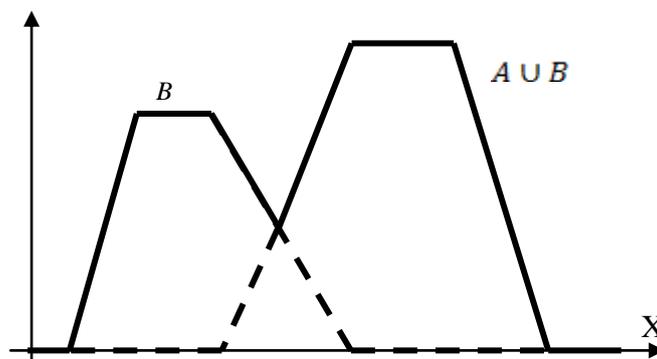


Figura 6 - União de conjuntos fuzzy.

**e) Intersecção**

Assim como a operação de união, a intersecção pode ser derivada da operação de intersecção entre conjuntos clássicos, onde a intersecção de dois conjuntos, por exemplo, A e B, seria dada pelo maior conjunto formado pelos elementos comuns a ambos conjuntos da intersecção. A intersecção *fuzzy* pode ser escrita em termos das funções de pertinências de A e B como:

$$\mu_{A \cap B}(x) = \min[\mu_A(x), \mu_B(x)] \quad (3.8)$$

A figura 7 ilustra tal representação, onde pode-se observar a operação de intersecção do conjunto *fuzzy*.

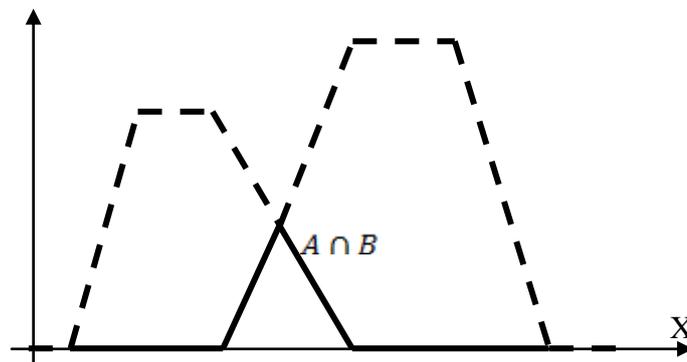


Figura 7 - Intersecção de conjunto fuzzy

#### f) Normas-s

São mapeamentos do tipo  $s: [0,1] \times [0,1] \rightarrow [0,1]$  que combinam as funções de pertinências de dois conjuntos *fuzzy* A e B, resultando na função de pertinência generalizada do conjunto  $A \cup B$ , isto é:

$$s[\mu_A(x), \mu_B(x)] = \mu_{A \cup B}(x) \quad (3.9)$$

Entretanto, para que o mapeamento s seja considerado como união ele deve satisfazer as seguintes condições:

- i)  $s[1,1] = 1, s[a,0] = a$
- ii)  $s[a,b] = s[b,a]$
- iii)  $s[a,b] \leq s[a',b'],$  se  $a < a'$  e  $b < b'$
- iv)  $s[s[a,b],c] = s[a,s[b,c]]$

Na prática, os mapeamentos normas-s mais utilizados são o operador máximo que foi definido na equação (3.7) e a soma limitada que é apresentada a seguir.

$$\mu_{A \cup B}(x) = \min[\mu_A(x) + \mu_B(x), 1] \quad (3.10)$$

### g) Normas-t

São mapeamentos do tipo  $t: [0,1] \times [0,1] \rightarrow [0,1]$ , que combinam as funções de pertinências de dois conjuntos *fuzzy* A e B, resultando na função de pertinência generalizada do conjunto  $A \cap B$ , isto é:

$$t[\mu_A(x), \mu_B(x)] = \mu_{A \cap B}(x) \quad (3.11)$$

Entretanto, para que o mapeamento t seja considerado como intersecção ele deve satisfazer as seguintes condições:

- (i)  $t[0,0] = 0, t[a,1] = a$
- (ii)  $t[a,b] = t[b,a]$
- (iii)  $t[a,b] \leq t[a',b'],$  se  $a < a'$  e  $b < b'$
- (iv)  $t[t[a,b],c] = t[a,t[b,c]]$

Na prática, os mapeamentos normas-t mais utilizados são o operador mínimo que foi definido na equação (3.8) e o produto algébrico que é apresentado a seguir:

$$\mu_{A \cap B}(x) = \mu_A(x) \cdot \mu_B(x) \quad (3.12)$$

## 3.6 VARIÁVEIS LINGÜÍSTICAS

A elaboração da teoria de Zadeh foi motivada, em grande parte, pela convicção de que os métodos tradicionais de análise eram inadequados para descrever sistemas nos quais as variáveis não estivessem relacionadas por equações diferenciais. Tais sistemas são comuns em: biologia, sociologia, economia, e mais genericamente, em campos nos quais os sistemas são de natureza mais humanística. Os métodos tradicionais de análise são voltados para o uso de técnicas numéricas. Em contraste, na maioria das vezes, a razão humana envolve o uso de variáveis cujos valores são conjuntos nebulosos (ou *fuzzy*). Essa observação foi a base para a introdução da variável lingüística, isto é, uma variável cujos valores são palavras em lugar de números. Como exemplos podem ser citados alguns conceitos peculiares à linguagem humana: quente, morno, muito longe, mais ou menos próximo, quase impossível, improvável, meia idade, etc (KONAR,2006).

A lógica *fuzzy* apresenta abordagens que permitem representar expressões descritivas ou qualitativas, tais como "lento" ou "moderadamente rápido" e são facilmente incorporados com afirmações simbólicas. Estas expressões e representações são mais naturais do que equações matemáticas para muitos humanos como regras de julgamento e declarações (MUNAKATA,2008).

Na lógica *fuzzy*, temperatura de um processo ou estatura de uma pessoa são variáveis lingüísticas que podem assumir valores como baixa, média e alta. Estes valores são descritos por intermédio de conjuntos nebulosos, representados por funções pertinência.

Os valores de uma variável lingüística podem ser sentenças em uma linguagem especificada, construídas a partir de termos primários (alto, baixo, pequeno, médio, grande), de conectivos lógicos (NOT, AND e OR), ou de modificadores (muito, pouco, levemente, extremamente).

### 3.7 SISTEMA FUZZY

O Sistema *fuzzy* é um modo fácil de agregar conhecimento de diversos especialistas. A estrutura do sistema *fuzzy* consiste em módulos: *fuzzyficação* das variáveis de entrada, base de regras, inferência e a *defuzzyficação*.

As informações *não-fuzzy*, com valores reais, são convertidas para a linguagem de conjuntos *fuzzy* no módulo denominado *fuzzificador*. A inferência combina, através de preceitos lógicos, as informações advindas da base de regras e do *fuzzificador*, de modo a fornecer uma decisão. Como esta é de caráter *fuzzy*, geralmente é necessário efetuar uma interpretação de modo à converte-la para um valor real e lingüísticos. Este procedimento é efetuado pelo *defuzzificador*. A figura 8, a seguir, mostra a representação de um sistema *fuzzy*, com os seus diversos módulos.

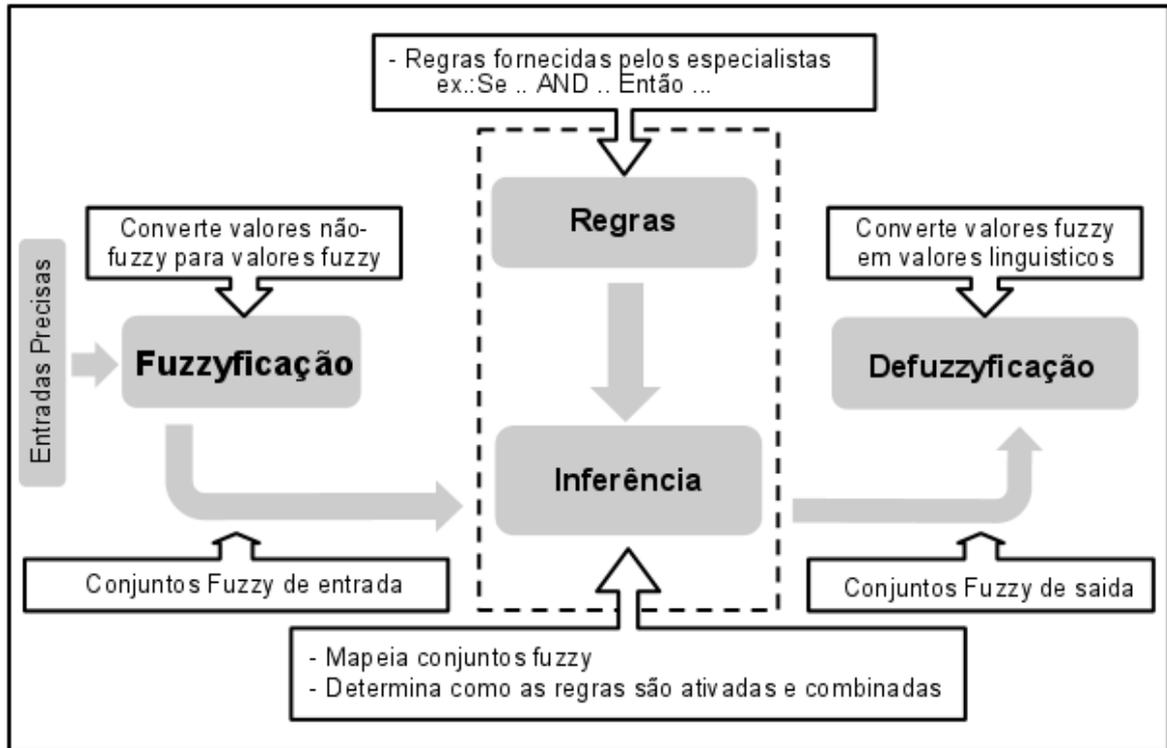


Figura 8 - Representação do sistema *fuzzy*. Fonte: ( WANG,1997 )

O sistema *fuzzy* pode ser definido pela característica do tipo de inferência que é utilizado. São popularmente difundidos dois tipos de inferência fuzzy: o tipo *Mandani* e *Sugeno*.

O tipo de inferência proposto por *Mandani* é considera uma função de pertinência na saída com certo perfil, de modo que a saída “desfuzzificada” pode ser obtida através das propriedades de área das saídas agregadas de todas as regras (FUJIMOTO,2005).

O tipo *Sugeno* pode ser usado para qualquer modelo de sistema de inferência de que as funções de pertinência de saída são lineares ou constantes. Deste modo, tem-se que para um modelo fuzzy *Sugeno* de ordem zero, a regra de inferência toma o seguinte perfil:

$$IF x \text{ é } A \text{ E/OU } y \text{ NÃO é } B \text{ E/OU... .. } w \text{ é } F \text{ ENTÃO } u = k,$$

sendo  $k$  é um valor constante dentro do universo de discurso da saída. As saídas deste processo podem ser denominadas *singletons*.

Outro tipo de modelo *Sugeno* utilizado é o de primeira ordem, cuja regra de inferência toma o seguinte perfil:

$$IF x \text{ é } A \text{ E/OU } y \text{ NÃO é } B \text{ E/OU... .. } w \text{ é } F \text{ ENTÃO } u = p.x+q.y+r ,$$

sendo  $p$ ,  $q$  e  $r$  constantes. Neste modelo, considera-se que os *singletons* deslocam-se dentro do universo de discurso conforme as entradas do sistema *fuzzy*. Deste modo, além da amplitude da saída depender da entrada, a sua localização no universo de discurso também dependerá.

### 3.7.1 Fuzzyficador

A *fuzzyficação* de dados é a conversão de dados de entrada em valores *fuzzy* através de mapeamento de numero reais para conjuntos *fuzzy*.

As etapas da *fuzzyficação* são:

- (i) Aquisição dos valores numéricos das variáveis de entrada (valores reais);
- (ii) Mapear os valores destas variáveis para o universo de discurso  $U$ ;
- (iii) Determinar a função pertinência e as variáveis lingüísticas;

O mapeamento das variáveis é caracterizado pela função de pertinência  $\mu_A(x) \rightarrow [0, 1]$ . Os tipos de *fuzzyficação* mais comuns são: *fuzzificador singleton* (converte um valor real em um conjunto *fuzzy singleton*) gaussiano, triangular, vetor de possibilidades e *fuzzyficação* por tabela em memória.

- **Fuzzificador singleton**

$$\mu_{A'}(x) = \begin{cases} 1 & \text{se } x = x^* \\ 0 & \text{se } x \neq x^* \end{cases} \quad (3.13)$$

- **Fuzzificador gaussiano**

$$\mu_{A'}(x) = e^{-\left(\frac{x_1 - x_1^*}{a_1}\right)^2} \cdot \dots \cdot e^{-\left(\frac{x_n - x_n^*}{a_n}\right)^2} \quad (3.14)$$

- **Fuzzificador triangular**

$$\mu_{A'}(x) = \begin{cases} \left(1 - \frac{|x_1 - x_1^*|}{b_1}\right) \cdot \dots \cdot \left(1 - \frac{|x_n - x_n^*|}{b_n}\right) & \text{se } x = |x_i - x_i^*| \leq b_i \\ 0 & \text{se } x = |x_i - x_i^*| > b_i \end{cases} \quad (3.15)$$

### 3.7.2 Regras Fuzzy

As regras *fuzzy* têm o potencial de adicionar recursos humanos como fundamentação subjetiva para inteligências de máquinas, que geralmente são baseadas na lógica booleana bivalente. Os seres humanos tomam decisões com base em regras. Ou simplesmente em

formas do tipo *se-então*. Exemplificando, se o tempo estiver bom, então nós podemos decidir sair. Se a previsão diz que o clima será ruim hoje, mas amanhã muda, então tomamos a decisão de não ir hoje, e adia-lo até amanhã. Regras de associar idéias e relacionar um evento para outro.

A base de regra de um sistema fuzzy consiste na coleção de regras “se-então”:  
 $R^{(l)}: SE x_1 \text{ é } A_1^l E \dots E x_n \text{ é } A_n^l ENTÃO y \text{ é } B^l$ , sendo  $l = 1, 2, \dots, M, A_1^l, B^l$  os conjuntos fuzzy em  $U_i \subset R$  e  $U \subset R$ , ( $R$  representa os conjuntos dos números reais) respectivamente,  $x = col(u_1, \dots, u_n) \in U_1 \times \dots \times U_n$ , e  $y \in V$  ( $x$  e  $y$  são variáveis linguísticas). Nesta base de regras está armazenado o conhecimento de um especialista que modela todo o comportamento do sistema fuzzy (PEREIRA, 2005).

### 3.7.3 Operador THEN

Além dos operadores lógicos de interseção, união e complemento, existe outro operador que é necessário definir, o operador THEN. Este operador define a implicação de cada regra sobre umas dadas variáveis linguística da saída, ou seja, ele relaciona a oração antecedente e a conseqüente. Esta influência pode ser definida pelas operações apresentadas na Tabela 1. Nesta tabela, forma utilizadas as seguintes definições:  $\mu_{CFR}$  é a função de pertinência de saída da regra de inferência após aplicar o operador THEN;  $\mu_{CFS}$  é a função de pertinência de saída.

Tabela 1- Opção de operador THEN.

	<i>THEN/Implicação(<math>\leftarrow</math>)</i>
<i>Mínimo</i>	$\mu_{CFR}[x_i] \leftarrow \min(\mu_{PT}, \mu_{CFS}[x_i])$
<i>Produto</i>	$\mu_{CFR}[x_i] \leftarrow \mu_{PT} \times \mu_{CFS}[x_i]$

### 3.7.4 Operador de Agregação

Outro operador necessário em um sistema de inferência *fuzzy* é o de agregação de regras. Este operador une a influência de todas as regras obtidas após aplicação do operador THEN sobre o resultado final apresentando a conseqüência do sistema como um todo devido às entradas do sistema *fuzzy*. Estas conseqüências são definidas pelas funções apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 - Opção de operador agregação, sendo  $\mu_{CFF}$  as funções de pertinência resultante do sistema fuzzy.

	Agregação( $\leftarrow$ )
Máxima	$\mu_{CFF}[x_i] \leftarrow \max_{j=1}^n (\mu_{CFRj}[x_i])$
Soma	$\mu_{CFF}[x_i] \leftarrow \min\left(1, \sum_{j=1}^n \mu_{CFRj}[x_i]\right)$

### 3.7.5 Inferência Fuzzy

Inferência *fuzzy* é o sistema de controle que dirige a implementação do conhecimento. Ela decide quais técnicas de busca heurística são usadas para determinar como regras na base de conhecimento são aplicadas para o problema (KONAR, 1999).

BATOCCHIO (1993) define que a inferência é um protocolo de programa para navegar através das regras e dados da representação do conhecimento para resolver o problema, concretizando a dedução.

O processo de inferência *fuzzy* envolve todos os itens: funções pertinência, operações lógicas, e regras *fuzzy*. Dividido em cinco etapas extraídas de Fujimoto (2005):

1. Fuzzificação de entrada
2. Aplicação dos operadores *fuzzy* AND e/ou OR e/ou NOT
3. Aplicação do operador THEN (Implicação)
4. Agregar as saídas de todas as regras (Operador de Agregação)
5. Defuzzificação

A Figura 9 melhor representa o processo de inferência:

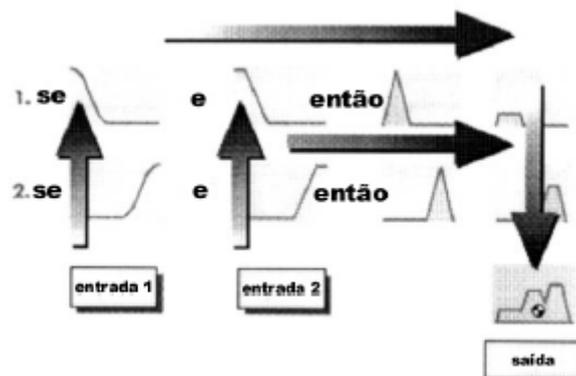


Figura 9 - Diagrama do processo de inferência fuzzy Fonte: (FUJIMOTO,2005)

A tarefa da inferência *fuzzy* é selecionar, e então aplicar a regra mais apropriada em cada passo da execução do SE. Atuando sobre uns conjuntos de regras (base de regras). Sua

construção é realizada através do mapeamento de entrada (antecedentes) e saída (conseqüentes) de um sistema *fuzzy*. Nesta fase, que denominamos de inferência, ocorrem às operações com os conjuntos *fuzzy*, nos quais se combinam as variáveis da parte antecedentes das regras ativas, realiza-se a implicação e agrega-se o resultado de todas as regras.

### 3.7.6 Defuzzyficador

Etapa no qual os conjuntos resultantes são convertidos em valores para a variável de saída do sistema. Etapa a qual corresponde a ligação funcional entre o conjunto *fuzzy* e o valor esperado.

Em Simão e Shaw , 2007 definem a defuzzyficação como uma tradução num valor discreto o valor da variável linguística de saída inferida pelas regras *fuzzy*, com o objetivo de obter-se um único valor numérico discreto que melhor represente os valores *fuzzy* inferidos da variável linguística de saída , ou seja , distribuição de possibilidade. Assim a defuzzyficação é uma transformação inversa que traduz a saída do domínio *fuzzy* para o dominio discreto.

A seguir são mostrados alguns métodos de defuzzyficação muitos utilizados:

#### a) Defuzzificação Centro da Área (C-o-A).

O método centro de área é freqüentemente chamado de método de centro de gravidade, pois ele calcula o centróide da área composta que representa o termo de saída *fuzzy*, esse termo de saída *fuzzy* é composto pela união de todas as contribuições de regras. O centróide é um ponto que divide a área que representa o termo de saída *fuzzy* em duas partes iguais.

$$u^* = \frac{\sum_{i=1}^N u_i * \mu_{our}(u_i)}{\sum_{i=1}^N \mu_{our}(u_i)} \quad (3.16)$$

#### b) Defuzzificação Centro do Máximo ou Média dos Centros (C-o-M).

Neste método os centros das funções de pertinência representados no universo de discurso da variável de saída são usados no lugar das áreas de cada função de pertinência.

$$u^* = \frac{\sum_{j=1}^N u_i \sum_{k=1}^N u_{OUT}(u_i)}{\sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^N u_{OUT}(u_i)} \quad (3.17)$$

Como é possível observar as equações 3.16 e 3.17 são semelhantes, exceto que equação 3.16 usa áreas de cada função de pertinência, enquanto a equação 3.17 usa apenas seus máximos.

A defuzzyficação por centro do maximo representa um melhor comprometimento entre possíveis possíveis saídas com multipicidade de disparo de conjuntos fuzzy.

c) Defuzzificação Média do Máximo (M-oM).

Neste caso a saída é dada pela média entre os valores que apresentam o máximo grau de pertinência. No caso de algumas utilizações só há um valor de máxima pertinência. Entretanto, é comum haver mais de um valor com máxima pertinência. Por este critério, a saída seria dada pela média entre esses valores.

$$u^* = \sum_{m=1}^M \frac{u_m}{M} \quad (3.17)$$

### 3.8 CONCLUSÃO

A lógica *fuzzy* é capaz de expressar de uma maneira sistemática quantidades imprecisas, vagas e mal-definidas (SIMÕES e SHAW,2007). Para o diagnóstico em hidrogeradores utilizar as lógica fuzzy em vez de um modelo matemático significa usar os investimentos com o conhecimento experimental dos técnicos da Eletronorte nas plantas indústrias, com processos complexos e sistemas com dinâmica desconhecidos. Esses técnicos sabem qual ação tomar, quando observam certas condições, tais como combinação de leitura de instrumentos, padrões indicados por sinais, gráficos , temperatura, ou outros eventos. Assim a vantagem do sistema fuzzy é permitir que regras heurísticas possam capturar tais estratégias de diagnóstico dos técnicos automatizando o que era feito manualmente.

## 4 ANÁLISE DO SISTEMA DE AUXÍLIO AO DIAGNÓSTICO

### 4.1 INTRODUÇÃO

Este capítulo apresenta todos os passos e decisões tomadas para desenvolver o sistema, como foi planejada a sua implementação e o que o *software* atende.

Toda a análise foi concebida como parte de um projeto de pesquisa com a Eletronorte, em desenvolver um sistema de diagnóstico e base de conhecimento para auxílio à manutenção preditiva de hidrogeradores. Conforme foi discutido, no capítulo 2, a manutenção preditiva necessita para sua maior eficiência de um componente computacional relacionado a instrumentação, redes industriais e dados de monitoramento, para ser automatizado uma detecção de falhas e prováveis fontes do problema.

O sistema de auxílio à manutenção preditiva em hidrogeradores foi desenvolvido com o intuito de servir primeiramente como uma ferramenta de auxílio na tomada de decisão da equipe responsável pela manutenção desses equipamentos. Além disso, pode ser utilizada como uma ferramenta de treinamento para iniciantes e também servir para testes de validação de regras, pois possibilita que o usuário entre com variáveis em simulações (a partir de dados fictícios das variáveis monitoradas).

Desenvolvido utilizando a linguagem de programação gráfica da *National Instruments*, o sistema de diagnóstico é composto por dois módulos, o módulo de diagnóstico com dados reais e um módulo de validação. O módulo de diagnóstico se comunica com os sistemas que fazem o monitoramento do hidrogerador, sendo que o acesso aos dados dos sistemas é feito através de banco de dados SQL Server<sup>3</sup>. O módulo de validação, usado para teste, em regime *off-line*, na qual os valores de entrada são inseridos pelo usuário.

### 4.2 METODOLOGIA DE DESENVOLVIMENTO DE SOFTWARE

Este sistema de auxílio ao diagnóstico foi pioneiro dentro da Eletronorte, ao utilizar a metodologia de desenvolvimento de *software* da própria empresa, objetivando a qualidade dos *softwares* do Centro de Tecnologia. Para que este sistema de auxílio ao diagnóstico pudesse seguir a metodologia da Eletronorte foram feitas algumas adaptações e alterações na modelagem do processo de desenvolvimento aderente a metodologia, visando atender a

---

<sup>3</sup> Servidor de banco de dados da *Microsoft*

criação de um sistema especialista, que é diferente dos demais softwares comuns por ter suas funcionalidades fortemente dependente de entrevistas, treinamentos, pesquisas e reuniões voltadas para o levantamento de conhecimento e não dos requisitos, pois a maior parte dos esforços esta concentrada em ter uma base de conhecimento sobre as partes do hidrogeradores representadas em regras refinadas e consistentes.

O processo de desenvolvimento do sistema especialista foi dividido em seis etapas: avaliação, aquisição de conhecimento, projeto, teste , documentação e manutenção. A Figura 9 abaixo descreve as seis etapas , modeladas de acordo com a metodologia do LACEN (Laboratório Central da Eletronorte) .

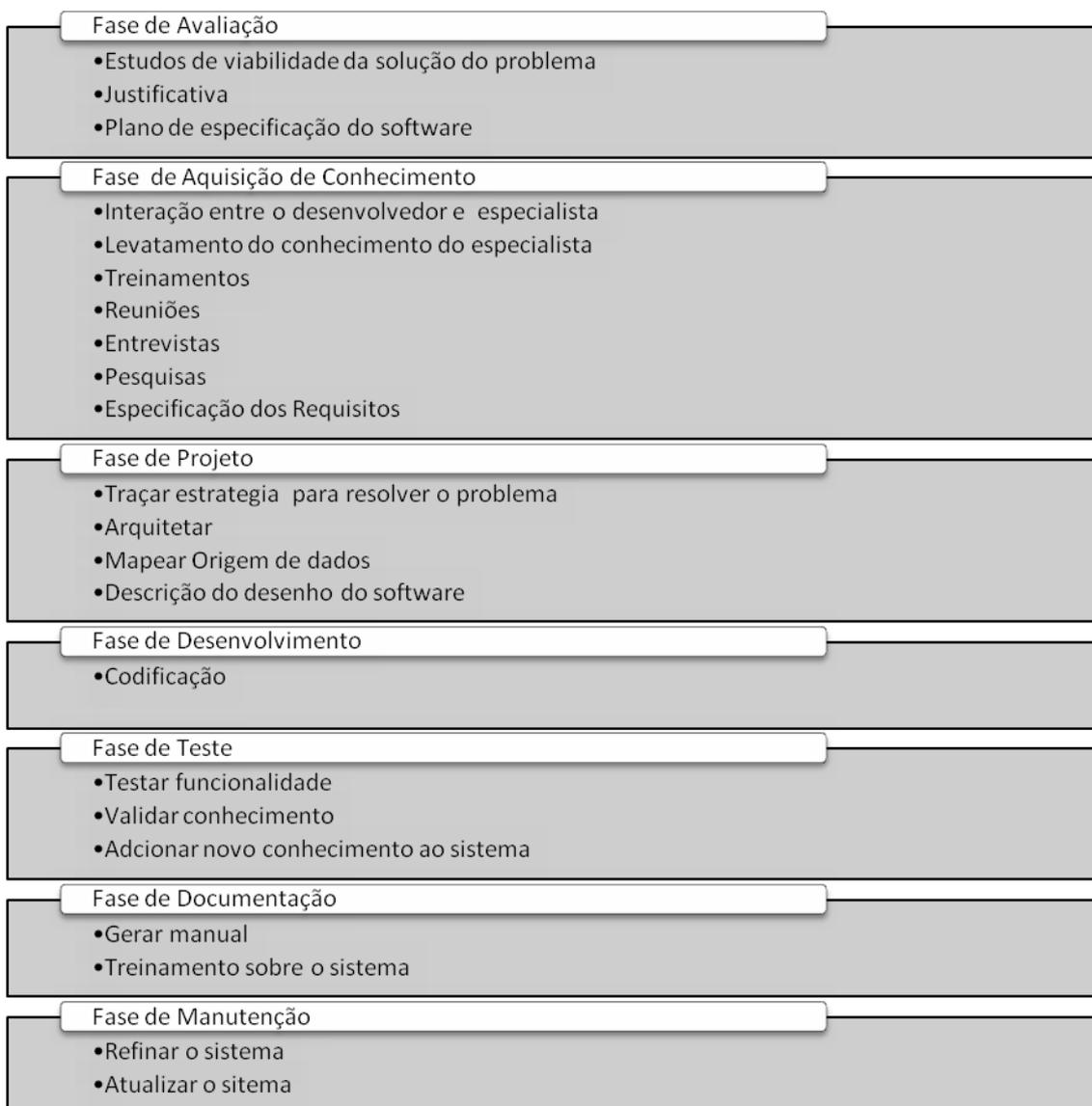


Figura 10 - Processo de desenvolvimento de um sistema especialista.

A fase de avaliação conduz estudos para determinar a viabilidade e a justificativa do problema candidato, traçando um plano de especificação do *software* com medidas de ação, especificação de material necessário, técnicas e conceitos utilizados na aplicação, custo, pessoas que iram desenvolver e cronogramas.

A segunda fase é a aquisição do conhecimento sobre o problema a ser usado para guiar o esforço de desenvolvimento. Esta fase envolve, tipicamente, uma forma especial de interação entre o desenvolvedor do sistema especialista e os especialistas em problemas específico da área ou domínio de conhecimento do problema a ser resolvido. O desenvolvedor ou analista é o responsável por extrair o conhecimento que se encontra implícito na mente do especialista humano sob a forma de procedimentos, estratégias e regras empíricas utilizado pelos engenheiros humanos na resolução de problema, e também, por implementar esse e outros tipos de conhecimento necessários ao desenvolvimento de um sistema especialista. É nesse momento também que é formulado os requisitos necessários e a serem atingindo com o produto final e gerado um documento de conformidade chamado de especificação de requisitos de *software*, para que se possa saber o que projetar e delimitar o que será feito.

A fase seguinte, a de projeto, trata sobre designação de um bom enfoque para representar o conhecimento do especialista e a estratégia para resolver o problema em um sistema especialista. Trata-se da arquitetura do *software*, estratégias de integração e cooperação com outros sistemas, onde obter os dados que alimentarão o sistema de diagnóstico e qual tecnologia a se utilizada: linguagens de programação, plataformas, servidores, conectores, etc.

Durante a fase de desenvolvimento, é codificado o sistema, transformando o que foi projetado em código. Neste momento, é onde necessariamente se constrói a aplicação ou aplicações. A fase de teste não é uma tarefa separada, mas é um processo contínuo durante todo o projeto e consiste em adicionar um novo conhecimento no sistema a cada entrevista com especialista. O maior objetivo do teste é validar a estrutura global do sistema e seu conhecimento. A fase de documentação implica preparar material para explicar como operar o sistema e fornecer um tutorial que no ambiente de trabalho é necessário para fazer a manutenção do mesmo, e que consiste em refinar ou atualizar o sistema conforme a necessidade.

#### 4.3 ANÁLISE DE REQUISITOS E DESCRIÇÃO DE CASOS DE USO

O objetivo da definição dos requisitos é especificar o que o sistema deverá fazer e determinar os critérios de validação que serão utilizados para que se possa avaliar se o sistema

cumpra o que foi definido. Requisitos são objetivos ou restrições estabelecidas por clientes e usuários que definem as suas diversas propriedades do sistema. Os requisitos de software são, obviamente, aqueles dentre os requisitos de sistema que dizem respeito a propriedades do software (PRESSMAN, 2006).

Alguns Requisitos deste software:

REQ1 – Restringir acesso e manter o controle dos usuários que podem gerar diagnósticos, tal como acessar dados confidências das máquinas

REQ 2 – Os usuários do sistema terão suas restrições quanto as ações para alterar regras, variáveis de saída e de entrada.

REQ 3 – Permitir que o usuário, desde que tenha permissão de manipular as configurações fuzzy (variáveis e regras), editar de variáveis, de conjuntos e de regras *fuzzy*, possibilitando ainda a criação, alteração e remoção de dados *fuzzy*.

REQ 4 – Permitir que usuários sem permissão de alterações possam utilizar o modulo de diagnóstico sem alterar as regras e variáveis (saída e entrada) sem alterar a base de conhecimento existente para diagnóstico.

REQ 5 – Criar um modulo dedicado para validação de regras sem a alteração das regras utilizadas no diagnóstico.

REQ 6 – Montar base de conhecimento a partir das medições existentes em Hidrogeradores de Tucuruí-PA, , Coaracy Nunes – AP e Balbina – AM.

REQ 7 – Sistema é um protótipo de diagnóstico utilizando sistema especialista fuzzy

REQ 8 – Possibilitar a integração desse sistema ao sistema corporativo da Eletronorte

REQ 9 – Permitir que o sistema seja incorporado aos programas de monitoração existente no CTE (Centro de Tecnologia da Eletronorte)

REQ 9.1 – Receber informações provenientes dos módulos de aquisição, análise e banco de dados

REQ 9.2 – Possibilitar diagnóstico online para outras unidades hidrogeradoras

Analisando os requisitos foi montando os casos de uso, uma forma especificar seqüências de interações entre um sistema e os agentes externos que utilizam esse sistema, devendo definir o uso de uma parte da funcionalidade de um sistema, sem revelar a estrutura e o comportamento internos desse sistema (BEZERRA,2006). Na Figura 11 é apresentado o digrama de caso de uso , seguindo de uma descrição continua e essencial para o entendimento do sistema:

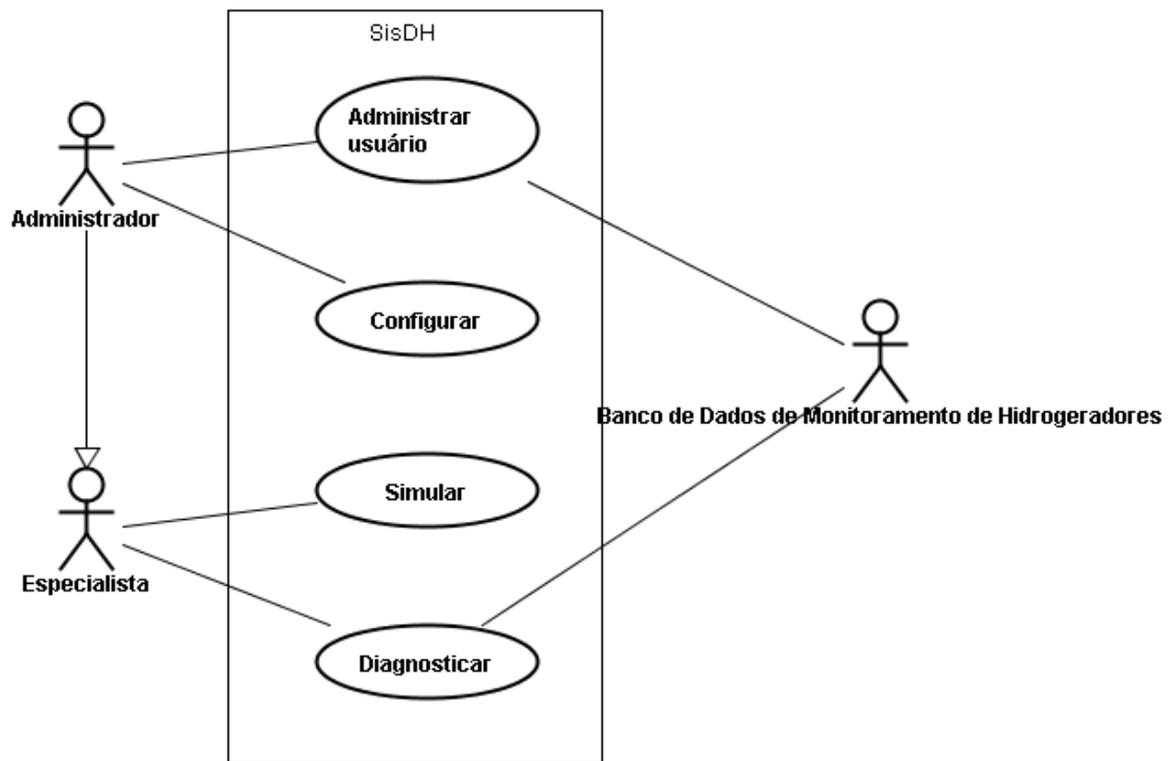


Figura 11 - Diagrama de Caso de Uso

#### 4.3.1 Atores do Sistema

Os atores para o diagrama de uml significa “o que” ou “quem” irá executar a ação. Foram detectado duas tres atores importantes para o sistema , o do Administrador que terá a responsabilidade de gerir o sistema tendo um perfil com acesso as configurações do sistema fuzzy e de cadastrar novos usuarios.

O especialista é um ator com menas ação no sistema, possuem autonomia apenas para visualização de diagnóstico sem poder intervir nas regras ou qualquer outra configurações. No entanto o ator especilista pode utilizar a simulação de um diagnóstico com dados não reais no sistema e estudar os diagnóstico com a ferramenta.

O ator “Banco de dados de monitormento de hidrogeradores” funcionar como um gerenciador dos dados do sistema, ele possuem rotinas automaticas que fornecem informações ao sistema de diagnóstico tais como as informações das grandezas dos hidrogeradores e usuarios. O sistema de diagnóstico passa a ser apenas um consumidor, quem processa todas informações para o diagnóstico é o ator “Banco de dados de monitormento de hidrogeradores”.

#### 4.3.2 Caso de uso – Administrar usuários

O usuário administrador do sistema, tem a possibilidade de gerenciar os usuários que irão operar o sistema, dando possibilidades do administrador poder adicionar, remover e atualizar os cadastros de usuários habilitados a alterar regras.

#### 4.3.3 Caso de uso – Configuração

Essa operação é permitida apenas aos administradores do sistema, pois consiste na edição de variáveis, de conjuntos e de regras *fuzzy*, possibilitando ainda a criação, alteração e remoção de dados *fuzzy*.

#### 4.3.4 Caso de uso – Validar

Operado por quaisquer usuários, para validar as regras, é necessário carregar as configurações *fuzzy*, para depois inserir valores hipotéticos para as variáveis de entrada do sistema *fuzzy*. Então é acionado um comando para testar, essas variáveis de entrada são processadas de acordo com as regras *fuzzy* da configuração *fuzzy* carregada no início da operação, de modo a inferir possibilidade para cada defeito que um componente pode apresentar.

#### 4.3.5 Caso de uso – Diagnosticar

Operado por qualquer usuários cadastrado e conectado ao banco de dados, o sistema carrega uma lista de eventos por componente do hidrogenador. Em seguida seleciona-se um evento que carregará as variáveis de entrada do sistema *fuzzy* com seus respectivos níveis de alarme. Então é acionado um comando para diagnosticar, onde as variáveis de entrada são processados de acordo com as regras *fuzzy* pré-estabelecidas na configuração *fuzzy*, de modo a inferir possibilidade para cada defeito que o componente pode apresentar

### 4.4 ARQUITETURA DO SISTEMA

O sistema especialista neste trabalho é um programa de computador desenvolvido para resolver problemas de uma área específica, tal como o raciocínio de um especialista humano da mesma área (SOUZA, 2008).

Para reproduzir a habilidade de um especialista, este tipo de programa utiliza a capacidade de relacionar as informações dos problemas a ser resolvido com conhecimento já armazenado. No entanto, os sistemas especialistas não podem ser considerados necessariamente uma imitação da estrutura da mente humana, e sim formas práticas de ser

usar estratégias heurísticas desenvolvidos por seres humanos na resolução de um problema. O que significa que para cada área em que atua são criados sistemas especialistas específicos. São problemas que não dispõem de uma solução exata ou ótima, isto é, não podem ser resolvidos por um programa computacional convencional, baseado numa seqüência de procedimentos com entradas e saídas bem definidas.

Esses tipos de sistemas são úteis para resolver problemas que possam ter diferentes respostas diante de um conjunto de dados disponíveis. Como mostrado nos sistemas fuzzy (Capítulo 3), os dados do problema e fatos armazenados no sistema especialista são combinados através de heurística, que geram informações até encontrar uma solução.

Para melhor entender o contexto do sistema especialista em meio a sistemas convencionais, a Quadro 1 mostra as principais diferenças:

QUADRO 1 - PRINCIPAIS DIFERENÇAS ENTRE SISTEMA ESPECIALISTA E CONVENCIONAL

	<b>Sistema Convencional</b>	<b>Sistema Especialista</b>
Representação do conhecimento	Implícita, inserida em estrutura de dados	Explícita. O conhecimento é representado separadamente do código.
Conhecimento traduzido em	Algoritmos determinísticos	Estruturas hierárquicas, redes semânticas, regras, árvores de decisão, tabelas de decisão ou redes de inferência
O computador executa	Processamento numérico (cálculos)	Processamento simbólico (inferências)
Explicação do raciocínio	Geralmente inexistente	Existente e recomendável

Fonte: (SOUZA,2008)

#### 4.4.1 Arquitetura do sistema especialista em diagnóstico de hidrogeradores

O sistema de diagnóstico de hidrogeradores foi arquitetado por camadas que serverm como proteção ao sistema e para atender ao requisito de integração a outros módulos de monitoramento. O arquitetura projetada para o sistema de diagnóstico permitir que aplicações sejam desenvolvidas de maneira produtiva e com facilidade de manutenção. Os objetivos principais são:

**Modularidade** – Dividir a aplicação em módulos tão independentes quanto possível.

**Manutenibilidade** – Reduzir o custo de manutenção da aplicação.

**Extensibilidade** – Permitir que novas funcionalidades sejam adicionadas sem grande impacto nas já existentes.

**Reusabilidade** – Permitir que classes e componentes sejam reaproveitados em outros módulos da mesma aplicação ou em outras aplicações.

Entre outros benefícios, a divisão em camadas independentes permite a substituição da interface gráfica ou do meio de armazenamento dos dados (trocar arquivos por um SGBD, por exemplo) sem afetar as o que já foi desenvolvido na aplicação. Isso facilita a reusabilidade das classes do negócio em outras aplicações e permite maior flexibilidade na escolha de tecnologias para implementar a aplicação.

Na Figura 12 é apresentada a visão lógica/funcional da arquitetura implementada em quatro camadas: a de apresentação, a de controle, a de diagnóstico e a de dados.

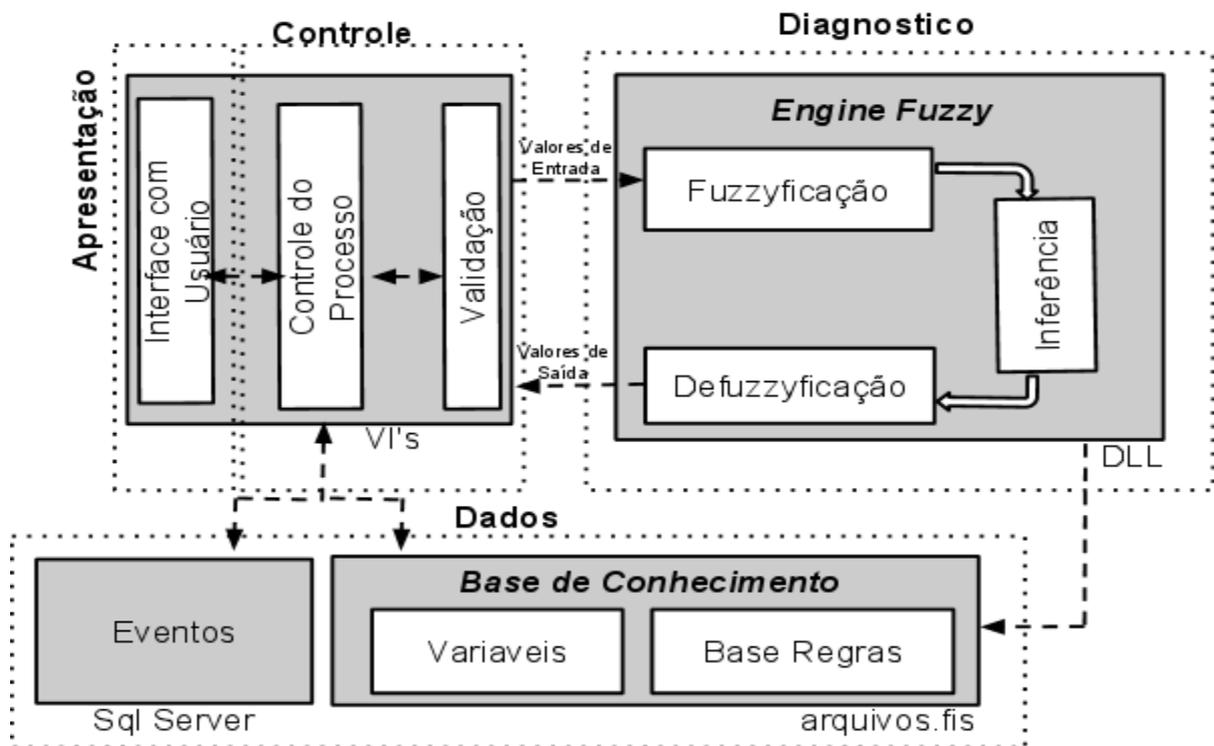


Figura 12 - Arquitetura do sistema de diagnóstico de hidrogeradores

A camada de apresentação, construída com *VI's*<sup>4</sup> do *Labview*<sup>5</sup>, é a responsável pela interação com o usuário, por exemplo, nela o usuário aperta uns botões, seleciona eventos, fornece dados, etc.

<sup>4</sup> *VI (Virtual Instruments)*, são programas desenvolvidos em linguagem 'G' (gráfica) da *National Instruments*, compostos por painéis frontais, interfaces e diagrama de blocos, que contém o código gráfico do programa. O programa não é processado por um interpretador, mas sim compilado. Essas *Vis* podem ser reutilizadas, como sub-programa em outra *VI*.

<sup>5</sup> *LabView* é o acrônimo para *Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench*, é uma linguagem de programação gráfica originária da *National Instruments*.

A camada de controle manipula o evento da interface do usuário através de rotinas pré-escritas. Esta camada acessa a camada de dados, possivelmente atualizando-o de uma maneira apropriada, baseado na interação do usuário ou apenas repassando informações que dependem da escolha do usuário. E é devido ao acesso a essa camada que é gerada uma interface apropriada, como exemplo: variáveis de entrada que estão armazenadas e os eventos à selecionar.

Em definições gerais, a camada de controle serve para controlar o processo. Cada requisição do usuário é primeira interpretada pela camada de controle que determina qual ação deve ser executada e encaminha depois a resposta do modelo para a camada de apresentação. No sistema de diagnóstico ela esta diretamente ligada a *engine fuzzy*<sup>6</sup>, uma DLL<sup>7</sup>, criada especificamente para esse sistema, com *interfaces*<sup>8</sup> para que as *VI's*<sup>9</sup> possam acessá-la.

A camada de diagnóstico é o núcleo do sistema, onde se encontram todas as técnicas necessárias para gerar o diagnóstico. Essa camada fornece processamento especializado à camada de controle, podendo ela ser capaz de acessar a camada de dados se assim for necessário. Para o sistema de diagnóstico, a camada de dados foi adicionada devido à necessidade de ser ter um processamento especializado e com chances de ser alterado por outras técnicas de diagnóstico.

A camada de dados é de onde se originam os dados para o diagnóstico, e é responsável pelo controle e acesso de dados, a mesma trabalha com SGBD's<sup>10</sup> remotos, como SQLServer<sup>11</sup> e mantêm o seu próprio gerenciamento para a base de conhecimento em arquivos “.fis”. Para o sistema de diagnóstico, implementado atualmente, a camada é quem obtém dos sistemas de monitoramento da Eletronorte os eventos necessários para alimentar a inferência *fuzzy* do diagnóstico. Assim como manter a escrita e leitura dos campos de entrada e saída (variáveis de entrada e saída configuradas para o sistema de diagnóstico), assim como seus respectivos valores de pertinência. É nessa camada também que se mantêm os

---

<sup>6</sup> Engine fuzzy é um programa de computador e/ou conjunto de bibliotecas, para simplificar e abstrair o desenvolvimento de sistemas especialistas fuzzy

<sup>7</sup> *Dynamic-link library* (Biblioteca de ligação dinâmica) ou DLL, é a uma implementação criada pela Microsoft para o conceito de bibliotecas compartilhadas nos sistemas operacionais Microsoft Windows.

<sup>8</sup> *Interfaces*, em ciência da computação, é a fronteira que define a forma de comunicação entre duas entidades.

<sup>9</sup> Plural para VI ou *virtual instruments*.

<sup>10</sup> Sistemas de gerencia de banco de dados

<sup>11</sup> SQLServer é o gerenciador de banco de dados da *Microsoft*

conhecimentos obtidos dos especialistas, o que chamamos de base de regras, escritas em formato: IF <VARIÁVEL> AND/OR <VARIÁVEL> ENTÃO <VARIÁVEL>

#### 4.5 ESTRUTURA RELACIONAL COM OUTROS SISTEMAS

O sistema de auxílio ao diagnóstico trabalha em cooperação com outros sistemas que ficam responsáveis em obter dados direto na fonte (os equipamentos). Sendo o sistema de diagnóstico o responsável por mapear os dados para seu trabalho interno de processamento heurístico *fuzzy*, assim como dar suporte visual aos defeitos inferidos.

Na figura 13 se tem uma visão estrutural de como o sistema se integra com outros sistema:

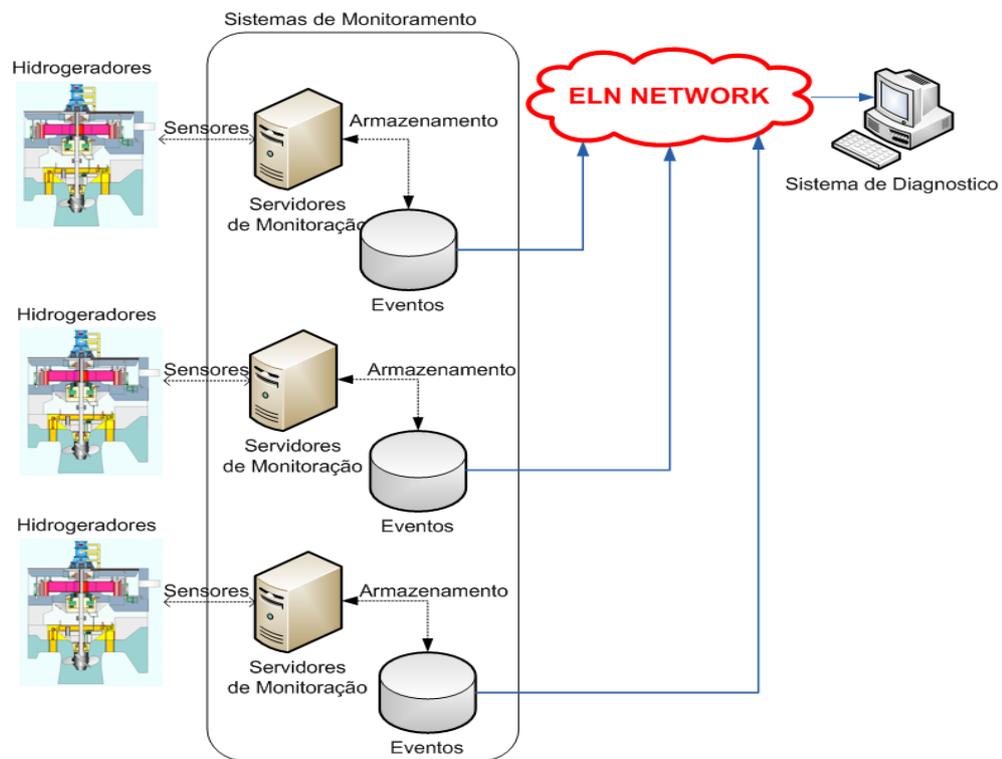


Figura 13 - Integração do sistema de diagnóstico com outros sistemas de monitoramento

O sistema especialista para diagnósticos de hidrogeradores recebe como entrada de dados grandezas monitoradas pelos instrumentos de automação. Necessitam, portanto, estar conectados a um robusto sistema de comunicação capaz de disponibilizar constantemente dados de sensores.

Os sistemas de monitoramento coletam os dados dos sensores (por exemplo, temperatura de óleos de mancais, pressão diferencial nos filtros de óleo, e vazão de água na tubulação dos trocadores de calor) e armazenam essas informações em banco de dados,

possibilitando o sistema de diagnósticos acessar essa base de dados e carregar o sistema de diagnósticos com informações reais.

#### 4.6 Conclusão do capítulo 4

O objetivo deste capítulo foi mostrar toda a análise do *software* desde seu processo de construção a investigação dos requisitos e projeto. O processo de desenvolvimento utilizado foi o institucionalizado pelo LACEN, ainda pouco maduro, pois suas tarefas ainda são bastante genéricas, pois pouco atende a softwares especialistas.

Esse sistema, elaborado como protótipo para Eletronorte, é um sistema especialista *fuzzy* para o diagnóstico hidrogeradores, dando origem a uma base de conhecimento ou base de regras sobre o estado dos equipamentos analisados por técnicos e engenheiros da Central Elétrica do Norte (ELETRONORTE ou ELN).

Projetado com uma arquitetura extensível, modular, e de baixo custo de manutenção, o sistema está dividido em camadas e possui integração com sistemas, existentes na Eletronorte, de monitoramento que fornecem informações (eventos) para um diagnóstico.

## 5 SISTEMA DE AUXÍLIO AO DIAGNÓSTICO DE MANUTENÇÃO PREDITIVA EM HIDROGERADORES

### 5.1 INTRODUÇÃO

Este capítulo irá descrever o software e suas interfaces funcionais de interação com o usuário, tal como o módulo de conexão com o banco de dados, autenticação, visualização dos níveis de alarme, configuração do sistema *fuzzy*, visualização e seleção de eventos, possibilidades de defeito, legendas, variáveis de entradas disponíveis, validação de regras, etc.

### 5.2 DESCRIÇÃO DO SISTEMA

O sistema apresentado neste trabalho foi desenvolvido para agilizar e tornar o planejamento da manutenção mais eficiente, rápido e automático no auxílio aos operadores do setor de manutenção de hidrogeradores.

O sistema utiliza a lógica *fuzzy* para inferir os diagnósticos aproveitando o conhecimento dos técnicos especialistas da Eletronorte, abstraindo essas informações no formato de regras e traduzindo no final para diagnósticos na linguagem natural.

Atualmente, o sistema está preparado para diagnosticar defeitos em três elementos do hidrogerador: anel coletor, mancais e estator. Para cada parte dos hidrogeradores existe uma coleção de variáveis de entrada, saída, que podem ser vistas no Quadro 2, e as regras que serão apresentadas mais adiante, na seção 5.5.

É importante ressaltar que as variáveis de entrada são grandezas armazenadas em banco de dados por sistemas de monitoração *on-line* da empresa. As variáveis de saída são defeitos obtidos com os especialistas que podem ser diagnosticado. As regras são os meios de conclusão dos defeitos abstraídos dos especialistas.

QUADRO 2 - RELAÇÃO DE GRANDEZAS MONITORADAS (VARIÁVEIS DE ENTRADA) COM DEFEITOS (VARIÁVEIS DE SAÍDA)

Variáveis		
	Entrada	Saída
Mancais	<ul style="list-style-type: none"> <li>a) Temperatura do Óleo Quente MGT</li> <li>b) Temperatura Metal MGT</li> <li>c) Temperatura do Óleo quente ME</li> <li>d) Temperatura Metal ME</li> <li>e) Temperatura do óleo quente MGG</li> <li>f) Temperatura Metal MGG</li> <li>g) Oscilação Radial 90° MGT</li> <li>h) Oscilação Radial 0° MGG</li> <li>i) Oscilação Radial 90° MGG</li> <li>j) Potência Ativa</li> <li>k) Queda</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>a) Condição Normal</li> <li>b) Desbalanceamento</li> <li>c) Perigo de Roçamento</li> <li>d) Excentricidade dos Mancais MGT</li> <li>e) Excentricidade dos Mancais MGG</li> <li>f) Defeito no sistema de resfriamento de óleo MGG</li> <li>g) Defeito no sistema de resfriamento de óleo MGT</li> <li>h) Defeito no sistema de resfriamento de óleo ME</li> </ul>
Estator	<ul style="list-style-type: none"> <li>a) Máximo da Temperatura de enrolamento</li> <li>b) Máximo da temperatura do ar</li> <li>c) Máximo da temperatura do núcleo</li> <li>d) Vazão Anormal de água de resfriamento</li> <li>e) Taxa de crescimento de descargas parciais</li> <li>f) Vibração do núcleo do estator</li> <li>g) Potência reativa do hidro-gerador</li> <li>h) Pressão da saída do circuito de resfriamento</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>a) Nível de DP elevada Conjugada com a Vibração Alta no Núcleo</li> <li>b) Sobre-aquecimento do enrolamento estático</li> <li>c) Descarga Elétrica Elevada</li> <li>d) Nível de descarga parcial elevada</li> <li>e) Afrouxamento do núcleo</li> <li>f) Sobre-aquecimento localizado</li> </ul>

Para cada valor das variáveis, seja de saída ou de entrada, são quantificados níveis de alarme. Uma maneira acessível e de fácil usabilidade de interação com o usuário para visualizar o quanto o valor de cada variável está próximo aos limites pré-estabelecidos, é através de cores como indicadores: verde, amarelo e vermelho. Sendo considerado estado normal o valor que estiver dentro da faixa verde; estado de alarme o valor que estiver dentro da faixa amarela e estado crítico o valor que estiver dentro da faixa vermelha, como mostra a figura 12.

### 5.3 DESCRIÇÃO DO MÓDULO *FUZZY*

O módulo *fuzzy* ou módulo de diagnóstico é responsável pela análise e pelo processamento das informações armazenadas em um servidor de banco de dados. As informações do banco de dados são originárias dos sistemas de monitoração existentes na Eletronorte, para hidrogeradores.

Basicamente, o módulo *fuzzy*, recebe os dados proveniente da aquisição de dados de sensores, a interface de fuzzificação usa de pertinência contida na base de conhecimento, convertendo os sinais de entrada em um intervalo  $[0,1]$  que pode estar associado a um rotulo lingüístico. A base de conhecimento constitui numa base de dados (funções pertinências) e uma base de regras *fuzzy*. A base de dados fornece às definições numéricas as funções de pertinências usadas no conjunto de regras *fuzzy*. As regras representam a estratégia de diagnóstico utilizada pelo especialista. A lógica de tomada de decisão incorpora a estrutura de inferência da base de regras, usa implicações *fuzzy* para simular tomadas de decisão humanas. Ela gera ações de controle – conseqüentes – inferidas a partir de um conjunto de condições de entrada – antecedentes. A fim da tomada de decisão, a defuzzificação mostra o valor da variável lingüística de saída inferida pelas regras *fuzzy* traduzida num valor discreto.

O sistema *fuzzy* esta configurado nesse trabalho com as seguintes especificações de operadores e métodos:

T-Norma ou AND	=Operador min (mínimo)
Inferencia	= <i>Mandani</i> Método min(mínimo)
Agregação	=Método Max (máximo)
<i>Defuzzyficação</i>	=Centro do Maximo

O sistema implementado é do tipo *Mandani*, com as saída normalizadas no intervalo 0 e 1, gerando assim a possibilidade de ocorrência de cada defeito.

Este módulo foi desenvolvido com a finalidade de ser a interface entre o usuário e a aquisição de eventos das grandezas em servidores de banco de dados. Analisando-se as condições específicas de cada variável monitorada, estabelecendo correlações e inferências entre as diferentes variáveis e detectar eventuais anormalidades nos equipamentos. Este módulo possui uma visualização de todas as variáveis de entrada e saída em forma de níveis de alarme. Sendo também possível visualizar as regras ativadas no processo de diagnóstico.

Este módulo é a interface principal do *software*, é possível a partir dela, conectar-se ao banco de dados, configura as variáveis *fuzzy*, assim como redirecionar para outro módulo, o de validação. O operador terá uma visão rápida, intuitiva e de fácil compreensão dos alarmes

e das condições de cada componente do hidrogerador. Como é possível visualizar na Figura 13.

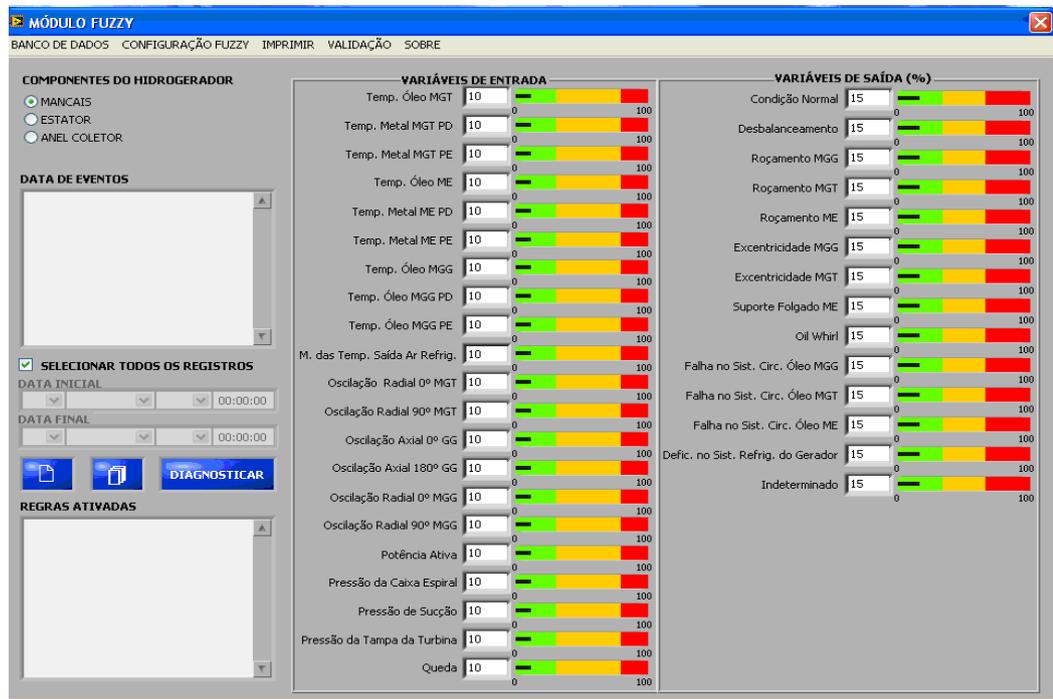


Figura 14 - Módulo *Fuzzy* do sistema de diagnóstico: tela principal com as variáveis de entrada e saída

### 5.3.1 Controle de Acesso

O *menu*<sup>12</sup> “Banco de dados” (Figura 15) está relacionado com a conexão e desconexão do programa cliente com o banco de dados onde estão gravados os eventos, como mostrado na figura a seguir.

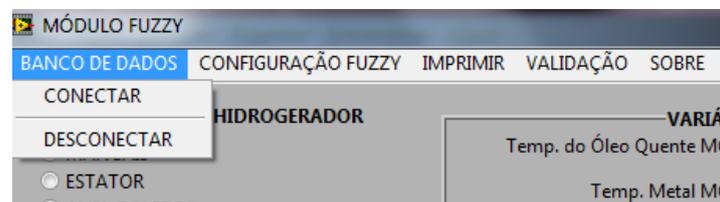


Figura 15 - *Menu* com a ação conectar e desconectar com o banco de dados

O usuário deverá informar *login*<sup>13</sup> e senha (ver Figura 16), senhas essas com permissão de acesso aos dados as informações e de acesso ao aplicativo. Mesmo porque, sem os dados dos eventos, não se poderá fazer o diagnóstico dos equipamentos. No entanto terá acesso ao

<sup>12</sup> Lista de opções de comandos pertencentes a um programa ou a uma página da Web.

<sup>13</sup> *Login* é um conjunto de caracteres solicitado para os usuários acessar algum sistema computacional.

modulo de validação, com valores de entrada fictícios, informado pelo próprio usuário, como será visto na seção 5.4.

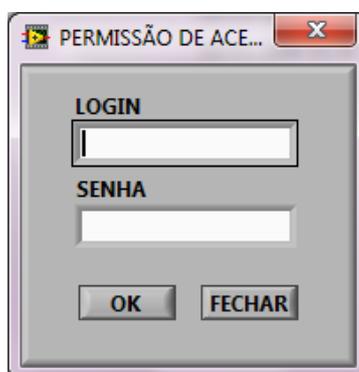


Figura 16 - Menu de acesso ao banco de dados

Caso existam tentativas de diagnóstico sem dados do banco, o sistema fornece informativo como o de “Efetue a conexão com o Banco” (visto na Figura 17).

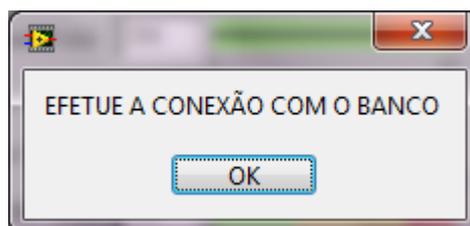


Figura 17 - Mensagem de alerta caso não exista conexão com o banco o usuário não tenha o feito

### 5.3.2 Descrição do Modulo de Seleção de Dados

Os dados utilizados como parâmetros de entradas das variáveis de entrada, como já mencionados se originam de sistemas que já fazem o monitoramento, sendo esses dados armazenados em banco de dados. O sistema aqui implementado tem a responsabilidade de recolher essas informações na forma de registros. Como é possível ver na figura 17, que mostra uma lista de registros ordenados com a data e hora que foram obtidos, os quais podem ser selecionados para realização do processo de diagnóstico.

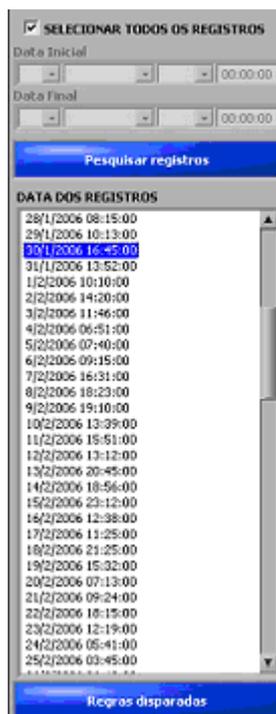


Figura 18 - Área de seleção de eventos

Esses registros são obtidos por meio da conexão com os bancos de dados cujos valores são os valores de entrada ordenados por datas de quando foram armazenadas, possibilitando disponibilizar na tela. Sendo que ao escolher uma data as variáveis de entrada são atualizadas na tela e as regras ativadas pelas variáveis são exibidas junto com a possibilidade do defeito.

### 5.3.3 Configuração do sistema *fuzzy*

Uma característica de grande importância apresentada por este sistema de auxílio ao diagnóstico é a sua flexibilidade para alterar os parâmetros do sistema sem que seja necessária qualquer alteração no código fonte do software.

Isto é possível através da interface de configuração do sistema *fuzzy* (Figura 18). Nela o usuário pode fazer a inclusão, exclusão e alteração das variáveis de entrada e de saída, dos conjuntos *fuzzy* e das regras de diagnóstico.

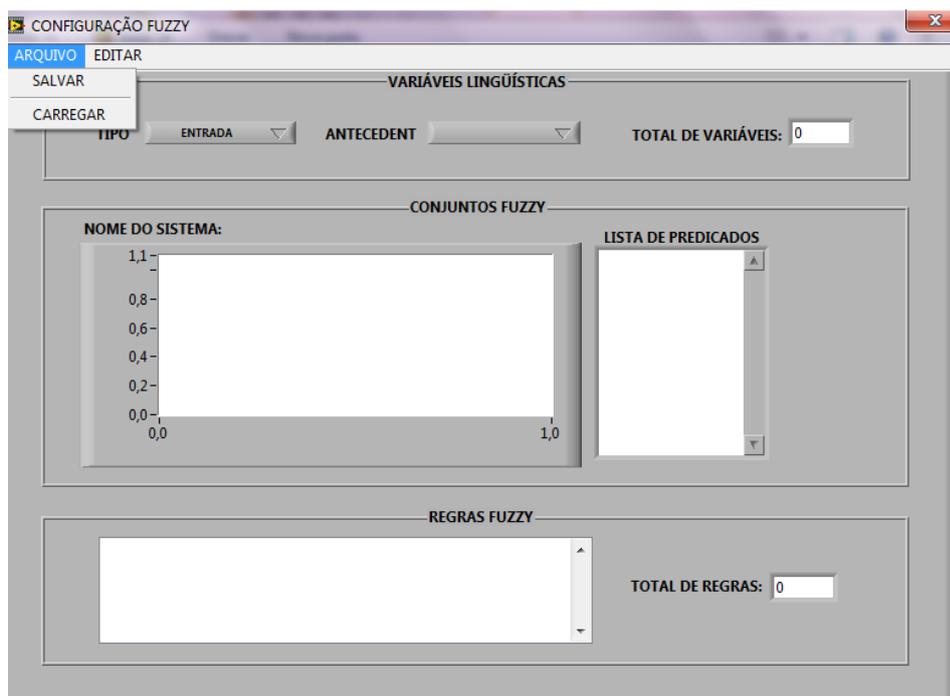


Figura 19 - Interface de configuração das variáveis do sistema

Para configurar as variáveis de entrada e saída, na interface de configuração (Figura 19) o usuário deve primeiramente determinar se a variável que ele está inserindo é de entrada ou saída e posteriormente atribuir o nome da variável. Para cada uma também é definido o seu universo de discurso.

Na Figura 20 é possível observar o *menu* “arquivo”, que fica na interface de configuração *fuzzy* (Figura 19), na qual é possível salvar todas as configurações e obter novamente pelo sub-menu “carregar”. Estas configurações ficarão armazenadas em arquivos com extensão “.fis”.

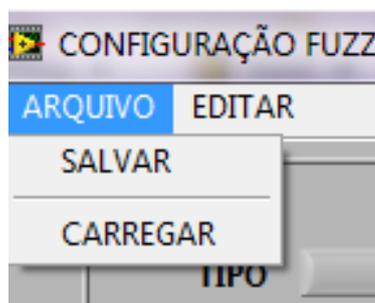


Figura 20 - *Menu* com as opções de salvar ou carregar as regras em .fis

Na mesma interface (Figura 20), nota-se outro menu, o “editar” (Figura 19), que possibilita criar novas variáveis, atribuir conjuntos e novas regras.

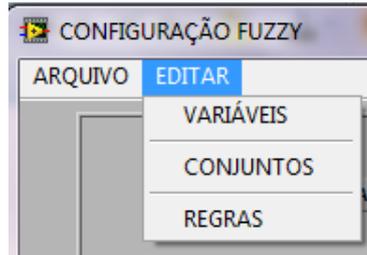


Figura 21 *Menu* que redireciona a telas específicas de edição de dos componentes fuzzy

Em “editar”, “variáveis” é possível criar novas variáveis de entrada e saída (Figura 22) , remove-las ou modificá-las. Para isso o sistema abre uma tela *pop-up*<sup>14</sup>

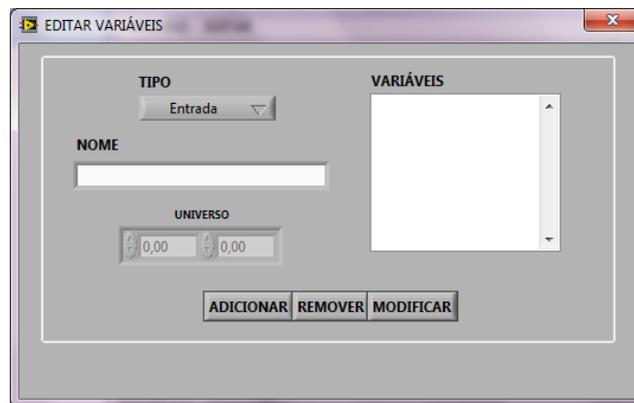


Figura 22 - Edição de Variáveis

Seguindo o mesmo *menu*, “editar” da configuração *fuzzy*, na opção “conjuntos” , é definidos os conjuntos mencionados no capítulo 3, para cada variável. A tela que possibilita essa edição é a vista na figura 23.

<sup>14</sup> *Pop-up* é uma janela extra que abre, em um programa de computador.

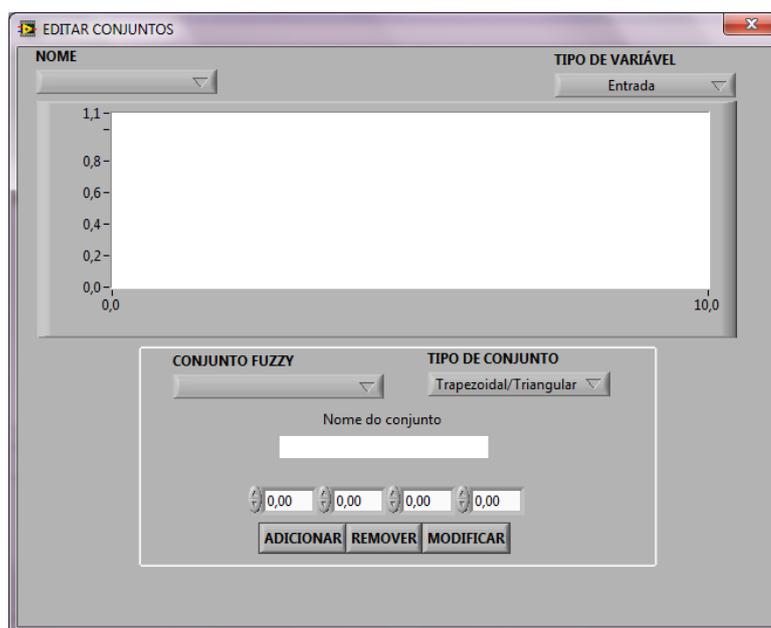


Figura 23 - Edição dos conjuntos , inserindo suas pertinências e funções

Na tela mostrada na figura 23, poder ser observado que possui um campo chamado nome, respectivo as variáveis, seja de entrada ou de saída. A lista de variáveis que irá aparecer no campo “NOME” é filtrada pelas opções no campo “TIPO DE VARIÁVEL”, podendo ser de entrada ou de saída. Depois de selecionada a variável que se pretenderá manipular, para adicionar um conjunto a essa variável, no mínimo, deve-se inserir um nome para o conjunto, pois por padrão já é configurado com uma função triangular. Depois desses paços é acionado o botão correspondente a “ADICIONAR”. Para remover ou alterar conjuntos, e necessário selecioná-lo na lista de “CONJUNTO FUZZY” e depois acionar o botão correspondente a ação desejada.

Por fim, no mesmo *menu* de configuração fuzzy, “editar” agora em regras, é possível editar regras , reescrevê-las e adicioná-las.

Para a etapa de configuração das regras devem ser inseridas tanto as variáveis de entrada e saída quanto os conjuntos *Fuzzy* já definidos nas etapas anteriores. Nesta interface ainda são utilizados para composição das regras os conectores “E” e “ENTÃO”.

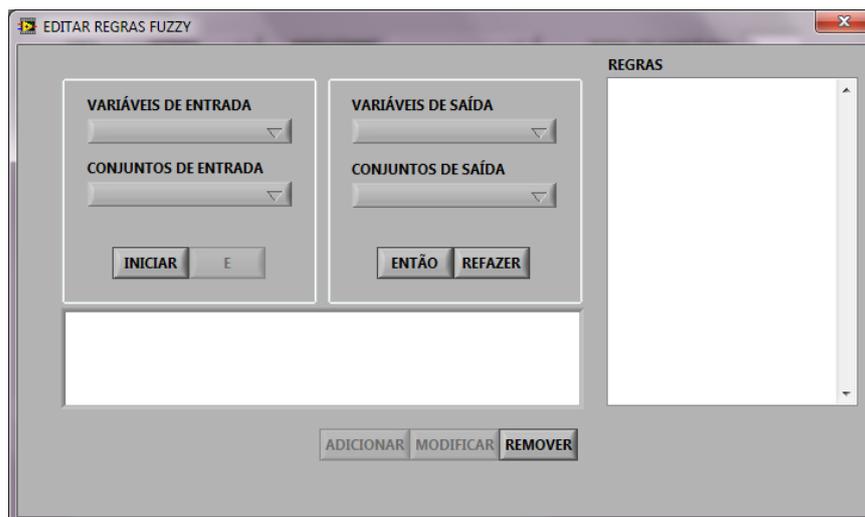


Figura 24 - Tela de edição de regras

Visto a figura 24, é possível ver o campo “VARIÁVEIS DE ENTRADA”, onde aparecerá uma lista com as variáveis de entrada cadastradas e logo abaixo o conjunto associados a cada variável de entrada selecionada. Um exemplo seria o conjunto referente à temperatura alta. Depois de selecionados é necessário acionar o botão “iniciar” que irá inserir a variável na sua condição no campo em branco vista na parte inferior da tela apresentada na figura 26. Podendo ser concatenado com outras clausulas, acionando ao botão “E”. Ao fim da inserção das variáveis de entrada será necessária a conclusão da regra, que segue o mesmo principio das variáveis de entrada. As variáveis de saída estão listadas no campo variáveis de saída, ao selecionar uma variável logo apareceram os conjuntos correspondentes, mas depois de ter acionado o botão “então”.

Todas essas informações são armazenadas em arquivo texto com extensão “.fis”, não ocupando muito espaço em disco, além de apresentar acesso rápido aos dados quando se faz edição dos dados de configuração.

Sendo importante ressaltar que o acesso a configuração do sistema *fuzzy* é restrito, ou seja, só pode ser feito por usuários que possuem permissão de acesso para isso, o que aumenta ainda mais a integridade dos dados visto que se tem um risco reduzido de que qualquer usuário venha a fazer alterações indevidas na configuração do sistema.

#### 5.4 DESCRIÇÃO DO MÓDULO DE VALIDAÇÃO

O módulo de simulação permite ao usuário fazer a validação das regras inseridas no sistema através da simulação dos valores das variáveis de entrada. Esses valores são inseridos

manualmente pelo usuário, que tem a liberdade de escolher qualquer faixa de valores que o mesmo considerar válido (Figura 25).

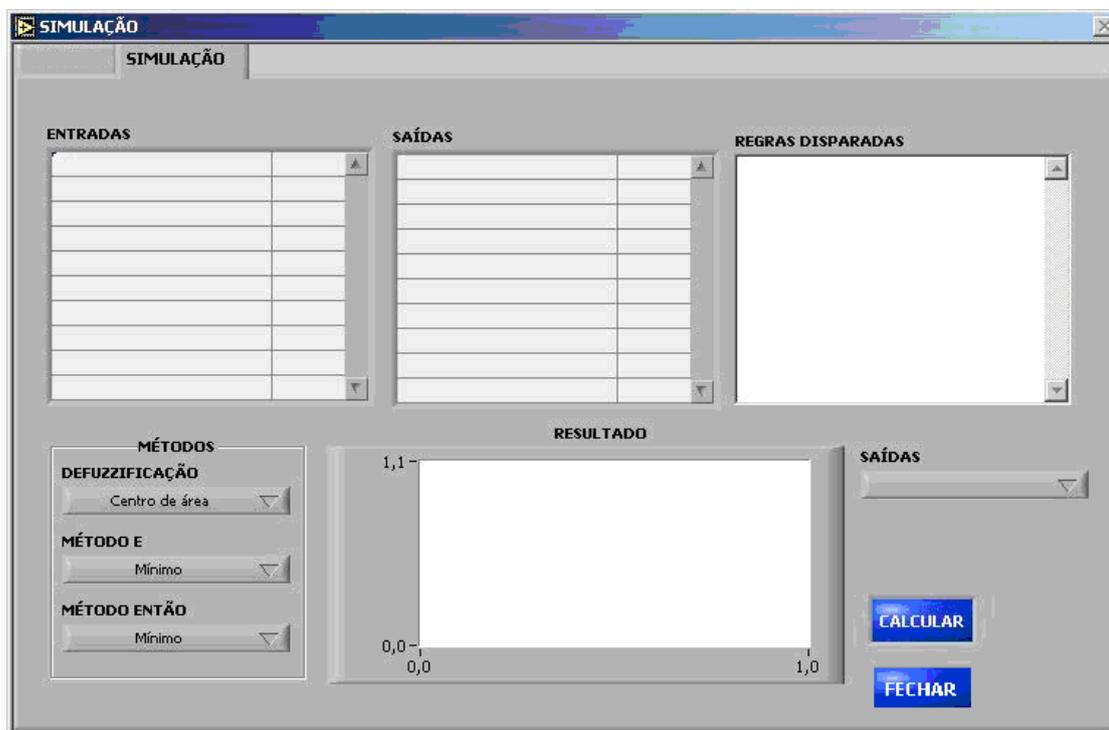


Figura 25 - Módulo de Validação

A interface de validação possibilita que o usuário insira os valores das variáveis de entrada e também escolha os métodos de *defuzzificação*, de inferência e de implicação a serem utilizados para o diagnóstico. Após serem escolhidos estes parâmetros, o usuário entra com o comando para testar os valores inseridos e na mesma interface são exibidas as regras que foram disparadas para o diagnóstico efetuado.

Este módulo é de grande utilidade tanto na fase de validação inicial das regras que acabaram de ser elaboradas pelos especialistas quanto na fase de refinamento dessas mesmas regras, o que permite eliminar inconsistências nas regras de auxílio ao diagnóstico de defeitos e, dessa forma, obter resultados bem mais confiáveis.

## 5.5 RESULTADOS

O sistema de monitoramento é o responsável pela coleta dos sinais provenientes dos sensores no hidrogeradores. Os sinais são tratados mapeados para o sistema de diagnóstico como variáveis de entrada que infere pela *framework fuzzy* os possíveis sintomas dos hidrogeradores. Como ilustrada a Figura 25.

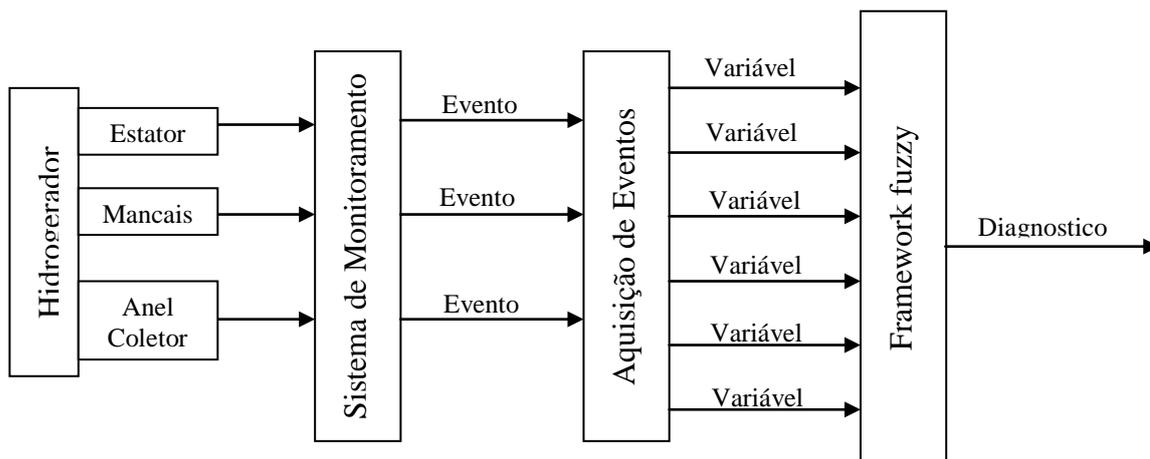


Figura 26 - Diagrama representativo do sistema

As variáveis e regras para teste estão em anexo 1 e 2 desse trabalho. Para início dos testes, primeiramente foram feitas validações de consistência das variáveis obtidas em treinamentos, pois algumas não foram encontradas em bancos do sistema de monitoramento da empresa, sendo necessário removê-las do conjunto das variáveis de entrada e regras.

#### 5.5.1 Teste com Mancais

Para o teste dos mancais, por motivo de indisponibilidade de informações e conceitos técnicos sobre causa e efeitos dos outros elementos, nesta seção são apresentados os resultados decorrentes da aplicação deste sistema de diagnóstico de mancais em hidrogeradores com base no conhecimento obtido de especialista.

Nos resultados discutidos foram utilizados dados criados através de um banco fictício. O sistema diagnostica o mancal quanto aos defeitos de desbalanceamento, perigo de roçamento, excentricidade dos mancais, defeito no sistema de resfriamento. Com base nas regras fornecidas por especialistas e com possíveis valores onde os referidos defeitos podem acontecer, adicionou-se ao banco de dados registros com defeitos de excentricidade dos mancais na guia da turbina. A regra sobre o defeito de excentricidade é baseada nos valores de oscilação radial do mancal da turbina.

Na figura 27 podemos ver a interface com os valores de entrada provenientes do banco de dados e as variáveis de saída com os valores calculados. No item excentricidade do mancal MGT (mancal guia da turbina) tem como resultado o valor de 48,99, e observando o *display* nota-se que o valor se encontra na região amarela, alerta, indicando que o equipamento não se encontra mais em perfeito estado de funcionamento. Nessa situação, o hidrogerador apresenta um princípio de defeito que tende a se agravar se nenhuma intervenção for feita no

equipamento. Na figura 28, o valor da excentricidade do mancal MGT é de 90,57, no *display*<sup>15</sup> encontra-se na região vermelha, indicando que o equipamento já se encontra com o defeito. Nessa situação se o hidrogerador continuar em operação pode ocorrer uma falha no mesmo.

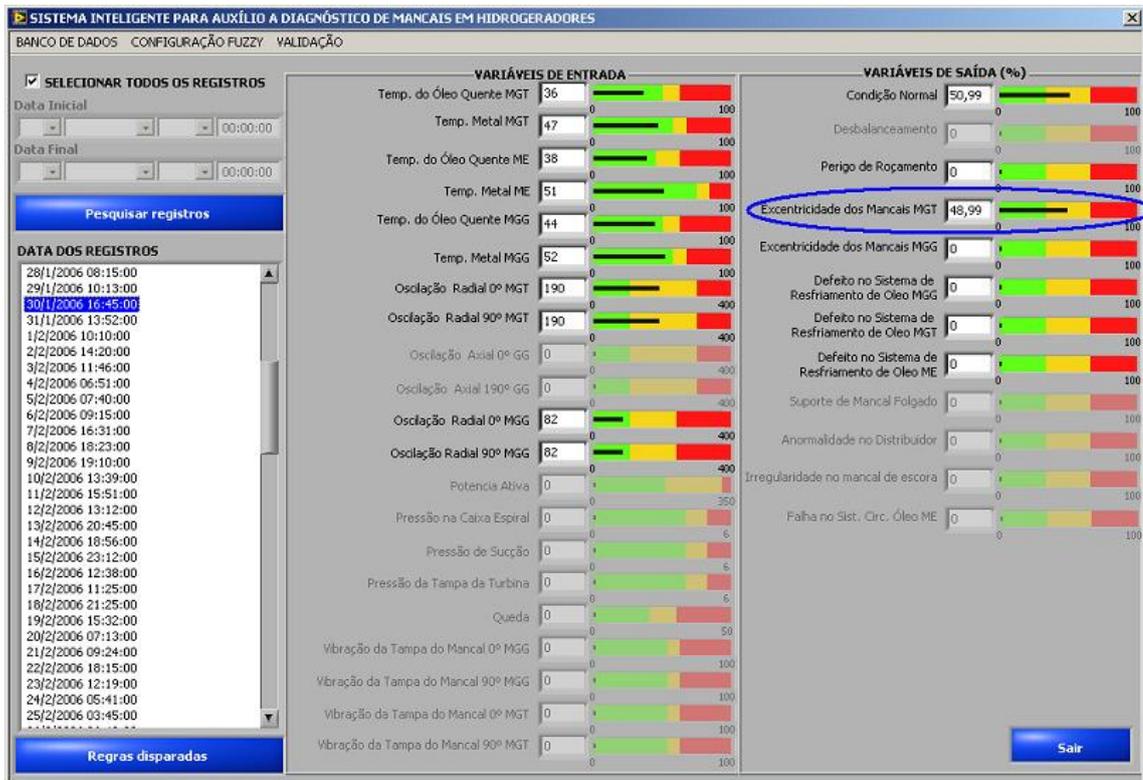


Figura 27 - Tendência de defeito de excentricidade na turbina

<sup>15</sup> *Display* é um dispositivo para a apresentação de informação

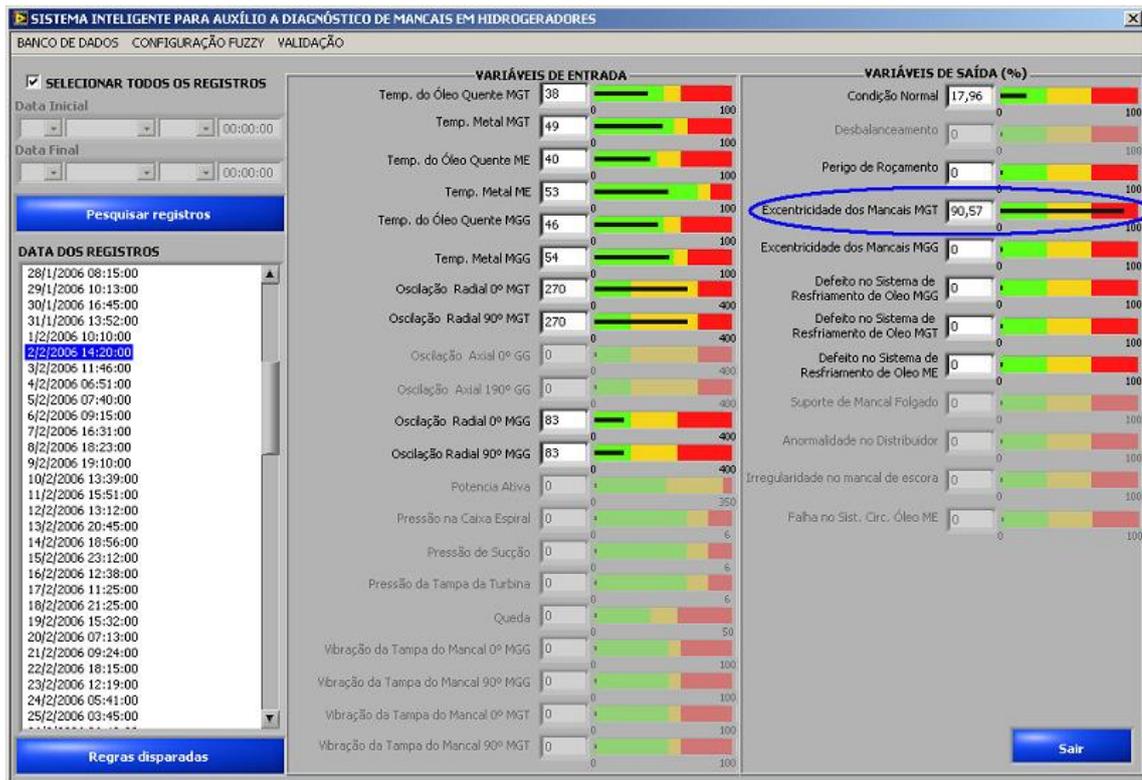


Figura 28 - Defeito de excentricidade na turbina encontrado

## 5.6 CONCLUSÃO DO CAPÍTULO 5

Neste capítulo foi descrito o sistema de diagnóstico na forma em que o usuário interage, visualizando suas funcionalidades e exibindo as telas do software. Dividido em dois módulos de interação com os usuários, apresentou-se cada modulo e suas respectivas diferenças, a qual o possibilita escolher eventos em banco de dados de outros sistema, e o outro é necessário entrar com dados manualmente. Também foi descrito, o sistema de configuração fuzzy, em como adicionar novas variáveis e regras.

## 6 CONCLUSÃO

Este trabalho mostrou o desenvolvimento de um sistema de auxílio ao diagnóstico, essencial na manutenção preditiva, na qual fornecer informações necessárias para se criar planos de ação para a manutenção minimizando, ao máximo possível, períodos de paradas programadas e mitigando risco que acarretariam em desligamentos não programados. Esse sistema, também vem com a perspectiva de capacitar operadores por em detectar defeitos, pois imortaliza o conhecimento abstraído dos especialistas nos equipamentos.

Partindo da filosofia da manutenção preditiva em apontar a possibilidade de uma falha, o sistema usa de base histórica dos dados monitorados (temperaturas, oscilação, etc.) dos equipamentos, inferindo e exibindo de forma intuitiva e visual níveis de alarme em que se encontram e apontando conseqüências quais seria o problema que pode estar ocorrendo no equipamento.

Criado sob uma arquitetura flexível e expansível usando da lógica *fuzzy* para inferência de diagnóstico, integrado a sistemas de monitoração da Eletronorte, o sistema subdividiu-se em dois módulos de interação com o usuário: o de diagnóstico e de validação.

O sistema atual está elaborado para diagnosticar três elementos do hidrogenador: estator, mancais e anel coletor alimentados com variáveis e regras obtidas e fornecidas em reuniões, treinamentos e pesquisa. No entanto devido a pouca referências sobre o anel coletor, o sistema está executando diagnóstico apenas para defeitos nos elementos: estator e mancais.

Esse sistema de diagnóstico encontra-se plenamente desenvolvido e funcional, mas como protótipo para estudo de viabilidade, aceitação e adequação. Testado apenas com dados criados com propósitos de teste, o sistema foi instalado na usina de Tucuruí para ser feitos teste de conformidade, ou seja, os técnicos estão a espera de uma ocorrência de um defeito para analisar se o software está mantendo um diagnóstico correto igual ou próximo ao diagnosticado pelos técnicos.

### 6.1 PRINCIPAIS CONTRIBUIÇÕES DESTA TRABALHO

O sistema propiciou vários estudos sobre os hidrogenadores e suas partes com especialistas e com referências bibliográficas para poder alimentar com regras a framework *fuzzy*. Assim como obteve-se um acervo de conhecimento sobre diagnósticos de hidrogenadores.

A principal contribuição do trabalho foi o desenvolvimento de um software de diagnóstico especializado em e hidrogeradores, auxiliando a área de manutenção no planejamento e na intervenção desse equipamento, tornando a ação dos técnicos mais efetivas na resolução dos problemas.

Essa aplicação computacional possibilitou uma integração dos sistemas de monitoração da Eletronorte, exercendo um retorno nos investimentos de anos em armazenamento dos dados de monitoração de sinais e dados nos equipamento assim como possibilita reunir conhecimento de especialistas do corpo técnico da eletronorte desde mais novos como os dos mais experientes.

Outras contribuições do trabalho foram na área de engenharia de software no aprimoramento do processo de desenvolvimento de software da Eletronorte e em especial nos sistemas especialistas, porque suas instâncias são diferentes dos demais processos de desenvolvimentos de software, pois foi necessário incluir mais esforços na pesquisa, coleta de regras com especialistas e do referencias bibliográficas do que a própria codificação.

O trabalho foi pioneiro dentro da Eletronorte em usar o processo institucionalizado para desenvolvimento de software padronizado pela área de qualidade de software da empresa, juntando a análise de um sistema especialista e planejamento arquitetural.

## 6.2 TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuro essa pesquisa possibilita um estudo para aquisição de novas regras para diagnóstico, assim como aderir novos equipamentos e partes de hidrogeradores. É também necessário uma análise refinada nas regras atribuídas ao sistema, testes mais técnico e uma comparação de diagnósticos detectados na manutenção com os do sistema.

Com os estudos feitos com os diagnósticos da manutenção preditiva, e com amadurecimento da ferramenta abre-se a oportunidade de ampliar o sistema para diagnóstico antevendo uma falha ou defeito.

O sistema necessita de uma ferramenta Web para visualização para os operadores e técnicos dos diagnósticos, centralizando essas informações em um único local tornando o acesso distribuído e sem necessidade instalação e configuração.

Além deste, o sistema de diagnóstico necessita de um implementação de em que seja feito o mapeamento de dados sem a necessidade de alteração do código-fonte.

## REFERENCIAS

AZEVEDO, Helio Ricardo T. de et al., **Sistema para diagnóstico de falhas: Dificuldades e soluções para obtenção de resultados**. ABRAMAN – 20º Congresso Brasileiro de Manutenção, 2005, Belo Horizonte.

ANEEL - Agencia Nacional de Energia Eletrica, **Qualidade e Confiabilidade dos Serviços de Energia Elétrica** <http://www.aneel.gov.br/area.cfm?idArea=641&idPerfil=6>. Acesso em 11/08/2009

ALMEIDA, Marcio Tadeu de, **Manutenção Preditiva: Benefício e Lucratividade**. Link: [www.mtaev.com.br/download/mnt2.pdf](http://www.mtaev.com.br/download/mnt2.pdf) , acesso em: 23/08/2009 as 11:17.

BEZERRA, Eduardo, **Princípios de Análise e Projeto de Sistemas com UML**, 3º Triagem, Editora Campos, 2006

BRAMATTI, Norberto, **Desenvolvimento e Implantação de um sistema de monitoramento on-line de compensadores síncronos**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Eletrica, UFPA, 2005.

BATOCCHIO, Maria Cristina Aranda, **Desenvolvimento de um Sistema Especialista em Usinagem**, Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 1993.

DO VALE, José Marcelo Araujo, **Desenvolvimento de sistema especialista para auxílio a manutenção preditiva em compensadores síncronos**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Eletrica, UFPA, 2003.

FREITAS, Fabrizo Leal et al., **Monitoração permanente de geradores: Abordagem para o diagnóstico preditivo**, Seminario do Estado da Arte em Sistema de Monitoramento Aplicados a Maquinas Rotativas, Brasilia, 2008.

The MathWorks, **Fuzzy Logic Toolbox: Fuzzy Inference System**, Site: <http://www.mathworks.com/access/helpdesk/help/toolbox/fuzzy/fp351dup8.html> , ultimo acesso em : 13/08/2010

FUJIMOTO, R. Y., **Diagnóstico automático de defeitos em rolamentos baseados em Lógica fuzzy**, Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005

GIRDHAR, P., **Practical machinery vibration analysis and predictive maintenance**. Editora Elsevier, 1ª impressão, 2004, USA.

IBRAHIM, Ahmad M., **Fuzzy Logic for embedded systems applications**. Editora Elsevier, 2004, USA

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. IEEE draft standard P1438/D1.5 **Guide for Applications of Plant Monitoring for Hydroelectric Facilities**: Potential cost benefits of Plant Condition Monitoring (PCM). Janeiro de 1999.

KONAR, Amit, **Artificial Intelligence and Soft Computing** : Behavioral and Cognitive Modeling of the Human, Brain Editora CRC Press, E.U.A.1999

KLIR, George J., YUAN, Bo, **Fuzzy Sets and Fuzzy Logic** : Theory and Applications, Editora, Prentice Hall P T R, New Jersey, E.U.A, 1995.

MEZA, E.B.M, SCHILING, M.Th. DE SOUZA, J. C. Stacchini, DO COUTO FILHO, M. B., **Utilização de um modelo Neuro-Fuzzy para a localização de defeitos em sistemas de potência**. Revista Controle & Automação, Volume 17 Nº 01, Janeiro, Fevereiro e Março 2006. Site: <http://www.scielo.br/pdf/ca/v17n1/a10v17n1.pdf>, último acesso em: 29 de agosto de 2009, às 10:44.

MUNAKATA, Toshinori, **Fundamentals of the New Artificial Intelligence: Neural, Evolutionary, Fuzzy and More**, 2ª Edição, Editora Springer, 2008, USA.

Maintenance Strategies, IEEE Guide for Maintenance, **Operation and Safety of Industrial and Commercial Power System**, 1998

MOBLEY, R. KEITH, **An Introduction to predictive maintenance**, 2ª Edição, Editora Butterworth-Heinemann, 2002.

MOBLEY, R. Keith, HIGGINS, Lindley R. , WIKOFF, Darrin J., **Maintenance Engineering Handbook** 7ª Edição, Editora MacGrawHill, 2008

NASCIMETO JR., Cairo Lúcio , YONEYAMA, Takashi, **Inteligencia Artificial em controle e automação**. Editora EdigarBlücher LTDA e FAPESP. 1º Edição 2000, 1º reimpressão 2002, São Paulo, Brasil.

PEREIRA, Vanilson Gomes, **Controle Automático de Adição de  $AlF_3$  em cubas de redução de alumínio, usando lógica fuzzy**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, UFPA, Belém, 2005.

PRESSMAN, Roger S., **Engenharia de Software**, Editora : McGraw-Hill, 2006

ROSS, Timothy, **Fuzzy Logic with Engineering Application**, 2º Edição, Editora John Wiley & Sons, Ltd, Inglaterra, 2004.

SOUZA, Rodrigo de Queiroz, **Metodologia e Desenvolvimento de um sistema de manutenção preditiva visando a melhoria da confiabilidade de ativos de uma usina hidrelétrica**, Universidade de Brasília, Dissertação de Mestrado, Brasília ,2008.

SIMÕES, Marcelo Godoy, SHAW, Ian S., **Controle e modalagem fuzzy: Engenharia de Sistemas**, Editora Blucher e Fapesp. 2ª Edição, São Paulo, 2007

WANG, L.X., **A Course in Fuzzy Systems and Control**, Prentice Hall International, 1997.

## APÊNDICE A – CONFIURAÇÃO DO SISTEMA DE DIAGNÓSTICO DE HIDROGERADORES

A seguir é apresentado os predicados dos Conjuntos Fuzzy das entradas e seus respectivos limites de operação normal e de alarme dos mancais da UGH-01.

Tabela 3 - Variáveis que serão utilizadas na elaboração da base de regras do sistema de diagnóstico da UGH- 01  
TUCURUÍ para Mancais

	Descrição	Universo		Predicado dos Conjuntos Fuzzy				
		MIN	MAX		Normal		Alarme-1	Und.
X1	Temp. do óleo MGT(Mancal Guia da Turbina)	0	100	$A^{1-1}$	55	$A^{1-2}$	70	°C
X2	Temp. do metal MGT(Mancal Guia da Turbina)Patim Direito	0	100	$A^{2-1}$	58	$A^{2-2}$	75	°C
X2	Temp. do metal MGT(Mancal Guia da Turbina)Patim Esquerdo	0	100	$A^{3-1}$	58	$A^{3-2}$	75	°C
X3	Variação da Temp. do óleo ME(Mancal de Escora)	0	100	$A^{4-1}$	45	$A^{4-2}$	70	°C
X4	Temp. do metal ME(Mancal de Escora) Patim Direito	0	100	$A^{5-1}$	70	$A^{5-2}$	85	°C
X4	Temp. do metal ME(Mancal de Escora) Patim Esquerdo	0	100	$A^{6-1}$	70	$A^{6-2}$	85	°C
X5	Temp. do óleo MGG(Mancal Guia do Gerador)	0	100	$A^{7-1}$	51	$A^{7-2}$	70	°C
X6	Temp. do metal MGG(Mancal Guia do Gerador)Patim Direito	0	100	$A^{8-1}$	57	$A^{8-2}$	75	°C
X7	Temp. do metal MGG(Mancal Guia do Gerador)Patim Esquerdo	0	100	$A^{9-1}$	57	$A^{9-2}$	75	°C
X8	Média das Temp. da Saída de Ar dos Radiadores	0	100	$A^{10-1}$	45	$A^{10-2}$	53	°C
X9	Oscilação Radial 0° MGT(Mancal Guia da Turbina)	0	400	$A^{11-1}$	100	$A^{11-2}$	350	µmP-P
X10	Oscilação Radial 90° MGT(Mancal Guia da Turbina)	0	400	$A^{12-1}$	100	$A^{12-2}$	350	µmP-P
X11	Oscilação Axial 0° GG(Grupo Gerador)			$A^{13-1}$		$A^{13-2}$		µmP-P
X12	Oscilação Axial 180° GG(Grupo Gerador)			$A^{14-1}$		$A^{14-2}$		µmP-P

X13	Oscilação Radial 0° MGG(Mancal Guia do Gerador)	0	300	$A^{15-1}$	100	$A^{15-2}$	280	$\mu\text{mP-P}$
X14	Oscilação Radial 90° MGG(Mancal Guia do Gerador)	0	300	$A^{16-1}$	100	$A^{16-2}$	280	$\mu\text{mP-P}$
X15	Potência Ativa	0	350	$A^{17-1}$	180	$A^{17-2}$	330	MW
X16	Pressão caixa espiral	0	6	$A^{18-1}$	5,5	$A^{18-2}$	$X < 5,5$	Kgf/cm <sup>2</sup>
X17	Pressão de sucção	-1	2	$A^{19-1}$		$A^{19-2}$		Kgf/cm <sup>3</sup>
X18	Pressão da Tampa da Turbina	0	1	$A^{20-1}$		$A^{20-2}$		Kgf/cm <sup>4</sup>
X19	Queda	0	70	$A^{21-1}$	66	$A^{21-2}$	56	m

Nesta outra tabela (4) é apresentado os predicados dos Conjuntos Fuzzy das entradas e seus respectivos limites de operação normal e de alarme dos mancais da UGH-01 na configuração do estator.

Tabela 4 - Variáveis que serão utilizadas na elaboração da base de regras do sistema de diagnóstico da UGH- 01 TUCURUÍ para o Estator

	Descrição	Universo		Predicado dos Conjuntos Fuzzy				Und.
		MIN	MAX		Normal		Alarme	
X1	Média da Temp. do Enrolamento	0	130	$A^{1-1}$	[30 100]	$A^{1-2}$	[100 115]	
X2	Média da Temp. do Ar	0	100	$A^{2-1}$	[30 55]	$A^{2-2}$	[55 60]	
X3	Média da Temp. do Núcleo	0	100	$A^{3-1}$	[30 65]	$A^{3-2}$	[65 70]	
X4	Potência do Hidrogerador	80	360	$A^{4-1}$	[100 180]	$A^{4-2}$	[180 350]	MW
X5	Tensão do Hidrogerador	1000 0	1500 0	$A^{5-1}$	[12000 13200]	$A^{5-2}$	[13200 14600]	V
X6	Descargas Parciais	0	100	$A^{6-1}$	$x < 50$	$A^{6-2}$	$x > 50$	% variação
	Inspeção Visual				Sujeira no Enrolamento		Efeito térmico na pintura de acabamento	Sinais de vibração no núcleo
					Danos mecânicos nas cabeças de		Existência de corpo estranho no enrolamento	Irregularidade de nos dedos de pressão

					bobina do enrolamento			
					Trincas no enrolamento		Sinais de descargas parciais	Sinais de possíveis roçamentos no rotor
X7	Resistência de Isolamento	0	300	$A^{7-1}$	> 200	$A^{7-2}$	< 200	MΩ
X8	Medição do Entreferro	0	30	$A^{8-1}$	20	$A^{8-2}$	<20	mm
X9 0	Vibração das Barras do Estator	0	350	$A^{9-1}$		$A^{9-2}$		
X1 0	Vibração do Núcleo (Verificar)	0	350	$A^{10-1}$		$A^{10-2}$		

A partir de relatórios obtidos nas entrevistas com profissionais da Eletronorte, foram concluídas algumas variáveis de saídas para mancais, ver tabela 5.

Tabela 5 - Prováveis dos mancais Defeitos nas Saídas do Sistema Fuzzy para Mancais

$F^0$	Condição Normal
$F^1$	Desbalanceamento
$F^2$	Roçamento (MGG)
$F^3$	Roçamento (MGT)
$F^4$	Roçamento (ME)
$F^5$	Excentricidade dos Mancais MGT
$F^6$	Excentricidade dos Mancais MGG
$F^7$	Suporte do Mancal Folgada (ME)
$F^8$	Oil Whirl
$F^9$	Falha no Sistema de Circulação de Óleo MGG
$F^{10}$	Falha no Sistema de Circulação de Óleo MGT
$F^{11}$	Falha no Sistema de Circulação de Óleo ME
$F^{12}$	Deficiência do Sistema de Refrigeração dos Geradores
$F^{13}$	Indeterminado

Da mesma forma, com base em entrevistas e relatórios foram concluídas algumas saídas para o estator, ver tabela 6.

Tabela 6 - Prováveis dos mancais Defeitos nas Saídas do Sistema Fuzzy para Estator

$F^0$	Condição Normal
$F^1$	Ovalização do Estator
$F^2$	Afrouxamento do Enrolamento Estatórico
$F^3$	Nível de Descarga Elétrica Elevada
$F^4$	Sobre-aquecimento do Enrolamento Estatórico
$F^5$	Pontos Quentes em Conexões
$F^6$	Vazão anormal de água de resfriamento
$F^7$	Redução da suportabilidade dielétrica
$F^8$	Afrouxamento do Núcleo

As variáveis de saída estão configuradas com os parâmetros da função pertinência abaixo (Tabela7):

Tabela 7 - Predicado dos Conjuntos Fuzzy das saídas e suas respectivas áreas de operação nos mancais da UGH-01 mancais

Defeitos $F^0, F^1, F^2, F^3, F^4, F^5, F^6, F^7, F^8, F^9, F^{10}, F^{11}, F^{12}, F^{13}$		
Intervalo de [0 1]	Função de Pertinência	
<b>Conjuntos Fuzzy (02)</b>	<b>Tipo</b>	<b>Intervalo</b>
Baixo(B)	Triangular	[0 0.25 0.5]
Alto(A)	Triangular	[0.5 0.75 1]

Da mesma forma, para as saídas do estator, a tabela 8 mostra como as funções pertinências estão configuradas.

Tabela 8 - Predicado dos Conjuntos Fuzzy das saídas e suas respectivas áreas de operação nos mancais da UGH-01 estator

Defeitos $F^0, F^1, F^2, F^3, F^4, F^5, F^6, F^7, F^8$		
Intervalo de [0 1]	Função de Pertinência	
<b>Conjuntos Fuzzy (02)</b>	<b>Tipo</b>	<b>Intervalo</b>

Baixo(B)	Triangular	[0 0.25 0.5]
Alto(A)	Triangular	[0.5 0.75 1]

Com base nos conjuntos *fuzzy* definidos para as entradas e os defeitos, foram utilizadas regras que mostram irregularidades na operação os componentes do hidrogenadores onde denotam “causas”.

A seguir são algumas regras apresentadas as regras obtidas em treinamentos que originaram os testem:

**Regra 1:** SE (X11 É  $A^{11-2}$ ) E (X12 É  $A^{12-2}$ ) E (X15 É  $A^{15-2}$ ) E (X16 É  $A^{16-2}$ ) E (X17 É  $A^{17-2}$ ) E (X21 É  $A^{21-2}$ ) ENTÃO  $F^1$  É ALTO

**Regra 2:** SE (X7 É  $A^{7-2}$ ) E (X8 É  $A^{8-2}$ ) E (X9 É  $A^{9-2}$ ) E (X15 É  $A^{15-2}$ ) E (X16 É  $A^{16-2}$ ) ENTÃO ( $F^2$  É ALTO) e/ou ( $F^6$  É ALTO) e/ou ( $F^9$  É ALTO)

**Regra 3:** SE (X1 É  $A^{1-2}$ ) E (X2 É  $A^{2-2}$ ) E (X3 É  $A^{3-2}$ ) E (X11 É  $A^{11-2}$ ) E (X12 É  $A^{12-2}$ ) ENTÃO ( $F^3$  É ALTO) e/ou ( $F^5$  É ALTO) e/ou ( $F^{10}$  É ALTO)

**Regra 4:** SE (X4 É  $A^{4-2}$ ) E (X5 É  $A^{5-2}$ ) E (X6 É  $A^{6-2}$ ) ENTÃO ( $F^4$  É ALTO) e/ou ( $F^{11}$  É ALTO)

**Regra 5:** SE (X4 É  $A^{4-2}$ ) E (X5 É  $A^{5-2}$ ) E (X6 É  $A^{6-2}$ ) E (X13 É  $A^{13-2}$ ) E (X14 É  $A^{14-2}$ ) ENTÃO ( $F^7$  É ALTO)

**Regra 6:** SE (X7 É  $A^{7-2}$ ) E (X8 É  $A^{8-2}$ ) E (X9 É  $A^{9-2}$ ) E (X10 É  $A^{10-2}$ ) ENTÃO ( $F^{12}$  É ALTO)

**Regra 7:** SE (X1 É  $A^{1-2}$ ) E (X2 É  $A^{2-1}$ ) E (X3 É  $A^{3-1}$ ) E (X4 É  $A^{4-1}$ ) ENTÃO  $F^4$  É BAIXO

**Regra 8:** SE (X1 É  $A^{1-2}$ ) E (X2 É  $A^{2-2}$ ) E (X3 É  $A^{3-1}$ ) E (X4 É  $A^{4-2}$ ) ENTÃO  $F^4$  É ALTO

**Regra 9:** SE (X1 É  $A^{1-1}$ ) E (X2 É  $A^{2-2}$ ) E (X3 É  $A^{3-1}$ ) ENTÃO  $F^6$  É BAIXO

**Regra 10:** SE (X1 É  $A^{1-2}$ ) E (X2 É  $A^{2-2}$ ) E (X3 É  $A^{3-1}$ ) ENTÃO  $F^6$  É ALTO

**Regra 11:** SE (X1 É  $A^{1-1}$ ) E (X2 É  $A^{2-2}$ ) E (X3 É  $A^{3-2}$ ) ENTÃO  $F^6$  É ALTO

**Regra 12:** SE (X3 É  $A^{3-1}$ ) E (X6 É  $A^{6-2}$ ) E (X8 É  $A^{8-1}$ ) E (X11 É  $A^{11-2}$ ) ENTÃO  $F^8$  É ALTO

**Regra 13:** SE (X3 É  $A^{3-1}$ ) E (X6 É  $A^{6-2}$ ) E (X8 É  $A^{8-1}$ ) E (X11 É  $A^{11-1}$ ) ENTÃO  $F^8$  É BAIXO

**Regra 14:** SE (X6 É  $A^{6-2}$ ) E (X8 É  $A^{8-1}$ ) E (X11 É  $A^{11-2}$ ) ENTÃO  $F^3$  É ALTO

**Regra 15:** SE (X6 É  $A^{6-2}$ ) E (X8 É  $A^{8-1}$ ) E (X11 É  $A^{11-1}$ ) ENTÃO  $F^3$  É BAIXO

**Regra 16:** SE (X1 É  $A^{1-2}$ ) E (X2 É  $A^{2-2}$ ) E (X3 É  $A^{3-1}$ ) E (X6 É  $A^{6-1}$ ) E (X8 É  $A^{8-1}$ ) E (X10 É  $A^{10-1}$ ) E (X11 É  $A^{11-1}$ )  $F^7$  É BAIXO

**Regra 17:** SE (X1 É  $A^{1-2}$ ) E (X2 É  $A^{2-2}$ ) E (X3 É  $A^{3-2}$ ) E (X6 É  $A^{6-2}$ ) E (X8 É  $A^{8-2}$ ) E (X10 É  $A^{10-1}$ ) E (X11 É  $A^{11-1}$ )  $F^7$  É ALTO

**Regra 18:** SE (X1 É  $A^{1-2}$ ) E (X2 É  $A^{2-2}$ ) E (X3 É  $A^{3-1}$ ) E (X6 É  $A^{6-2}$ ) E (X8 É  $A^{8-2}$ ) E (X10 É  $A^{10-1}$ ) E (X11 É  $A^{11-1}$ )  $F^7$  É MÉDIO