

UTILIZAÇÃO DE TÉCNICAS INTELIGENTES NAS METODOLOGIAS DE  
MANUTENÇÃO DE GERADORES SÍNCRONOS

João Luiz Botelho Duarte

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO  
DOS PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS  
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE  
EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA ELÉTRICA.

Aprovada por:

---

Dr. Walter Issamu Suemitsu, Dr. Ing.

---

Dr. José Luiz da Silva Neto, Ph.D.

---

Dr. Maria Dias Bellar , Ph.D.

---

Dr. Luís Guilherme Barbosa Rolim, Dr. Ing.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

JUNHO DE 2007

DUARTE, JOÃO LUIZ BOTELHO

Utilização de Técnicas Inteligentes nas  
Metodologias de Manutenção de Geradores  
Síncronos [Rio de Janeiro] 2007

X, 144 p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ, M.Sc.,  
Engenharia Elétrica, 2007)

Dissertação - Universidade Federal do Rio  
de Janeiro, COPPE

1. Monitoramento e Diagnóstico de Máquinas  
Elétricas

I. COPPE/UFRJ II. Título ( série )

**à minha avó Anita,  
que esteve comigo o tempo todo.**

# Agradecimentos

Essa dissertação se fez possível graças a ajuda de diversos fatores e pessoas, dos quais nem todos são mencionados aqui. Desde já peço desculpas aqueles que por uma razão ou outra não foram mencionados.

Agradeço aos membros da banca, em particular ao meu orientador Walter Suemitsu, pelo privilégio de ser seu orientando, e ao professor José Luiz Neto, que ao longo de praticamente toda minha carreira estudantil na UFRJ me acompanhou, sendo não somente um mentor como também um companheiro de trabalho e um amigo.

Agradeço a todos os meus companheiros de Furnas Centrais Elétricas, pela disposição em me ajudar sempre que requisitado. Em particular aos engenheiros Antonio Boulanger Uchoa Ribeiro e Fabrício de Souza Henriques, fundamentais para o desenvolvimento de todo trabalho de pesquisa nas unidades da empresa e para o correto entendimento de muitas das ferramentas utilizadas.

Agradeço a todos os meus amigos que de uma maneira ou outra me ajudaram ao longo desses mais de três anos, com conhecimento, apoio técnico, moral, e todo o suporte que fosse possível.

Agradeço a engenheira Maria Julia de Fátima Walter, minha gerente na Petrobras quando da época do término desse trabalho, por me apoiar e dar liberdade para que eu desenvolvesse meu trabalho. Assim como a todos os meus colegas de divisão que sempre me deram força.

Agradeço a minha família nas pessoas de minha mãe, senhora Ana Maria Mota Botelho Duarte, e meu pai, senhor Roberto Bastos Duarte, por terem me dado as bases que tornaram tudo isso possível.

Por fim, porém de maior importância, agradeço a minha amada namorada Simone Pinto Paiva, por não me deixar desistir nunca e sempre estar ao meu lado.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

## UTILIZAÇÃO DE TÉCNICAS INTELIGENTES NAS METODOLOGIAS DE MANUTENÇÃO DE GERADORES SÍNCRONOS

João Luiz Botelho Duarte

Junho/2007

Orientador: Walter Issamu Suemitsu

Programa: Engenharia Elétrica

Este trabalho apresenta uma visão geral acerca das metodologias de manutenção de Geradores Síncronos, focando as utilizadas pelas grandes empresas do setor elétrico brasileiro (em particular Furnas Centrais Elétricas S.A.). Posteriormente avalia com maior ênfase as metodologias que fazem uso de técnicas inteligentes, verificando sua aplicabilidade no Brasil, seus prós e contras e características relevantes. Por fim apresenta uma pesquisa sobre falhas em unidades geradoras e desenvolve um modelo para diagnóstico do nível de estresse dos enrolamentos estatóricos de geradores síncronos usando Lógica *Fuzzy*. Com os resultados obtidos, inerentes ao modelo e a pesquisa acerca das ocorrências de falhas em hidrogeradores síncronos coletados junto a Furnas são desenvolvidas as conclusões do trabalho. Tais conclusões salientam a necessidade de se desenvolver de maneira correta modelos e ferramentas que utilizem técnicas inteligentes e demonstram sua importância no que tange a métodos de manutenção e avaliação de enrolamentos estatóricos de geradores síncronos.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

THE USE OF INTELIGENT TECHNIQUES OVER MAINTENANCE  
METHODOLOGIES FOR SYNCHRONOUS GENERATORS

João Luiz Botelho Duarte

June/2007

Advisor: Walter Issamu Suemitsu

Department: Electrical Engineering

This work presents an overview about maintenance methodologies for Synchronous Generators, with emphasis on those used by the major Brazilian utility companies, such as Furnas Centrais Elétricas S.A.. Later on it evaluates those methodologies that use intelligent techniques, checking their applicability in Brazil, their pros and cons and their relevant characteristics. Concluding it presents a investigation about generation units failures and develops a diagnosis model based on Fuzzy Logic, that verifies the stress level of the stator windings of synchronous generators. Finally, by means of the model and the failure research developed hence, results are achieved and are summarized in the conclusions of this work. These conclusions emphasizes the necessity of right development of models and the correct use of the intelligent technique tools, besides it shows the importance of such techniques when used in maintenance and diagnosis methodologies for stator windings of synchronous generators.

# Índice

## CAPÍTULO 1

<b>APRESENTAÇÃO DO CENÁRIO DE ESTUDO</b>	<b>1</b>
1.1. Motivação	7
1.2. Objetivos	7
1.3. Escopo do trabalho	8

## CAPÍTULO 2

<b>PRINCIPAIS TIPOS DE FALHAS E CONDIÇÕES ANORMAIS DE OPERAÇÃO EM GERADORES SÍNCRONOS</b>	<b>10</b>
2.1. Esforços atuantes sobre os geradores síncronos	12
2.1.1. Esforços sobre a isolação	16
2.2. Proteção de Geradores Síncronos	18
2.3. Métodos Clássicos para Detecção de Falhas	25
2.4. Metodologias de Manutenção	28

## CAPÍTULO 3

<b>MONITORAMENTO DA CONDIÇÃO, PROCESSOS DE DIAGNÓSTICO E ANÁLISE DE OCORRÊNCIAS</b>	<b>30</b>
3.1. Variáveis monitoradas	33
3.2. Possíveis falhas e variáveis correspondentes	34
3.2.1. A experiência de Furnas Centrais Elétricas S.A	37
3.2.2. Exemplo das vantagens de um sistema de monitoramento	42
3.3. Ocorrências em Unidade Geradoras de Furnas	43
3.3.1. Formação do banco de dados	44
3.3.2. Descrição e apresentação do banco de dados	46
3.3.3. Resultados obtidos	48
3.4. Exemplo de falha em Unidade Geradora [40]	55
3.4.1. Análise da Ocorrência	56
3.5. Análise crítica do Banco de Dados de Ocorrências	61

## CAPÍTULO 4

<b>MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DE FALHAS E TÉCNICAS INTELIGENTES</b>	<b>65</b>
---	-----------

<b>4.1. Técnicas Inteligentes</b>	<b>65</b>
<b>4.2. Abordagem Simbolista</b>	<b>68</b>
<b>4.3. Abordagem Conexionista</b>	<b>70</b>
4.3.1. Redes Neurais Artificiais - RNAs	71
4.3.2. Lógica Difusa ou Nebulosa ( <i>Fuzzy</i> )	74
<b>4.4. Técnicas Inteligentes associadas a Sistemas Elétricos</b>	<b>78</b>
<b>4.5. Análise Crítica da Literatura</b>	<b>81</b>
4.5.1. Demais Considerações	84

## **CAPÍTULO 5**

<b>MODELAGEM FUZZY</b>	<b>86</b>
<b>5.1. Definição dos esforços envolvidos</b>	<b>87</b>
<b>5.2. Condições de contorno para o modelo</b>	<b>87</b>
<b>5.3. Atribuição de valores lingüísticos</b>	<b>89</b>
5.3.1. Variável de Saída ou “Conseqüente”	90
5.3.2. Variáveis de Entrada ou “Antecedentes”	91
<b>5.4. Construção das funções de pertinência</b>	<b>93</b>
<b>5.5. Definição das Regras Lógicas</b>	<b>102</b>
<b>5.6. “Desfuzzificação” ou resultados do modelo</b>	<b>104</b>
<b>5.7. Desenvolvimento do modelo usando o Matlab®</b>	<b>106</b>
5.7.1. Exemplos de utilização do modelo	112
<b>5.8. Avaliação do modelo <i>Fuzzy</i> desenvolvido</b>	<b>119</b>

## **CAPÍTULO 6**

<b>CONCLUSÕES E TRABALHO FUTUROS</b>	<b>121</b>
<b>6.1. Avaliação do objetivo e Conclusões</b>	<b>121</b>
<b>6.2. Sugestões para trabalhos futuros</b>	<b>123</b>
<b>6.3. Demais considerações</b>	<b>123</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>125</b>
<b>APÊNDICE A - BREVE REVISÃO TEÓRICA DA MÁQUINA SÍNCRONA</b>	<b>130</b>
<b>APÊNDICE B - PROGRAMA “MODELO1” EM MATLAB®</b>	<b>141</b>

# Lista de Figuras:

- 1.1. Esquema de Usina Hidrelétrica (exemplo)
- 1.2. Esquema de Usina Termelétrica (exemplo)
- 1.3. Matriz Energética (elétrica) Brasileira
- 2.1.1. Estatísticas de Falhas IEEE e EPRI
- 2.1.2. Pagamentos de sinistro seguradora Allianz, de 1996 a 1999
- 2.2.1. Esquema completo de proteção [Anderson P.; "Power Systems Protection" ; IEEE Press]
- 2.3.1. Esquema de proteção diferencial de gerador
- 3.2.1.1. Sistema de monitoramento (Usina de Mascarenhas de Moraes)
- 3.3.3.1. Total de ocorrências separadas por grupo
- 3.3.3.2. Evolução das ocorrências ao longo do período de observação
- 3.3.3.3. Total de ocorrências separadas por grupo, excetuando o grupo "Outros"
- 3.4.1. Falha a terra da UG#4 da Usina de Manso em 14 de fevereiro de 2004 (USMS.O)
- 3.4.1.1. Estado das bobinas da Unidade após a ocorrência
- 3.4.1.2. Danos às conexões dos pólos após a ocorrência
- 3.4.1.3. Oscilograma da ocorrência
- 4.1.1. Inteligência Artificial, Abordagens e Metodologias
- 4.3.1. Associação: Funções cerebrais X Inteligência Artificial
- 4.3.2.1. Relação lingüística entre atores *Fuzzy*
- 4.3.2.2. Diagrama esquemático: fuzzificação e desfuzzificação
- 5.3.1. Esquema do modelo *Fuzzy* implementado
- 5.4.1. Funções de pertinência *Fuzzy*; a) triangular, b)trapezoidal
- 5.4.2. Exemplos de variação de funções de pertinência triangulares [51]
- 5.4.3. Esquema de construção das funções de pertinência
- 5.4.4. Conjunto *Fuzzy* "ESTRESSE"
- 5.4.5. Conjunto *Fuzzy* "DPF"
- 5.4.6. Conjunto *Fuzzy* "DPA"
- 5.4.7. Conjunto *Fuzzy* "TXDP"
- 5.4.8. Conjunto *Fuzzy* "TEMP"
- 5.4.9. Conjunto *Fuzzy* "IDADE"
- 5.7.1. Tela de entrada do modelo piloto "MODELO1"
- 5.7.2. Tela de saída do modelo piloto "MODELO1"
- 5.7.1.1. Resultados da Simulação 01
- 5.7.1.2. Resultados da Simulação 02
- 5.7.1.3. Resultados da Simulação 03

# Lista de Tabelas:

- 1.1. Matriz Energética Brasileira
- 3.1. Classe de Isolamento x vida útil das unidades geradoras
  - 3.1.1. Relação de variáveis usualmente monitoradas
  - 3.2.1 Possíveis Defeitos x Medições Correspondentes
    - 3.2.1.1. Parque Gerador de Furnas Centrais Elétricas S.A
    - 3.2.1.2. Relação de variáveis monitoradas na USMM
  - 3.3.3.1. Relação de ocorrências de 2002
  - 3.3.3.2. Relação de ocorrências de 2003
  - 3.3.3.3. Relação de ocorrências de 2004
  - 3.3.3.4. Relação de ocorrências de 2005
  - 3.3.3.5. Relação de ocorrências de 2006
  - 3.3.3.6. Relação de ocorrências de 2002 a 2006
- 3.4.1.1. Seqüência de operação da proteção do evento
- 5.4.1. Definição do conjunto *Fuzzy* – ESTRESSE
- 5.4.2. Definição do conjunto *Fuzzy* – DPF
- 5.4.3. Definição do conjunto *Fuzzy* – DPA
- 5.4.4. Definição do conjunto *Fuzzy* – TXDP
- 5.4.5. Definição do conjunto *Fuzzy* – TEMP
- 5.4.6. Definição do conjunto *Fuzzy* – IDADE
- 5.5.1. Banco de regras aplicadas ao caso em estudo
- 5.7.1. Conjunto de simulações para “MODELO1”
  - 5.7.1.1. Variáveis de entrada para a simulação 01
  - 5.7.1.2. Variáveis de entrada para a simulação 02
  - 5.7.1.3. Variáveis de entrada para a simulação 03

# Capítulo 1

## Apresentação do Cenário de Estudo

A sociedade moderna, é dependente de suas próprias criações e conquistas. Os avanços tecnológicos possibilitaram melhorias nas condições de vida da maioria da população mundial, que dificilmente conseguiria se imaginar sem tais facilidades.

Em conformidade com essa tendência da população mundial encontra-se a sociedade brasileira.

Todas essas facilidades demandam um consumo muito grande de energia, consumo este que só tende a aumentar, apesar dos esforços em tornar os processos cada vez mais eficientes. Em geral, a energia que é consumida, apresenta-se em duas formas básicas: a energia elétrica e a energia térmica (combustível fóssil).

O sistema elétrico nacional (interligado e/ou isolado) é reconhecidamente um dos principais subsidiários do progresso no Brasil, sendo a energia elétrica, senão a responsável, um fator sempre presente na maioria dos processos produtivos, de bens e serviços. Haja visto a crescente preocupação de determinados setores da economia com a possibilidade de falta de energia.

Os empreendimentos responsáveis pela geração de energia elétrica em conjunto com aqueles que produzem e beneficiam o petróleo, os quais constituem a base da sociedade moderna, podem ser considerados sua força motriz. Para um mundo cada vez mais dependente de suas inovações tecnológicas o fornecimento de energia é imprescindível.

O modelo brasileiro consiste basicamente de empresas com grande participação do estado na base desse processo. As duas principais empresas

são a Eletrobrás S.A. (setor elétrico) e a Petrobras S.A. (setor petrolífero). Cada uma dessas empresas possui diversas subsidiárias.

Gerar e disponibilizar a energia elétrica necessária para manter a sociedade em movimento, de maneira confiável e rentável, é fundamental.

As fontes de energia disponíveis para a obtenção de energia elétrica são muitas e variadas, porém não inesgotáveis. Cada região do globo possui diferentes níveis de acesso a essas fontes de energia, de modo que cada país explora aquela que melhor lhe convém. Os países da América do Norte, por exemplo, possuem uma matriz energética baseada em usinas nucleares e térmicas, seguidas das hidrelétricas em alguns casos. Os países da Europa têm seu foco centrado nas usinas nucleares e térmicas basicamente. Recentemente houve um incremento considerável da parcela de energias renováveis na sua matriz, como é o caso da energia eólica na Alemanha. Essa é uma visão simplista do contexto porém bastante fiel a realidade.

As Figuras 1.1 e 1.2 apresentam desenhos esquemáticos de usinas hidrelétricas e termelétricas, respectivamente.

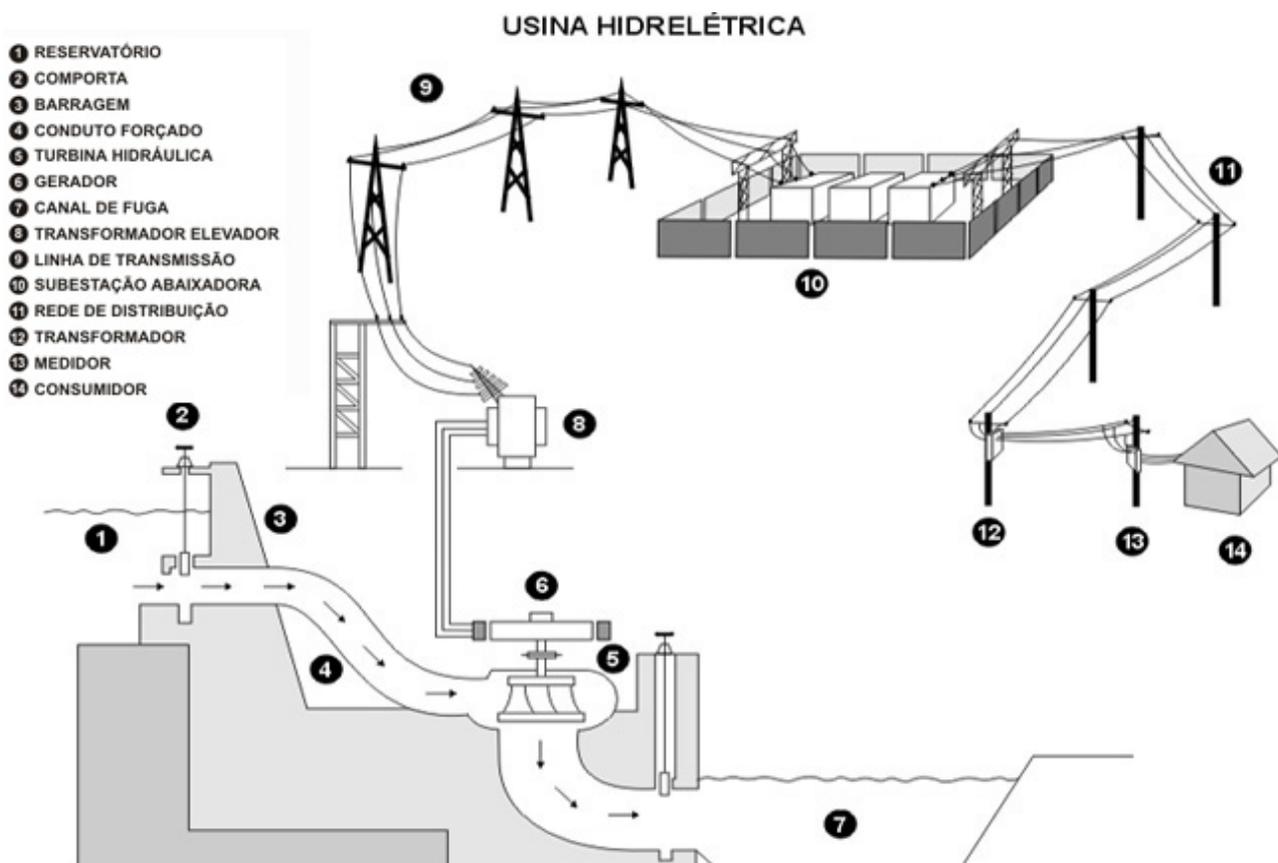


Figura 1.1. – Esquema de usina hidrelétrica (exemplo).

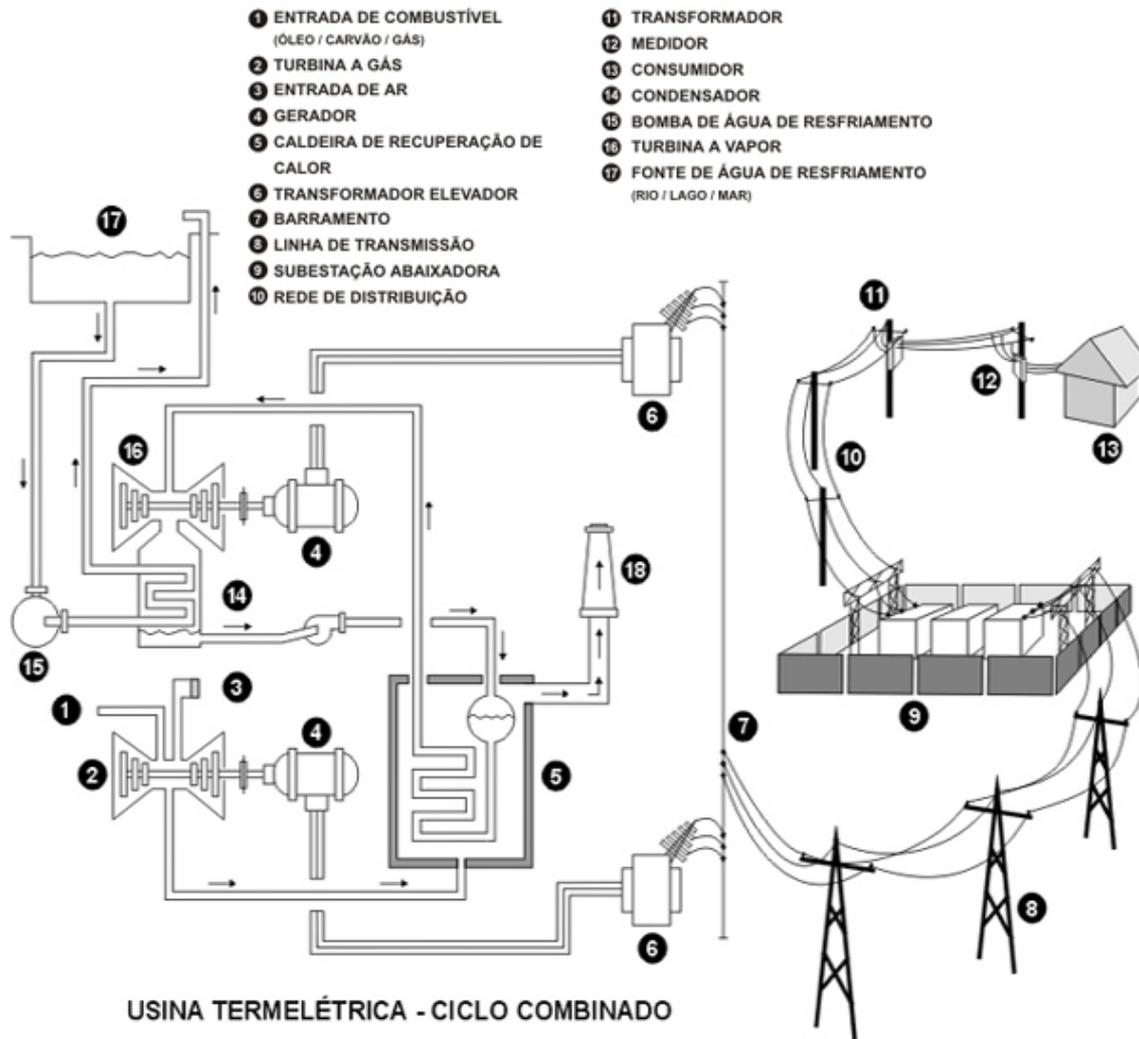


Figura 1.2. – Esquema de usina termelétrica (exemplo).

É importante notar que além da disponibilidade de fontes de energia existem outros fatores a serem considerados.

Os empreendimentos hidrelétricos, por exemplo, exigem a presença de determinadas condições ambientais (rios volumosos, desníveis ou quedas d'água consideráveis, grandes áreas disponíveis para a construção do reservatório e conseqüentemente alagadas, etc.) que inviabilizam sua construção em determinadas áreas. São também levadas em consideração características sociais e ecológicas, envolvendo desapropriação de terras, alagamento de reservas naturais, o possível desequilíbrio da ictiofauna da região, entre outras. Todas essas questões são devidamente consideradas durante a elaboração dos projetos hidroelétricos.

Em contrapartida a utilização de usinas termelétricas pode causar menores impactos durante sua construção, porém em longo prazo seus danos

ao meio ambiente, com emissões de gases efeito estufa e aumento do aquecimento global, são consideráveis.

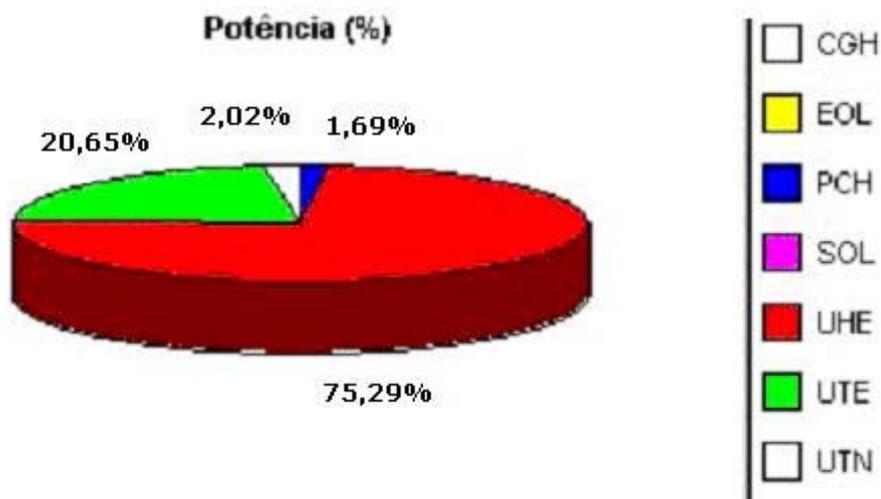
Não é pretensão desse trabalho avaliar os custos e danos ambientais referentes aos diversos modelos de geração de energia elétrica.

Outro fator a se considerar, para alguns o mais importante, é o custo econômico da implantação de tais empreendimentos. Mais uma vez citando como exemplo os empreendimentos hidrelétricos, sua implantação demanda altos investimentos com obras civis, desapropriações e equipamentos. Os investimentos iniciais são, portanto, de grande monta, porém posteriormente são empreendimentos de baixo custo operacional. Para o cálculo do retorno econômico do investimento deve ser considerado, o possível valor agregado do projeto e os futuros insumos necessários para sua manutenção.

Como pode se perceber nessa pequena explanação o estudo de viabilidade técnico–econômica (EVTE) de empreendimentos de geração de energia elétrica envolve uma complexidade significativa, a qual não se pretende estudar nesse trabalho em particular.

O Brasil possui uma matriz de geração de energia elétrica bem peculiar, basicamente hidrelétrica (77,09%), com pequeno reforço das térmicas, seguida das chamadas fontes renováveis, vide Tabela 1.1. A Figura 1.3 apresenta um gráfico com a matriz energética brasileira.

As informações apresentadas na Figura 1.3, assim como na Tabela 1.1 foram obtidas a partir do “BIG – Banco de Informações de Geração”, no *site* da Agência reguladora responsável pelos empreendimentos de energia elétrica no Brasil, ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica). Sua atualização é realizada periodicamente na página, essas informações foram extraídas em junho de 2007 (última atualização em 20 de junho de 2007). Endereço eletrônico “<http://www.aneel.gov.br/15.htm>”.



Legenda	
CGH	Central Geradora Hidrelétrica
EOL	Central Geradora Eolielétrica
PCH	Pequena Central Hidrelétrica
SOL	Central Geradora Solar Fotovoltaica
UHE	Usina Hidrelétrica de Energia
UTE	Usina Termelétrica de Energia
UTN	Usina Termonuclear

Figura 1.3. – Matriz Energética (elétrica) Brasileira.

Tabela 1.1. – Matriz Energética Brasileira.

Empreendimentos em Operação				
Tipo	Quantidade	Potência Outorgada (kW)	Potência Fiscalizada (kW)	%
<b>CGH</b>	204	108.328	107.882	0,11
<b>EOL</b>	15	239.250	236.850	0,24
<b>PCH</b>	283	1.713.070	1.683.045	1,69
<b>SOL</b>	1	20	20	0
<b>UHE</b>	158	74.438.695	74.850.411	75,29
<b>UTE</b>	968	23.396.578	20.526.085	20,65
<b>UTN</b>	2	2.007.000	2.007.000	2,02
<b>Total</b>	<b>1.631</b>	<b>101.902.941</b>	<b>99.411.293</b>	100

\* Os valores de porcentagem são referentes a Potência Fiscalizada. A Potência Outorgada é igual a considerada no Ato de Outorga. A Potência Fiscalizada é igual a considerada a partir da operação comercial da primeira unidade geradora.

Em vista da estrutura da matriz energética brasileira esse trabalho se aterá aos empreendimentos hidrelétricos, mais especificamente às máquinas síncronas de pólos salientes (modelos utilizados com maior freqüência nesse tipo de geração de energia elétrica).

Apesar do foco direcionado, muitas considerações doravante aqui realizadas se aplicam para quaisquer máquinas síncronas.

Historicamente máquinas hidráulicas representam o menor custo por MW entregue a rede. Os operadores do sistema (no Brasil papel realizado pelo ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico) tendem a operar estas unidades em sua carga nominal (*base load*), apenas removendo tais unidades de serviço ou reduzindo seu despacho em caso de demanda reduzida, quando se fizer necessária uma parada para manutenção, ou quando as condições do reservatório exijam tal retirada.

Em uma realidade de geração onde a regulamentação encontra-se, de certo modo, em desenvolvimento e passando por certas mudanças, a figura da taxação por indisponibilidade, ou a impossibilidade de despacho da energia contratada, surge em evidência.

Os custos incidentes sobre a hora de cada máquina parada (sejam eles advindos de lucros cessantes ou ainda dos próprios custos decorrentes do evento de manutenção) tornam atrativo o desenvolvimento de políticas de proteção ou ainda técnicas de acompanhamento preditivo que venham a impedir que os geradores sofram impactos danosos que forcem suas paradas prolongadas. Esse modelo de manutenção, com base na condição das máquinas e não em periodicidades pré-definidas, é usado em larga escala em outros países, como nos Estados Unidos e na União Européia.

Para efeito ilustrativo é interessante observar as conseqüências de paradas de máquinas prolongadas e não previstas, na indústria de petróleo por exemplo. As cifras envolvidas ficam em torno de centenas de milhares de dólares por dia.

Com base no exposto fica evidente que fatores como disponibilidade e confiabilidade dos geradores síncronos são primordiais para a manutenção do cenário apresentado. É justamente nessa área que esse trabalho pretende atuar, avaliando as metodologias de manutenção, associadas a geradores síncronos, que façam uso de técnicas inteligentes.

Esse trabalho pretende manter seu foco sobre a realidade industrial do Brasil, porém levando em consideração o que diz a literatura internacional. Serão utilizados como parâmetros dados advindos de casos reais de modo a dar base técnica ao exposto. Para tal o autor pesquisou junto a Furnas Centrais Elétricas S.A o histórico de falhas, distúrbios operacionais e atividades de manutenção de suas unidades geradoras. Além disso foi realizada extensa pesquisa junto ao corpo técnico da empresa, coletando suas visões, opiniões e o que se espera de determinadas metodologias de manutenção. Unindo-se os dados pesquisados, as opiniões dos profissionais e

o conhecimento obtido na literatura, construiu-se a base de argumentação deste trabalho.

Em seguida serão observados a motivação para o desenvolvimento do trabalho e seus objetivos, posteriormente é apresentado o escopo do trabalho.

### **1.1. Motivação**

A motivação inicial para o desenvolvimento deste trabalho surgiu a partir das observações do autor enquanto funcionário de Furnas Centrais Elétricas acerca das técnicas e metodologias de manutenção utilizadas.

Percebeu-se que apesar dos esforços da gerência de Engenharia de Manutenção para implantar novas metodologias e técnicas de manutenção baseadas na condição há ainda certa resistência por parte dos técnicos e profissionais de campo. A confiança nos resultados apresentados pelo monitoramento é restrita e a possibilidade de mudança no cenário atual de manutenção, baseada em intervenções preventivas e corretivas, para um cenário onde essas intervenções seriam baseadas nas condições das unidades geradoras, mostrava-se praticamente nula.

Sendo assim questionou-se a funcionalidade de sistemas inteiramente baseados em monitoramento e diagnóstico automático a partir das chamadas técnicas inteligentes e com isso sua real utilidade frente ao modelo utilizado na empresa, e por muitas vezes no país.

A partir desse cenário resolveu-se avaliar as razões para tal resistência e suas conseqüências, verificando então a necessidade de desenvolver-se um modelo de diagnóstico capaz de corresponder às necessidades daqueles que trabalham com manutenção de hidrogeradores.

### **1.2. Objetivos**

Este trabalho tem como principal objetivo apresentar um modelo piloto capaz de avaliar com sucesso o nível de estresse sob o qual está trabalhando o enrolamento estatórico de uma unidade geradora, hidrelétrica (gerador síncrono de pólos salientes), com potência média, entre 50 e 450 MW ; tal modelo deve ser capaz de assumir papel importante no tocante à metodologia de manutenção dos enrolamentos estatóricos dessas máquinas síncronas.

Para a construção do modelo foram utilizadas ferramentas inerentes às técnicas inteligentes.

O modelo proposto deve ser capaz de atuar como ferramenta complementar a metodologia de manutenção em vigor nas empresas do setor elétrico.

Para o desenvolvimento do trabalho realizou-se extensa pesquisa bibliográfica e pessoal acerca das metodologias de manutenção associadas aos geradores síncronos em voga no momento, de modo a avaliar a atuação das atuais tendências de monitoramento e acompanhamento preditivo, sob a luz das técnicas inteligentes, perante a literatura internacional e nacional.

Além da pesquisa literária desenvolveu-se também ampla pesquisa acerca dos dados de ocorrências de falhas nas máquinas de Furnas, de modo a situar em âmbito nacional o trabalho e fornecer base de comparação para o que foi colhido junto à literatura.

### **1.3. Escopo do trabalho**

De modo a organizar o estudo e facilitar seu entendimento esse trabalho foi estruturado da seguinte forma:

O Capítulo 1 – “Apresentação do cenário de estudo”, apresenta uma visão geral do panorama energético brasileiro, suas nuances, as características que levaram ao desenvolvimento desse trabalho, fatores motivantes e os objetivos do mesmo.

O Capítulo 2 – “Principais Tipos de Falhas e Condições Anormais de Operação em Geradores síncronos”, apresenta as principais falhas associadas a geradores síncronos, os esforços atuantes sobre os mesmos com maior ênfase sobre sistema de isolamento, além de uma visão geral sobre metodologias de proteção e manutenção.

O Capítulo 3 – “Monitoramento da Condição, Processos de Diagnóstico e Análise de Ocorrências”, expõe algumas das principais características dos sistemas de monitoramento de hidrogeradores, apresentando causas e conseqüências de se optar ou não por tais modelos. Ainda nesse capítulo se inicia a avaliação de relação entre as variáveis das máquinas síncronas, como correntes e temperatura, com seus possíveis modos de falha. São apresentados exemplos de ocorrências retiradas da experiência de Furnas Centrais Elétricas.

Em seguida, no Capítulo 4 – “Métodos de Avaliação de Falhas e Técnicas inteligentes”, serão apresentadas algumas das principais técnicas inteligentes utilizadas, as diferentes abordagens existentes, seus princípios de funcionamento, variações e modelos mais usuais. Esse capítulo em particular pretende descrever com maior atenção as técnicas de Redes Neurais e Lógica Fuzzy.

O Capítulo 5 – “Modelagem *Fuzzy*”, é desenvolvido um modelo piloto, utilizando a ferramenta de Lógica *Fuzzy*, com a finalidade de se avaliar o nível de estresse sob o qual estaria submetido um enrolamento estático de uma unidade hidrogeradora genérica.

O Capítulo 6 – “Conclusões e Trabalhos Futuros”, utiliza todo o conhecimento exposto nos capítulos anteriores para de maneira crítica e sucinta avaliar os resultados obtidos, além de avaliar a funcionalidade do modelo piloto proposto e do conteúdo pesquisado na literatura. Por fim são listadas algumas opções para trabalhos futuros seguindo o desenvolvido nesse trabalho.

Em Referências bibliográficas, são listadas as fontes utilizadas durante o processo de pesquisa, e regularmente citadas no decorrer do trabalho.

## Capítulo 2

# Principais Tipos de Falhas e Condições Anormais de Operação em Geradores Síncronos

Os geradores síncronos podem ser considerados componentes essenciais de praticamente todos os sistemas de potência fornecedores de energia elétrica. Assim como a máquina de indução nas fábricas, quando se trata de converter energia elétrica em mecânica, as máquinas síncronas são o principal meio de conversão de energia mecânica em elétrica [1].

Sob o ponto de vista econômico, os geradores síncronos em seu conjunto (doravante chamado Grupo Gerador), representam o item mais importante e oneroso do investimento em equipamentos nos sistemas elétricos de potência.

Apesar de sua incontestável importância técnica e econômica, há quem sustente a tese de que os geradores síncronos não receberam ao longo dos anos tanta atenção quanto outros equipamentos do sistema de potência no ponto de vista do desenvolvimento de proteção, ficando em segundo plano quando comparado a outros equipamentos do sistema de potência [2].

Em parte, essa diferença se deve ao fato de que o número de geradores no sistema, se comparado ao de transformadores, por exemplo, é bem inferior. Além disso ainda se sustenta a falsa crença de que os geradores síncronos por possuírem alta confiabilidade, não falham com uma frequência que se justifique o desenvolvimento de políticas de proteção mais agressivas [2].

A maioria dos administradores (ou responsáveis técnicos) prefere investir em políticas de manutenção conservadoras a desenvolver metodologias de proteção mais adequadas e dedicadas aos geradores

síncronos. Tais políticas de manutenção dividem-se principalmente em associações de metodologias preventivas e corretivas.

No cenário atual as práticas de manutenção vêm sendo alteradas, principalmente devido a impossibilidade de se parar as máquinas por longos períodos nas instalações, tendo em vista o possível prejuízo financeiro associado. Com isso as políticas de monitoramento e acompanhamento preditivo ganharam mais destaque nos últimos 15 a 20 anos, com o surgimento das metodologias de manutenção baseadas na condição das máquinas.

No apêndice A encontra-se uma breve revisão teórica acerca dos geradores síncronos, seus princípios de funcionamento e modelagem matemática.

As falhas ou ocorrências, referentes ao Grupo Gerador, podem ser divididas em três grupos (A, B e C). Esta é somente uma seleção, podendo ser modificada de acordo com o autor ou o foco do trabalho em questão.

A) Falhas de Isolamento<sup>1</sup>:

- Falhas entre fases nos enrolamentos do estator;
- Falhas a terra nos enrolamentos do estator;
- Falhas (curto-circuito) entre espiras nos enrolamentos do núcleo do estator;
- Falta a terra no enrolamento do rotor, que pode causar curto-circuito entre pólos e o aparecimento de vibração;

B) Sobreaquecimento:

- Sobreaquecimento nos mancais de guia e/ou escora (geralmente devido a problemas mecânicos e/ou de lubrificação);
- Sobreaquecimento nos enrolamentos do estator e/ou rotor que geralmente causado por: sobrecarga, vibração, alta taxa de Descargas Parciais, desbalanço de fase, falha no sistema de refrigeração, curto-circuito entre espiras ou curto-circuito entre lâminas do núcleo do estator, chamado de sobreaquecimento localizado; se não for combatido acarreta a diminuição

---

<sup>1</sup> Obs.: As falhas de isolamento podem se apresentar em diversos níveis de severidade. Caso muito severas, podem acarretar inclusive danos ao núcleo associado, provocando a queima e conseqüente fusão das lâminas do núcleo (como na Figura 2.2.2.1).

da vida útil do isolamento, o que direciona a máquina para a ocorrência de falhas do grupo A;

C) Outras condições anormais de operação:

- Perda da excitação, total ou parcial, fazendo com que a máquina opere em regime de subexcitação, absorvendo reativo do Sistema, o que tende a originar sobreaquecimento no estator e também no rotor, podendo, em paralelo, acarretar problemas de estabilidade ao Sistema;
- Sobretensão ou subtensão nos terminais da máquina, podendo ser originada, por exemplo, por perda de carga ou operação em regime de sobreexcitação;
- Correntes desbalanceadas nos enrolamentos do estator, provenientes de cargas desbalanceadas, abertura de enrolamentos, componentes harmônicas ou ainda outras fontes; o surgimento de correntes de seqüência negativa tende a induzir correntes no rotor e no eixo com freqüência dupla, originando sobreaquecimento localizado;
- Reversão de potência ou “motorização”, problema considerável para a máquina motriz, podendo ter reflexos no Sistema;
- Perda de sincronismo;
- Sobre ou sub freqüência, associada ou não a desbalanços de potência ativa e sobre ou subvelocidade mecânica;
- Problemas nos elementos mecânicos, como fogo, fissuras em equipamentos, quebra de elementos, perda da capacidade de lubrificação e afins;
- Problemas com os equipamentos auxiliares, como queima de fusíveis, perda de transformadores de acoplamento ou medição, perda do sistema de baixa tensão, defeito nos reguladores de tensão ou velocidade, etc.

## **2.1. Esforços atuantes sobre os geradores síncronos**

Durante condições normais de operação os geradores síncronos e seus componentes são submetidos a esforços diversos, externos e internos, que devem ser considerados nas especificações de projeto.

Os projetistas desenvolvem seus cálculos com margens de erro conservadoras (na maioria das vezes), o que possibilita a manutenção da estabilidade dos serviços mesmo sob condições adversas.

Dentre os esforços aos quais são submetidos os geradores incluem-se esforços térmicos, elétricos, mecânicos e ambientais, que podem atuar juntos ou separadamente.

Esses ditos esforços podem afetar de diversas maneiras o rendimento, a confiabilidade e a vida útil das máquinas às quais eles estão associados.

Com a finalidade de exemplificar o mencionado anteriormente, decidiu-se escolher um item do gerador síncrono e observar suas condições em particular. Optou-se por esse caminho já que uma pesquisa extensa acerca dos esforços envolvidos em todos os equipamentos do grupo gerador tomaria demasiado tempo. Essa pesquisa não faz parte do escopo desse trabalho, assim como sua avaliação físico-matemática, sendo importante para o desenvolvimento de um modelo mais elaborado que o apresentado posteriormente no Capítulo 5.

Foram feitas algumas considerações de modo a basear a seleção do item de estudo. Inicialmente procurou-se observar quais elementos (individualmente) apresentavam maior índice de falhas. Após algumas observações e pesquisas optou-se pelo estudo dos sistemas de isolamento dos enrolamentos estatóricos.

Em operação os enrolamentos estatóricos dos geradores síncronos e sua isolação, sendo esses geradores de grande ou pequeno porte, suportam severas condições de trabalho.

Pesquisas de confiabilidade executadas pelo IEEE (1987) e EPRI, acerca de falhas em máquinas elétricas de grande porte, indicam que falhas nos mancais correspondem a uma faixa de 30% a 50% do total de falhas. Logo em seguida aparecem as falhas atribuídas ao sistema de isolação dos enrolamentos do estator, com um percentual estimado em torno de 30% [9][16]. Essa pesquisa teve como cenário os países desenvolvidos do hemisfério norte em sua maioria. A Figura 2.1.1 apresenta um gráfico que traduz os dados dessa pesquisa.

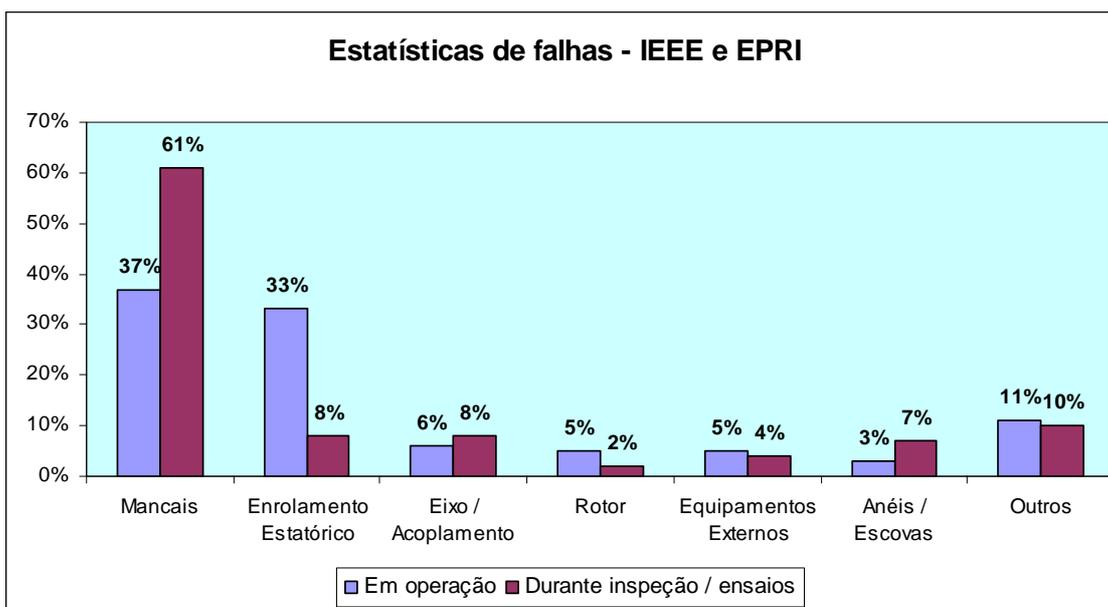


Figura 2.1.1. – Estadísticas de Falhas IEEE e EPRI.

Falhas no estator das máquinas síncronas surgem principalmente a partir do colapso do isolamento interno dos condutores (bobinas ou barras) devido a sobretensões, a movimentação indevida dos condutores dentro das ranhuras (vibração) originada por desbalanços magnéticos, ou efeito similar, ou ainda sobreaquecimento localizado.

Dados da seguradora Alemã Allianz, de 1996 a 1999 mostram que a maior fonte de pagamento de sinistros em apólices de seguros associadas a geradores são justamente os enrolamentos estatóricos. O gráfico da Figura 2.1.2 apresenta melhor esse fato.

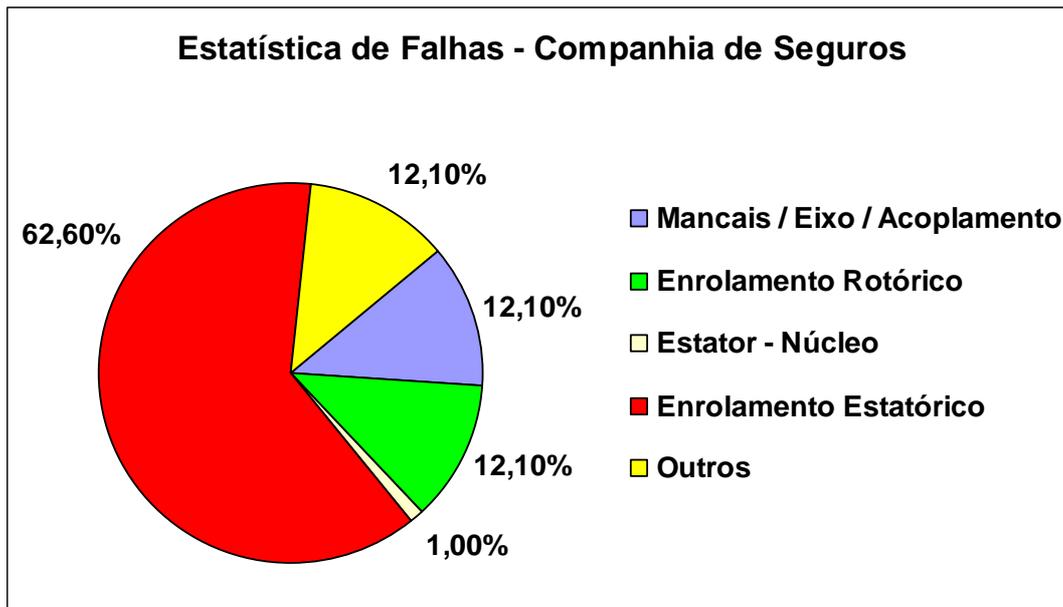


Figura 2.1.2. – Pagamentos de sinistro seguradora Allianz, de 1996 a 1999.

Entre as possíveis falhas nos enrolamentos estatóricos encontram-se as falhas internas ou entre espiras. Falhas entre espiras dificilmente são cobertas pelos esquemas convencionais de proteção com a mesma segurança que as demais (algumas vezes nem mesmo os modelos baseados em técnicas inteligentes são eficientes em sua cobertura). Se não corrigida em tempo, esse tipo de falha pode evoluir rapidamente para uma falha entre a fase associada e a terra. Em casos mais severos as falhas entre espiras podem gerar arcos cuja intensidade pode ser capaz de unir (soldar) as lâminas do núcleo estatórico próximas ao ponto de falha [11] [12]. Isso propagaria o problema, resultando em sobreaquecimento no ponto de falha e adjacências, união de um número maior de lâminas do núcleo, eventual abertura do isolamento e falha dessa fase para a terra, inutilização de um número de bobinas bem maior que o inicial, afrouxamento de estecas e amarras em torno do ponto de falha, etc. A lista continua enquanto não se der cabo do problema.

Esse tipo de ocorrência, falhas severas entre espiras ocasionando derretimento do núcleo (*core welding*), é muito rara e foi registrada poucas vezes nas unidades pertencentes a Furnas. Nos últimos dez anos uma falha tão severa foi registrada uma única vez no enrolamento estatórico da unidade geradora um, UG#1, da Usina de Luis Carlos Barreto de Carvalho. A Figura 2.1.3 apresenta uma foto do ponto de falha e adjacências, após iniciado o serviço de manutenção, com a remoção das lâminas adjacentes.

Análises das falhas em turbo geradores com excitação tipo *brushless*, ou seja que não usam escovas de carvão nos contatos entre o rotor e o sistema de excitação, comuns na indústria do petróleo, mostram que falhas no enrolamento de campo são pontos de início lógicos para implantação de um sistema de monitoramento da condição devido a grande despesa e perda de produção associada com a desmontagem e montagem do rotor. Esse tipo de máquina é largamente utilizada em áreas de risco de explosão (áreas classificadas<sup>2</sup>).



Figura 2.1.3 – Ponto de falha entre espiras do enrolamento estático da UG#1 da USLB.O.

A seguir dispõem-se observações acerca do sistema de isolamento dos enrolamentos estáticos dos geradores síncronos e a relação de esforços aos quais os mesmos são submetidos usualmente.

### 2.1.1. Esforços sobre a isolamento

Como mencionado no item anterior, a atuação conjunta dos diversos esforços sobre os elementos dos geradores síncronos converge para a deterioração de suas características de projeto originais, previstas em norma [13][16].

Tais esforços afetam a vida útil do isolamento, acelerando o processo natural de envelhecimento, o que pode levar a ocorrência de uma falha em

---

<sup>2</sup> ABNT NBR 6146 – Invólucros de Equipamentos Elétrico - Proteção

serviço. Em seguida são verificadas algumas das características dos esforços relacionados ao isolamento, segundo Braga [12]:

- Esforços devido à tensão elétrica<sup>3</sup>:

A diferença de potencial elétrico ao qual são submetidos os sistemas de isolamento pode ser considerada, como era de se esperar, a causa predominante do seu envelhecimento. Combinada aos demais fatores envolvidos é a principal causa do surgimento de falhas.

O potencial de operação e os impulsos (variações bruscas como sobre ou subtensões) provenientes de elementos transitórios são suficientes (por muitas vezes) para causar a deterioração de um isolamento. Como tudo na vida, existe um tempo determinado de vida útil (ver Tabela 3.1.).

A erosão gradual dos componentes de isolação segue ocorrendo, até que sua capacidade funcional seja seriamente atingida, aumentando a possibilidade de uma falha.

- Esforços devidos à temperatura:

A deterioração dos componentes de isolação, assim como dos demais componentes elétricos e mecânicos, é acelerada de maneira gradual em paralelo ao aumento da temperatura.

Em máquinas de baixa tensão, onde o fator de descargas parciais<sup>4</sup> no interior do elemento isolante pode ser dito insignificante, o fator térmico é reconhecido como fator predominante para o envelhecimento do isolamento.

É importante ressaltar que o fator temperatura não se comporta da mesma maneira sobre todos os elementos dos geradores síncronos. Enquanto os sistemas de isolação têm sua degradação acelerada com o aumento da temperatura, outros elementos como as escovas de carvão utilizadas como elementos de contato elétrico no sistema de excitação, têm rendimento inferior sob baixas temperaturas.

---

<sup>3</sup> De acordo com a NBR-5410 Instalações Elétricas em Baixa Tensão, é considerada alta tensão, em corrente alternada, aquela superior a 1,0 kV.

<sup>4</sup> Descargas Parciais: Os termos descargas parciais (DP) e corona são freqüentemente utilizados, de maneira errônea, para descrever o mesmo fenômeno na indústria mundial. De acordo com as definições do IEEE [15], uma descarga parcial é “uma descarga elétrica incompleta, ou parcial, que ocorre entre camadas diferentes de isolamento, ou ainda, entre uma camada de isolamento e um condutor”. Por outro lado o efeito corona é caracterizado por uma descarga completa, entre o elemento condutor e algum outro meio físico, na maioria das vezes o ar.

- **Esforços mecânicos:**

Os esforços mecânicos sobre os elementos de um gerador síncrono podem ser divididos em duas categorias básicas: os simplesmente mecânicos e os eletromecânicos.

Na primeira categoria pode-se citar a vibração mecânica resultante do contato entre as partes rotativas e estáticas, tais como a turbina, o rotor e os mancais. Além disso há também o atrito inerente a um sistema com partes estáticas e rotativas.

Para os esforços eletromecânicos têm-se aqueles termicamente induzidos (efeito joule) e aqueles advindos da indução eletromagnética (forças eletromagnéticas de deslocamento).

Os danos ocasionados por esse tipo de esforços podem ser significativos e demandam, não obstante, que se aja imediatamente para repará-los.

- **Fator ambiental:**

Esse fator abrange diversas fontes de degradação dos equipamentos que muitas das vezes são usuais ao grupo gerador. Entre essas fontes pode-se mencionar: solventes, partículas de sujeira, variações climáticas abruptas, intervenção humana etc.

Apesar de não possuir atuação tão representativa, o fato de possuir alta imprevisibilidade torna esse fator de elevado risco.

## **2.2. Proteção de Geradores Síncronos**

Um sistema de proteção deve ser capaz de mediante uma gama específica de efeitos destrutivos causados por um grupo pré-selecionado de falhas, proteger um determinado sistema.

As falhas podem ser visualizadas como eventos aleatórios e de natureza caótica, ou seja, tipos distintos ou semelhantes de falhas podem ocorrer em um mesmo sistema em momentos simultâneos, separados, ou ainda, nunca ocorrerem. Além disso falhas semelhantes podem ter conseqüências distintas e vice-versa.

Se algum componente “sob falha” do sistema de potência (geradores síncronos, transformadores, barramentos, linhas de transmissão, etc.) não for devidamente identificado e isolado, pode acabar “contaminando” outros

elementos e até mesmo levar o sistema ao qual ele está relacionado a uma situação instável ou colapso.

A propagação de defeitos advindos de um único equipamento para um sistema de potência pode ser comparada à disseminação de uma infecção no corpo humano. Por menor que pareça o problema inicialmente suas conseqüências podem ser fatais.

Para um gerador síncrono, o sistema de proteção associado deve ser tal que seja capaz de remover o equipamento defeituoso do sistema tão rapidamente quanto possível, de modo a reduzir o tempo de exposição do próprio gerador ao defeito e minimizar o risco de perda de estabilidade do sistema, sem afetar os equipamentos adjacentes.

As principais características que um sistema de proteção deve possuir são:

- Precisão na atuação;
- Confiabilidade;
- Seletividade.

Um sistema de proteção convencional é composto por uma série de elementos. Esses elementos variam individualmente de acordo com o equipamento protegido, as necessidades quanto ao atendimento dos sistemas associados e uma série de outras características.

Examinando a maioria dos sistemas clássicos de proteção podemos dividir os elementos que os compõem em três categorias:

- Elementos de proteção e manobra – disjuntores, seccionadores, etc;
- Elementos transdutores – Transformadores de Corrente (TCs) e Transformadores de Potencial (TPs), sensores de vibração, temperatura, velocidade, etc;
- Elementos de comparação e atuação – relés.

O conceito básico de funcionamento de um sistema de proteção é muito simples. Os elementos transdutores fazem de forma contínua a aquisição de sinais pré-estabelecidos e referentes ao sistema, obtidos a partir do ponto do sistema que se deseja proteger, ou de pontos remotos utilizados como referência. Esses sinais são enviados para os relés, que realizam uma comparação entre os sinais recebidos e parâmetros de referência pré-especificados. Caso os valores recebidos pelos relés extrapolem os de referência, é enviado um sinal elétrico ao elemento de manobra diretamente associado com esse conjunto, que retira o ponto em questão do sistema.

A Figura 2.2.1. apresenta um desenho esquemático mostrando um modelo de um sistema de proteção genérico, contendo elementos dos três grupos mencionados anteriormente. A numeração dos relés apresentada no modelo segue a descrição detalhada adiante.

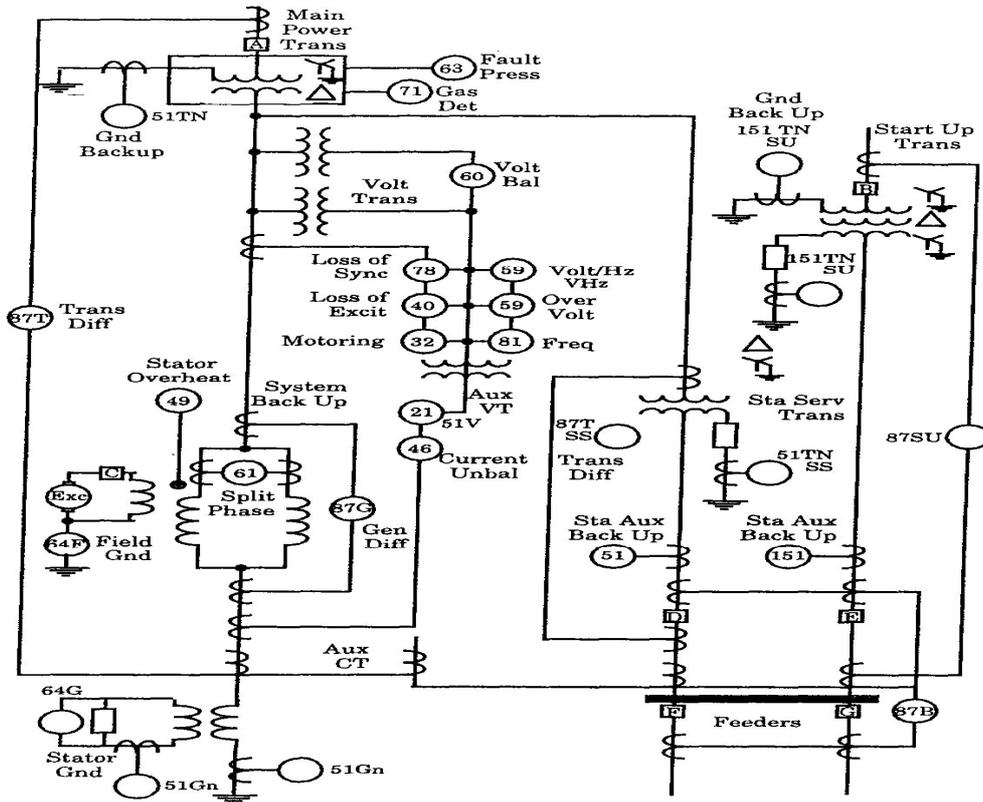


Figura 2.2.1. – Esquema completo de proteção [Paul Anderson ; “Power Systems Protection” ; IEEE Press].

O projeto de um relé, seja ele analógico ou digital, deve ser tal que mediante quaisquer das condições de falha, sob sua supervisão, seja produzido em sua saída um sinal de disparo, ou acionamento, enquanto que nenhuma outra condição deve produzir tal saída.

A proteção de geradores síncronos, mais especificamente, é direcionada de maneira mais enfática para os seguintes tipos de falha:

- Falhas de isolamento, contidas no grupo A) descrito na seção 2.1;
- Surgimento de condições anormais de funcionamento.

Além disso, é preciso prover módulos de proteção primária e de retaguarda para o gerador e o conjunto gerador-transformador, resultando assim em várias funções de proteção.

A filosofia mais básica utilizada regularmente consiste em se adotar dois conjuntos de relés independentes com as principais funções de proteção redundantes, visando manter a continuidade de serviço da máquina mesmo que ocorra um defeito em uma dessas funções [16].

Os relés comumente utilizados na proteção do conjunto gerador-transformador estão apresentados a seguir, junto as suas funções [16]:

- **Relé de bloqueio: 86E**

Relé auxiliar para abertura dos disjuntores de campo, da unidade geradora, dos serviços auxiliares, regulador de velocidade e regulador de tensão, bloqueando e alarmando, possuindo rearme manual e/ou elétrico. É acionado quando ocorrer defeitos na parte elétrica da unidade geradora.

- **Relé de bloqueio: 86A**

Relé auxiliar que possui as mesmas características de funcionamento do 86E, utilizado como backup deste relé.

- **Relé de bloqueio: 86M**

Responsável pela retirada de operação da unidade geradora através da abertura de seu disjuntor, abertura do disjuntor de campo e acionamento do circuito hidráulico do regulador de velocidade para o fechamento do distribuidor e fechamento da comporta de tomada d'água.

- **Relé diferencial de gerador: 87G**

Relé de alta impedância, com atuação instantânea, que compara as correntes em cada fase de cada lado da unidade geradora, está associado a defeitos entre fases, não sendo sensível a defeitos monofásicos, tendo em vista o tipo de aterramento utilizado pelo gerador (transformador de distribuição). Energiza os relés de bloqueio 86A e 86E, acionando, quando necessário, o grupo de combate a incêndio (CO<sub>2</sub>), para o interior da máquina.

- **Relé diferencial do grupo gerador-transformador: 87TG**

Similar ao 87G, tendo como diferença à utilização de mais um enrolamento para medição das correntes que suprem o transformador de serviço local. Esta proteção é de atuação instantânea do conjunto transformador-gerador, detecta defeitos entre fases no enrolamento do transformador e propicia também função de retaguarda à proteção diferencial do gerador (87G). Energiza os relés de bloqueio 86A e 86E.

- **Relé de terra no rotor: 64R**

Está localizado no circuito de excitação do rotor. Este relé possui uma fonte de corrente contínua independente com valor de tensão diferente da excitatriz. Sua função é detectar qualquer contato dos enrolamentos do rotor com a terra, pois, em condições normais de operação, estes ficam totalmente isolados. Possui apenas função de alarme.

- **Relé de terra no estator: 64S**

Associado a defeitos monofásicos atuando de duas maneiras:

1. para defeitos que ocorram em uma região cujo limite se estende por até 95% do enrolamento do estator, é utilizada uma unidade de sobretensão residual (59N) para frequências fundamentais (60Hz);

2. para defeitos que ocorram na região compreendida pelos 5% restantes do enrolamento do estator, próximo ao neutro da máquina, é utilizada uma unidade de subtensão (27N3) para frequências de terceiro harmônico (180Hz).

Em condições normais de operação da máquina, a tensão do neutro para a terra (ponto comum do fechamento da estrela) é zero, pois neste ponto as tensões se anulam. Quando ocorrer defeito em até 95% do enrolamento do estator no sentido do ponto de neutro, a alta impedância de aterramento (conjunto transformador de distribuição mais resistor de aterramento) ocasionará uma corrente de curto-circuito baixa, apesar disto, provocará o aparecimento de uma diferença de potencial na frequência fundamental entre o ponto de neutro e a terra, sendo assim detectada pela unidade 59N.

Nos 5% restantes do enrolamento, próximo ao fechamento da estrela, a máquina em condições de defeito tende a não gerar tal diferença de potencial, diminuindo a tensão de terceiro harmônico que existe em condições normais de operação, sendo assim detectado pela unidade 27N3.

- **Relé de fase dividida: 61**

Esta proteção é utilizada somente quando a máquina possui dois ou mais circuitos em paralelo por fase (modo construtivo da máquina). Este relé é responsável pela detecção de curto-circuito entre espiras das bobinas do estator do gerador, energizando os relés 86E e 86A. Seu princípio de funcionamento está baseado no surgimento de corrente diferencial, devido ao desbalanço das correntes entres os ramos em paralelo da mesma fase (este tipo de defeito não é detectado pela proteção diferencial do transformador ou do gerador).

- **Relé de perda de excitação: 40**

Esta proteção é realizada por um relé de distância, detectando defeitos no interior da máquina. Uma das características elétricas da perda de campo é a variação da impedância. Quando ocorrer a perda de excitação, a impedância irá a valores tais que acarretarão na operação do relé. Energiza os relés 86A e 86E.

- **Relé de seqüência negativa: 46**

Opera para desbalanço de corrente nas fases do estator, possui um estágio de alarme e outro de disparo. Existem diversas condições no sistema que provocam desbalanço de corrente, como visto no item 2.1.1 estes desbalanços provocam o surgimento de correntes harmônicas, estas correntes circulam na superfície do rotor (circuito de campo) provocando o aumento de temperatura de seus anéis, acarretando danos à máquina. Este relé detecta estas correntes, operando e energizando os relés 86E e 86A.

- **Relé de desbalanço de tensão: 60**

Esta proteção deverá detectar a perda parcial ou total da tensão proveniente do transformador de potencial (queima de fusíveis do TP), bloqueando a atuação dos relés que são alimentados por tensão e do regulador de tensão (passando o controle da excitação para manual), acionando o alarme.

- **Relé de distância e sobrecorrente com temporização e restrição por tensão: 21/51V**

O relé 51V é utilizado como proteção de retaguarda para defeitos entre fases. É um relé de sobrecorrente temporizado dependente do valor da tensão, sendo essa característica necessária devido à variação de impedância da máquina quando ocorrer um curto-circuito. Existem casos onde essa corrente é menor que a corrente de operação da máquina, podendo o relé operar por sobrecorrente somente se a tensão cair abaixo de um determinado valor. Quando operado aciona os relés 86A e 86E.

O relé 21 também é utilizado como proteção de retaguarda para defeitos entre fases. É um relé que possui duas zonas de operação: zona 1 (instantânea) atua para defeitos entre a máquina e o transformador e zona 2 (temporizada) atua para defeitos entre a máquina e o barramento da subestação. Quando operado também aciona os relés 86A e 86E.

- **Relé de atuação instantânea com subtensão: 50/27**

Esta proteção é de retaguarda e deverá evitar a energização acidental da unidade geradora, seja por erro de operação, defeito em circuito de

controle, etc. Quando é iniciado o processo de excitação normal da máquina a tensão é elevada até seu valor nominal sem presença de corrente (disjuntor do barramento de saída aberto) caso seja verificada a presença de corrente antes da tensão nominal da máquina ser atingida, ficará caracterizada a presença de um curto-circuito na unidade geradora, uma vez que o disjuntor permanece aberto. Ao ser operado irá energizar os relés 86A e 86E.

- **Relé de sobretensão: 59**

Protege o gerador em condições não controladas pelo regulador de tensão, como por exemplo, uma forte rejeição de carga. Quando operado aciona os relés 86A e 86E.

- **Relé de inversão de potência: 32**

Esta função destina-se basicamente a proteção da turbina, sendo utilizada pra evitar a motorização do gerador, energizando os relés 86A e 86E.

- **Relé de falha do disjuntor: 50-62BF**

É usado para detectar falha na abertura do disjuntor da barra quando acionado pela proteção. Funciona em conjunto com um elemento temporizador e aciona um relé de disparo para desligamento de todos os disjuntores associados à barra onde está conectado o gerador.

- **Dispositivo de sobrevelocidade: 12**

É um dispositivo mecânico acoplado ao eixo da turbina e geralmente é posicionado para uma atuação em uma velocidade de 150% da velocidade nominal da máquina. Quando atuado aciona o relé 86M.

- **Dispositivo térmico: 26**

Existem sensores que supervisionam a temperatura de óleo nos mancais, com o objetivo de retirar a máquina de operação quando houver aquecimento excessivo do óleo, abrindo os disjuntores da máquina e do campo, através do contato do relé 86M.

A relação de relés e suas respectivas funções apresentadas anteriormente podem ser representadas exclusivamente por equipamentos analógicos (como ocorre em diversas usinas e instalações industriais, inclusive de Furnas). Entretanto é cada vez mais comum encontrar hoje em dia equipamentos digitais, multifuncionais, associados à proteção de itens como transformadores e barramentos simultaneamente, ou ainda em outras conFigurações.

Esses relés digitais são capazes de em um mesmo módulo englobar diversas das funções apresentadas aqui. Além disso possuem, em sua

maioria, capacidade de oscilografia, monitoramento em tempo real das variáveis acompanhadas, possibilidade de parametrização das curvas de acordo com a aplicação, entre outras vantagens.

### **2.3. Métodos Clássicos para Detecção de Falhas**

A terminologia detecção de falhas, do inglês *fault detection*, é intuitivamente relacionada com algum tipo de sistema, dedicado, capaz de monitorar constantemente determinado elemento ou conjunto de elementos, independente, avaliando seu estado, deterioração e/ou o surgimento de possíveis problemas repentinos.

Além disso, esses sistemas devem agir de maneira a, se possível, eliminar a falha detectada ou ao menos isolá-la de outros elementos do sistema no qual está imerso.

Ao observarmos os elementos convencionais de proteção, como os descritos na seção 2.2 os mesmo podem ser vistos como “detectores e isoladores de falhas”.

A grande maioria dos problemas elétricos em geradores síncronos tem sua origem nos enrolamentos estatóricos [13], suas causas e conseqüências já foram comentadas aqui anteriormente. Portanto, proteger os enrolamentos estatóricos de maneira adequada é indispensável quando se deseja obter uma operação confiável e satisfatória.

Atualmente o método de proteção para os enrolamentos estatóricos mais utilizado, e com resultados mais satisfatórios, é o conceito de proteção diferencial (utilizando o relé 87G), associado ao de detecção de tensões de 3º harmônico (utilizando o relé 64 ou similar). Seu sucesso deve-se ao fato de representar uma alternativa simples, relativamente de baixo custo e até certo ponto eficiente, tendo em vista sua natural seletividade, ou seja, o fato de somente ser sensibilizada para defeitos no elemento protegido.

Há várias formas de se implementar um esquema de proteção diferencial, variando em função das características do equipamento a ser protegido e da tecnologia empregada.

Independentemente da forma adotada a filosofia é a mesma, baseada na Lei das Correntes de Kirchhoff, que estabelece: “A soma algébrica das

correntes que saem de qualquer nó em um circuito elétrico é zero ou seja  $\rightarrow$

$$\sum_{n=1}^{\infty} i_n(t) = 0." [24]$$

A proteção diferencial, portanto, compara as correntes de entrada do elemento protegido, no caso o enrolamento estático, com as de saída, eventuais diferenças entre elas são indícios de condições anormais de operação no equipamento.

Os TCs (Transformadores de Corrente) são responsáveis pela medição desses níveis de corrente. Eles são usados *casados*, em uma ligação complementar, e dimensionados cuidadosamente de maneira a estabelecer nos enrolamentos secundários uma corrente diferencial muito pequena para o caso de falhas externas. Desse modo as falhas externas não sensibilizam o relé.

A Figura 2.3.1. apresenta um desenho esquemático ilustrando o esquema de proteção diferencial de gerador.

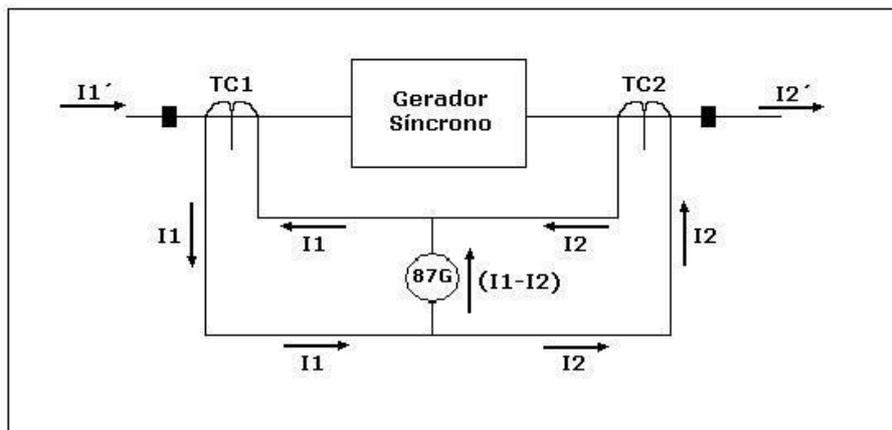


Figura 2.3.1 – Esquema de proteção diferencial de gerador.

É importante ressaltar que distúrbios ocorridos além dos TCs (fora dos disjuntores de entrada e saída) não afetarão o relé diferencial, conseqüentemente mantendo o esquema de proteção associado somente a falhas no grupo gerador.

Esse arranjo é possível no caso dos geradores síncronos, pois a corrente na entrada do gerador, conectada ao lado primário dos dois TCs é inerentemente a mesma. Atualmente são utilizados relés diferenciais digitais, com algoritmos de ciclo completo de Fourier, em aplicações dedicadas.

O comportamento dos TCs e TPs (Transformadores de Potencial), tanto em regime permanente quanto em regime transitório, é de fundamental

importância para o desempenho dos esquemas de proteção. Alguns problemas associados a esses elementos transdutores podem inviabilizar o funcionamento correto do esquema de proteção.

A seguir são mencionadas algumas dessas particularidades:

- A saturação dos núcleos dos TCs causa erro na corrente secundária, o que implica no “desaparecimento” dessa corrente durante uma parte do ciclo da forma de onda. Tal “desaparecimento” pode influenciar na atuação do relé associado a esse TC.

- Apesar de pequeno há sempre um erro na corrente secundária dos TCs devido a uma pequena, porém não nula, corrente de magnetização, requerida para produzir o fluxo magnético no núcleo.

- Os TCs e TPs de proteção trabalham com classes de exatidão que permitem um erro em torno de 10%, para níveis de corrente de curto-circuito na casa de dez a vinte vezes a corrente normal de operação a atuação dos relés é praticamente perfeita, porém para níveis próximos a duas vezes o valor nominal da corrente de operação um erro de 10% pode prejudicar a funcionalidade do esquema de operação associado.

- A resposta dos TPs (ou TCPs – transformadores capacitivos de potencial) também pode apresentar problemas. O regime transitório após falhas pode apresentar dificuldades nos esquemas de proteção que requerem entradas de tensão. Em geral a ocorrência de falhas durante a passagem da forma de onda de tensão pelo zero ocasiona transitórios com grande amortecimento (muito lento). Em particular, faltas que causam um colapso quase completo de tensão criam falsas imagens de tensão nos terminais de entrada do relé associado. Nesses casos em trabalhando com relés digitais, deve-se dar atenção especial ao algoritmo de funcionamento dos relés, particularmente se colapsos severos de tensão possam ser causados por uma falta próxima da origem da zona de proteção. Em esquemas de proteção puramente analógicos não há muito que fazer.

Em termos gerais os relés digitais estão sujeitos aos mesmos problemas de aplicação dos relés analógicos convencionais. Entretanto, os relés digitais podem incorporar funções acessórias como registradores de eventos, oscilografia, ajustes remotos, automonitoramento e autoteste. Esses equipamentos são o que mais se aproxima da filosofia e métodos de utilização envolvendo sistemas especialistas ou técnicas inteligentes.

Existe ainda uma grande variedade de aspectos onde podem surgir problemas, um desses aspectos é relacionado as faltas entre espiras, que apesar de incomuns são de difícil detecção e bastante prejudiciais [11].

## **2.4. Metodologias de Manutenção**

A manutenção de hidrogeradores vem evoluindo constantemente. Na busca de melhores resultados e índices de manutenção e operação têm sido desenvolvidas novas técnicas e remodeladas técnicas antigas.

Existe uma grande quantidade de técnicas, que juntas ou em separado constituem metodologias, associadas a manutenção. Dentre essas muitas metodologias destacam-se as seguintes:

- Manutenção Corretiva – considerada a metodologia de manutenção mais antiga em vigor, foi largamente usada no passado e vem ganhando espaço atualmente. Consiste basicamente em realizar intervenções nas máquinas somente depois de apresentados defeitos incapacitantes, ou seja, que forcem uma parada de produção.
- Manutenção [Preventiva + Corretiva] – modelo mais utilizado atualmente, consiste em agregar intervenções rotineiras às unidades com as necessárias em caso de quebra. Tais intervenções rotineiras, ditas preventivas, envolvem tarefas em geral simples relacionadas a alguns elementos dessas unidades, como substituição de peças gastas, lubrificação de partes rolantes ou simples verificação (inspeção).
- Manutenção Centrada em Confiabilidade (MCC) – metodologia que, em termos gerais, baseia suas intervenções nas características inerentes a cada unidade, relacionando como indicadores sua condição, importância, confiabilidade, local de operação, requisitos de sistema etc.
- Acompanhamento Preditivo (Baseado na Condição) – a partir de dados de monitoramento das unidades são feitas correlações entre as condições dessas máquinas e suas necessidades quanto à manutenção, em curto, médio e longo prazos.
- Outros – demais metodologias, ou variações, que não se enquadram em quaisquer das anteriores.

A tendência atual de manutenção está voltada para o acompanhamento preditivo das unidades, através do monitoramento em tempo real da condição das mesmas. Com isso pretende-se uma melhor programação da manutenção preventiva, evitando paradas para intervenções de manutenção desnecessárias, ou falhas pequenas que evoluam para outras de grande vulto, tomando medidas preventivas no momento correto.

No Capítulo 3 será detalhada, com exemplos, essa técnica.

Ainda no Capítulo 3 é apresentada uma pesquisa de ocorrências de falhas nas unidades hidrogeradoras de Furnas Centrais Elétricas com a finalidade de situar seus índices de manutenção junto ao cenário internacional.

# Capítulo 3

## Monitoramento da Condição, Processos de Diagnóstico e Análise de Ocorrências

O mundo da geração de energia mudou em diversos aspectos nas últimas décadas, como discutido anteriormente neste mesmo trabalho. As novas práticas de consumo e utilização de energia elétrica trouxeram consigo novos conceitos de operação das máquinas elétricas, muitas vezes em sobrecarga e/ou em regimes cíclicos desfavoráveis aos equipamentos.

Esses fatores demandam uma maior necessidade de se monitorar as condições das unidades geradoras, dando à equipe técnica maior conhecimento acerca do estado mecânico e elétrico das máquinas, não somente durante as paradas para revisões mas a qualquer momento.

Operando na base do fornecimento de energia, um grande hidrogerador pode estender sua vida útil, operando satisfatoriamente por mais de 40 anos com apenas alguns procedimentos de manutenção de rotina agendados e mínimas condições de monitoramento. Esse é o caso de diversas unidades geradoras em operação no Brasil, algumas delas do sistema Furnas (ver Tabela 3.2.1.1.).

A vida útil estimada dos enrolamentos de armadura de unidades geradoras, sob condições moderadas de manutenção e operação, pode ser avaliada de acordo com a classe de isolamento da mesma. A classe de isolamento é definida a partir das características térmicas do isolamento<sup>5</sup>. A Tabela 3.1. apresenta tais valores, além de algumas características inerentes a cada classe de isolamento [22]:

---

<sup>5</sup> ABNT NBR-7094 / 2000 e IEC-84 / 1985

Alguns pesquisadores, membros do EPRI e do IEEE, extrapolam essa estimativa para as próprias unidades geradoras [13].

Tabela 3.1. – Classe de Isolamento x vida útil.

<b>Classe de isolamento</b>	<b>Classe de Temperatura (limite para operação contínua)</b>	<b>Vida útil estimada (milhares de horas)</b>
B	130°C	250 a 400
F	155°C	350 a 500

A relação entre vida útil da unidade e a classe de isolamento é fundamentada entre outras razões no fato desse ser o segundo item em taxa de falha, historicamente [10][13].

Apesar do apresentado na Tabela 3.1. é importante ressaltar que sistemas de isolamento para enrolamentos estatóricos ou rotóricos são compostos basicamente de elementos orgânicos. Baseado em tal informação é arriscado afirmar que esses elementos teriam uma determinada vida útil, pois em comparação com os seres vivos, podem sempre contradizer as estatísticas permanecendo décadas em operação ou falhando em poucos anos.

Em Furnas Centrais Elétricas S.A as unidades geradoras, em sua maioria, têm operado em regime contínuo, na base, seguindo as orientações do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS).

A flexibilidade operacional dos hidrogeradores permite que unidades com mais de 30 anos de operação sejam responsáveis pela complementação da demanda. Desse modo operando com variações indesejadas de carga e por vezes em regime de carga parcial.

As circunstâncias que cercam a operação dos hidrogeradores de Furnas são bem diferentes dos turbogeradores de usinas térmicas usadas para cobrir horários de ponta ou pequenas centrais de carga (com grupos motogeradores). Em alguns casos extremos essas unidades entram e saem de operação até 10 vezes em um só dia! Aplicações do tipo “bombeamento / armazenamento” (*Pump/Storage*) podem vivenciar um número superior de partidas e paradas, sempre representando as mais extremas condições de operação. Esse modelo de operação é muito comum em indústrias do setor de exploração de petróleo ou minerais.

Por outro lado devido às condições peculiares da matriz energética brasileira, várias unidades geradoras em usinas térmicas no país podem permanecer até mais de 1 ano sem operar, como foi o caso de várias unidades

da Petrobras no ano de 2006. Esse fator também contribui de maneira negativa para a vida útil da máquina, demandando que se conheça o estado da máquina, que pode vir a ser requisitada em qualquer momento.

A operação em regime parcial de carga traz a tona algumas considerações importantes, como faixas de potência proibitivas, a possibilidade de operar na faixa de instabilidade hidráulica das turbinas, o surgimento do fenômeno da cavitação, queda na eficiência das unidades, entre outras.

Outra consideração importante é a que ao manter-se constante a velocidade de rotação das unidades, impondo variações de carga, pode ocorrer o surgimento de esforços térmicos, mecânicos e elétricos que possivelmente não foram considerados no projeto original das máquinas.

Um sistema de monitoramento da condição das unidades geradoras, propriamente desenvolvido, pode dar suporte à equipe de operação da usina, evitando que as máquinas operem em regiões prejudiciais de trabalho, ou ao menos possibilitando que se mantenha sob um regime de risco controlado.

Em teoria, sob o ponto de vista da equipe de manutenção, um sistema de monitoramento adequado, pode fornecer aos operadores, experientes ou devidamente treinados, informações suficientes que os levem a tomar decisões inteligentes quanto ao planejamento da manutenção. Desse modo seriam evitadas, até certo, ponto incursões desnecessárias da equipe de manutenção.

Em contrapartida é importante selecionar as informações captadas pelo sistema de monitoramento e passadas aos operadores de maneira concisa. Sob determinadas condições uma enxurrada de alarmes e informações correlatas pode surgir na tela do operador, se isso não for coordenado de maneira eficiente pode fazer mais mal do que bem.

Além disso um mal resultado, como um falso positivo, pode causar uma má impressão na equipe, que perderá a confiança no sistema, desconsiderando seus resultados no futuro.

Partindo de um sistema de monitoramento adequado pode-se instalar um programa de diagnóstico que utilize as informações advindas da máquina e infira seu estado.

A eficiência de um sistema de monitoramento e diagnóstico está diretamente ligada a sua capacidade de considerar e avaliar os tipos de defeitos (problemas ou comportamentos adversos) das máquinas que devem ser detectados e os tipos de informações sobre a “saúde” da máquina que

devem ser fornecidos para gerenciar o ativo. É importante lembrar que essas condições se atêm às informações que possam ser obtidas.

Essas necessidades podem facilmente ser relacionadas com aquelas características descritas adiante na seção 4.1, acerca dos sistemas especialistas.

### 3.1. Variáveis monitoradas

Cada projeto para implantação de sistemas de monitoramento possui suas peculiaridades e características próprias. Existe um universo de variáveis e elementos a serem monitorados e analisados, de onde são selecionados aqueles que interessam àquela instalação específica e ao objetivo do sistema de monitoramento e diagnóstico.

Geralmente quem define quantas e quais serão as variáveis monitoradas é o fator econômico. Tecnicamente, quanto maior o número de elementos conhecidos, ou seja, mais variáveis monitoradas, maior a gama de informações acerca do estado de “saúde” do equipamento disponível<sup>6</sup>.

Cabe ao responsável pelo projeto a árdua tarefa de equilibrar as necessidades técnicas e o custo envolvido na implantação do novo sistema.

Existe uma grande variedade de empresas que desenvolvem, fornecem e instalam sistemas de monitoramento. Esses sistemas estão sempre evoluindo. A entrada de novas variáveis no grupo monitorado acompanha os avanços tecnológicos dos elementos transdutores de medição e as novas filosofias de manutenção, dando mais ou menos importância a determinada variável.

Como exemplo de empresas fornecedoras de sistemas de monitoramento (entre outros serviços) pode-se mencionar a “*VibroSystem™*” e a “*Bently Nevada™*”. Cada uma dessas empresas possui variados pacotes de serviços de monitoramento de unidades geradoras, visando atender às diversas possibilidades da relação custo x necessidades técnicas.

O CEPEL (Centro de Pesquisas de Energia Elétrica) possui projetos na área de monitoramento e diagnósticos de unidades geradoras, o que o

---

<sup>6</sup> Observação: manter-se o maior número possível de variáveis monitoradas não quer dizer que todas elas estarão disponíveis aos operadores. Reitera-se aqui que aos operadores recomenda-se disponibilizar somente o necessário para evitar assim confusões.

capacita como outro integrante de peso desse grupo que trabalha no setor de monitoramento.

Dentre os projetos do CEPEL que estão em andamento, há parcerias com a Eletronorte (Usina Hidrelétrica Tucuruí) e Furnas (Usina Hidrelétrica Funil). Um dado muito importante é o fator custo, essas parcerias (CEPEL e Empresas do setor elétrico) possibilitam a implantação dos sistemas por apenas uma fração dos valores estabelecidos pelas demais companhias, além de agregar conhecimento ao corpo técnico dessas companhias.

A Tabela 3.1.1 apresenta uma relação com algumas das variáveis passíveis de monitoramento.

Tabela 3.1.1. Relação de variáveis usualmente monitoradas.

<b>Algumas variáveis a serem monitoradas</b>	
Vibração do mancal guia (run out)	Posição do anel de selagem
Espessura do filme de óleo do mancal de escora	Folga da borda das palhetas
Temperatura dos mancais (guia e escora)	Temperatura dos enrolamentos do estator
Sinal de <i>keyphasor</i> (trepidação)	Temperatura dos enrolamentos do rotor
Vibração da tampa da turbina	Potência ativa (MW)
Vibração do tubo de sucção	Potência reativa (Mvar)
Entreferro do gerador	Tensão de saída
Vibração do núcleo do estator	Tensão de excitação
Abertura do distribuidor	Corrente de excitação
Descargas parciais do gerador	Pressão do óleo de lubrificação dos mancais

Existe sempre a possibilidade de se acompanhar outras variáveis relacionadas a usina como um todo ou ao conjunto turbina – gerador, como a cavitação, por exemplo. Como mencionado anteriormente tudo dependerá das necessidades em questão e do capital disponível para o projeto.

### **3.2. Possíveis falhas e variáveis correspondentes**

O intuito do monitoramento de algumas das variáveis das máquinas (como as apresentadas na Tabela 3.1.1.) é facilitar a detecção de possíveis problemas em desenvolvimento ou aqueles que deixariam a máquina a beira

de um colapso. As medições efetuadas permitem que, mediante uma análise não muito detalhada, seja realizada a detecção de defeitos, ou ao menos a indicação de alguma anormalidade.

A Tabela 3.2.1. (retirada da relação de documentos referentes ao sistema de monitoramento da *Bently Nevada "Bently System 1 ®"*, que compõem o projeto para Mascarenhas de Moraes) apresenta uma lista contendo possíveis defeitos em unidades e suas medições correspondentes.

É importante ressaltar que para fabricantes diferentes, ou ainda estudiosos diferentes, um mesmo sintoma pode ser ou não diagnosticado. Mais uma vez, fazendo analogia com o corpo humano, a mesma doença pode apresentar vários sintomas ou mesmo nenhum deles e ainda assim matar o paciente.

Tabela 3.2.1. Possíveis Defeitos x Medições Correspondentes.

Defeitos e Medições Associadas		MEDIÇÕES												
		Vibração do MGG (entreferro) <sup>1</sup>	Espessura do filme de óleo do MEG <sup>1</sup>	Temperatura do MGG <sup>1</sup>	Temperatura do MEG <sup>1</sup>	Trepidação do Keyphasor	Vibração da tampa da turbina\ tubo de sucção	Entreferro do gerador	Estrutura de vibração do estator	Temperatura (rotor e estator)	Variáveis de processos	Descargas parciais do gerador	Posição abertura estator	Folga anel selagem\ borda do rotor <sup>3</sup>
<b>DEFEITO</b>	Desequilíbrio mecânico	•				•								
	Desequilíbrio elétrico	•				•								
	Desequilíbrio hidráulico	•				•								
	Rough Load Zone	•				•					•			
	Falha pino de cisariamento	•	•			•					•			
	Desalinhamento	•				•								
	Cavitação						•				•		•	
	Distorção do anel de descarga <sup>2</sup>					•								•
	Vibração excessiva da turbina <sup>2</sup>					•								•
	Sobrecarga do mancal	•	•	•	•									
	Fatiga do mancal	•	•	•	•									
	Lubrificação insuficiente do mancal	•	•	•	•									
	Deterioração do isolamento do estator											•		
	Amplitude de vibração do estator											•		
	Movimentação do aro do rotor					•		•						
	Deslocamento do núcleo rotor					•		•	•					
	Entreferro irregular					•		•	•					
	Estator\Rotor fora de órbita					•		•	•					
	Concentricidade Estator\Rotor					•		•	•					
	Flexibilidade do Estator					•		•	•					
	Perda laminação estator								•					
	Forças desbalanço (entreferro)					•		•	•					
	Refrigeração do pino do estator									•				
	Dutos de ventilação bloq. estator									•				
Sobreaquecimento bobinas estator									•					

1. Parâmetros recomendados para proteção de auto shut-down de máquina.  
 2. Apenas para as turbinas tipos: Francis, Kaplan ou Bulbo.  
 3. Esta medição é recomendada caso a caso, de acordo com as necessidades de monitoramento da condição, condição dos equipamentos e construção da turbina.  
 Obs.: MEG = Mancal Escora do Gerador e MGG = Mancal Guia do Gerador

As diversas possibilidades de medição apresentadas na Tabela 3.2.1. variam de acordo com o pacote de serviços utilizado. São mencionados pela *Bently Nevada* três grupos de serviços: Sistema Mínimo, Sistema Básico e Sistema Recomendado ; cada um deles utiliza um conjunto diferente de variáveis monitoradas.

Entretanto, como mencionado anteriormente, a decisão acerca de quais variáveis devem ser monitoradas é particular e restrita a cada local, sempre observando a melhor relação custo x benefício. Não há uma fórmula pré-determinada, como uma receita de bolo!

### **3.2.1. A experiência de Furnas Centrais Elétricas S.A**

Com a chegada do século XXI as empresas do setor elétrico brasileiro encontraram-se em uma situação de larga obsolescência de seus equipamentos. Com isso foram compelidas a investir em inovações tecnológicas. Em Furnas não poderia ter sido diferente.

A história de Furnas se confunde com o desenvolvimento econômico do Brasil, em particular sua região sudeste. A empresa foi criada oficialmente em 28 de fevereiro de 1957 (através do Decreto Federal nº 41.066), com o objetivo de operar no rio Grande a primeira usina hidrelétrica de grande porte do país (a UHE Furnas – Usina Hidrelétrica de Furnas, com capacidade de 1.216MW), visando sanar a crise energética que ameaçava na ocasião o pólo SP-RJ-BH.

O parque gerador de Furnas conta com um complexo de 10 usinas hidrelétricas e 2 termelétricas, totalizando uma potência instalada de 9.292MW. Conta ainda com mais de 18 mil km de linhas de transmissão (em corrente alternada e contínua) e 44 subestações, garantindo o fornecimento de energia elétrica em uma região onde estão situados aproximadamente 51% dos domicílios brasileiros e que responde por 65% do PIB brasileiro<sup>7</sup>.

A Tabela 3.2.1.1. relaciona as 12 usinas, seus nomes e respectivas potências instaladas.

---

<sup>7</sup> Fonte: Folheto Informativo Furnas Centrais Elétricas S.A – Assessoria de Comunicação Social – novembro – 2003.

Tabela 3.2.1.1. Parque Gerador de Furnas Centrais Elétricas S.A.

Usina	Nome	Nº de UGs	Entrada da 1ª UG	Potência instalada
Usinas Hidrelétricas:	Usina de Corumbá	3	1987	375 MW
	Usina de Funil	3	1969	216 MW
	Usina de Furnas	8	1963	1.216 MW
	Usina de Itumbiara	6	1980	2.082 MW
	Usina de Luiz C. B. Carvalho	6	1969	1.050 MW
	Usina de Manso	4	2000	212 MW
	Usina de Marimondo	8	1975	1.440 MW
	Usina de Mascarenhas de Moraes	10	1957	476 MW
	Usina de Porto Colômbia	4	1973	320 MW
	Usina de Serra da Mesa	3	1997	1.275 MW
Usinas Termelétricas:	Usina de Campos	2	1968	30 MW
	Usina de Santa Cruz	4	1967	775 MW

Além da relação de usinas da Tabela 3.2.1.1. Furnas está envolvida atualmente em outros três projetos imediatos e dois futuros, as usinas de Peixe Angical, em parceria com a EDP tendo entrado em operação em 16 de setembro de 2006, com 452 MW de potência instalada ; Guaporé e Lajeado ; e os projetos de usinas no rio Madeira.

A confiabilidade de seu parque gerador e de seu sistema de transmissão faz de Furnas uma das maiores empresas do país. Desde 1992 a empresa apresenta índices de confiabilidade em nível internacional, superior a 99%<sup>8</sup>.

No quesito operação e manutenção de suas usinas e unidades geradoras Furnas adota uma postura conservadora. Suas unidades não costumam trabalhar em sobrecarga, ou sob ciclos de carregamento que prejudiquem as máquinas. As equipes de operação e manutenção são altamente capacitadas e de grande qualidade técnica.

<sup>8</sup> Fonte: Programa Siamger e SIAM, Engenharia de Manutenção, Departamento de Equipamentos Rotativos.

A metodologia de manutenção utilizada por Furnas vive um momento de transição. Como a maioria de suas usinas já se encontra com 30 ou mais anos de operação (ver Tabela 3.2.1.1.), muitas entraram em processo de modernização.

A política de manutenção em voga é uma variação do MCC, que evidencia a manutenção preventiva baseada no conhecimento técnico acerca do equipamento, evitando assim a manutenção corretiva.

Essa metodologia desenvolve periodicidades de manutenção, específicas para cada local, levando em consideração as características próprias de cada um. Essas periodicidades passam a ser baseadas no tempo de operação das máquinas (horas rodadas).

Desse modo há um aumento nos índices de confiabilidade, uma diminuição na taxa de falha e uma considerável diminuição das periodicidades de manutenção.

Apesar de obter bons resultados a metodologia do MCC possui suas limitações. A principal delas é o tempo de implantação. A necessidade de levantamento de informações específicas para cada local em separado, a análise desses dados, formação de um grupo de trabalho com especialistas e técnicos que conheçam as máquinas para a relação das manutenções aplicáveis envolve um número alto de hh (homem hora) dedicado.

Outro ponto negativo do MCC é a volatilidade imposta pelas características do sistema elétrico às unidades geradoras. Dados e informações utilizados no desenvolvimento da metodologia podem perder a importância em algum tempo, prejudicando sua funcionalidade.

Com o processo de modernização das usinas mais antigas de Furnas, iniciado em 2001, nas unidades 5 a 8 da usina Mascarenhas de Moraes, o monitoramento da condição das máquinas foi introduzido no modelo Furnas de manutenção de maneira definitiva.

Na ocasião a empresa vencedora da licitação, referente ao processo de modernização, decidiu por utilizar o sistema *Vibrosystem Inc.* de monitoramento.

No passado houve algumas tentativas de se implantar um sistema de monitoramento de Descargas Parciais em algumas unidades de Furnas, porém uma série de contratemplos fez com que o projeto não fosse levado adiante.

A Figura 3.2.1.1. apresenta uma vista frontal em corte de um gerador e sua turbina, exemplificando os principais pontos de medição e sua conexão com o sistema de monitoramento via rede. Esse sistema em particular foi

fornecido pela empresa “*Bently Nevada*” para a Usina de Mascarenhas de Moraes.

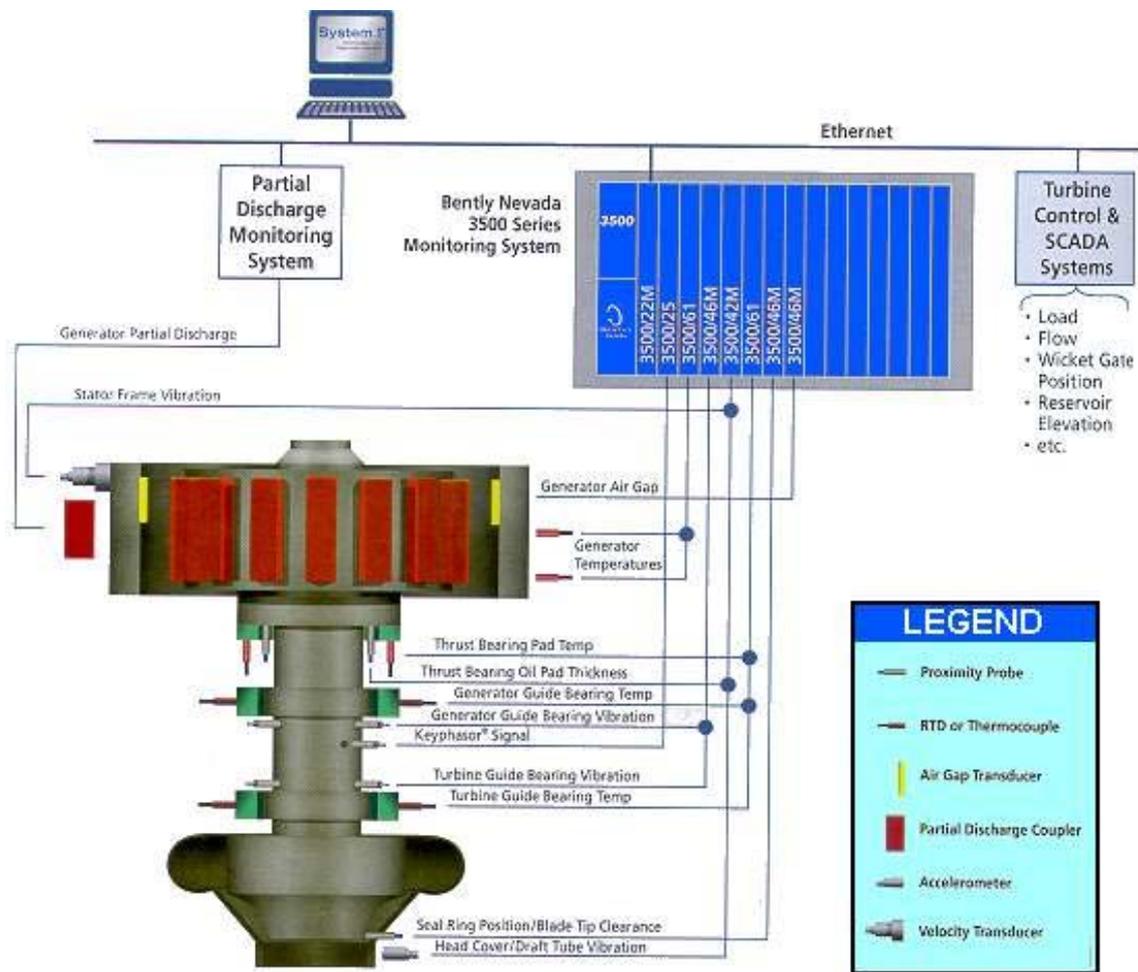


Figura 3.2.1.1. Sistema de monitoramento (Usina de Mascarenhas de Moraes).

A usina Mascarenhas de Moraes foi selecionada para ser a pioneira no processo de modernização do parque gerador de Furnas, por ser a mais antiga e ter apresentado uma certa deterioração de suas unidades geradoras e dos equipamentos associados. Nos últimos anos, seu índice de falhas sofreu aumento contínuo. Foram escolhidas as unidades 5 a 8, justamente por seu histórico de manutenção negativo.

O processo de modernização realizado foi bem abrangente, envolvendo o aumento da classe de isolamento de B para F (enrolamentos de estator e rotor), a substituição das excitatrizes rotativas por um sistema de excitação estático e dos sistemas de regulação (velocidade e tensão), além do novo sistema de monitoramento entre outros detalhes como sistemas auxiliares

mecânicos e elétricos. Devido a amplitude do projeto o mesmo foi dividido em duas fases.

Na primeira, mencionada anteriormente, seriam modernizadas as unidades 5 a 8, dentro dos moldes citados. Na etapa final seriam realizados os serviços nas demais unidades.

Para esse caso em particular, a primeira experiência de Furnas com modernização de usinas, foram selecionadas as variáveis de acompanhamento da Tabela 3.2.1.2.

Tabela 3.2.1.2. Relação de variáveis monitoradas na USMM.

Usina em modernização	Variáveis monitoradas
USMM – Usina Mascarenhas de Moraes	Pressão na caixa espiral
	Vibração do MGG e do MEG (em 2 pontos)
	Entreferro (a cada 90°)
	Pressão do tubo de sucção
	Oscilação axial do eixo
	Temperatura de ar frio do gerador
	Temperatura de ar quente do gerador
	Temperatura do óleo do MGG e Mancal combinado
	Potência ativa
	Queda bruta
	Temperatura do núcleo do estator
	Temperatura enrolamento do rotor
	Temperatura enrolamento estator (2 RTDs por fase)
	Abertura do distribuidor
Descargas Parciais	

Observando a Tabela 3.2.1.2. e as variáveis nela relacionadas nota-se rapidamente que foi dada maior ênfase às variáveis mecânicas, em detrimento das eletromagnéticas. Esse fato deve-se a maneira como foi desenvolvido o processo, e também a metodologia selecionada.

A usina Mascarenhas de Moraes encontra-se em fase final de comissionamento das unidades modernizadas (UGs 5 a 8), em paralelo foi dado início à modernização das unidades 1 a 4.

O processo de modernização dessa usina serviu como base para os demais, já existem outros dois em andamento e estimativa de mais dois para os próximos anos. A falta de experiência na área, por parte dos técnicos de Furnas foi decisiva em algumas escolhas equivocadas.

A seleção de algumas das variáveis monitoradas, assim como o processo de implantação, não atingiu as expectativas, forçando uma reformulação para a modernização das usinas seguintes.

Já para a segunda usina envolvida no plano de modernização, usina Furnas, cujo processo de modernização foi iniciado em maio de 2005 com a UG#6, foram utilizados os conhecimentos adquiridos em Mascarenhas de Moraes, tornando o processo mais completo.

A tendência para os próximos empreendimentos de modernização é que se valorize o monitoramento das variáveis eletromagnéticas em conjunto com as eletromecânicas, desse modo o processo de monitoramento da condição das máquinas torna-se bem mais completo.

Um exemplo de variável elétrica imprescindível aos novos modelos de monitoramento é o acompanhamento das descargas parciais nos enrolamentos estatóricos.

Deve-se ressaltar aqui que todos os projetos têm valores distintos, sempre à luz dos interesses aos quais estão relacionados.

Existe exemplos de instalações (usinas, indústrias e afins) cujos planos de manutenção são muito bem definidos e abrangentes, atingindo ótimos níveis de disponibilidade e confiabilidade. Em contrapartida há também exemplos de instalações onde praticamente não se realiza manutenção, mantidas sob uma filosofia de praticamente “não intervenção”, que também possuem ótimos índices.

O importante é relacionar sempre custo e benefício de maneira favorável ao empreendedor.

### **3.2.2. Exemplo das vantagens de um sistema de monitoramento**

Há uma parcela do corpo técnico das empresas do setor elétrico brasileiro que pode ser considerada descrente em relação as benesses propiciadas pela instalação de sistemas de monitoramento e diagnóstico.

Existem diversos exemplos na indústria mundial que comprovam o fato de que um sistema de monitoramento, projetado e instalado de maneira correta, pode ser definitivo no que tange a caracterização de problemas inerentes as máquinas.

Um bom exemplo da utilização de ferramentas de diagnóstico para melhor avaliar problemas nas unidades é o caso apresentado por Rolim em [23].

Como mencionado anteriormente, a usina de Mascarenhas de Moraes passou por um processo de modernização, envolvendo a instalação de um sistema de monitoramento da condição de suas máquinas. Após as mudanças de caráter físico nas unidades Furnas usou o sistema de monitoramento para obter diversas medições sob várias condições de operação, sem excitação, velocidade sem carga, carga nominal, etc.

Durante o recomissionamento da primeira unidade, UG#5, o sistema observou altos valores de vibração, gerando certa insegurança quanto a integridade da unidade. Antes da modernização os valores de vibração e oscilação do eixo, para todas as unidades, eram baixos.

Uma vez detectado o problema observou-se então os demais valores obtidos com as medições, entre eles a variação do entreferro e a vibração no estator. Após inspeção e verificação dos dados foi identificado a causa para tal vibração e oscilação: um deslocamento de aproximadamente 0.425mm no mancal guia do gerador que acabava por permitir o deslocamento do estator quando em carga e desestabilizar toda sua movimentação.

Os técnicos de Furnas acionaram então o consórcio responsável pela obra de modernização e demandaram que o problema fosse sanado sem custo adicional à empresa.

Sem o auxílio do sistema de monitoramento e da presença de pessoal capacitado para a interpretação dos dados disponíveis provavelmente esse problema, muito sério por sinal, passaria despercebido.

### **3.3. Ocorrências em Unidade Geradoras de Furnas**

Tendo em mente todo o discutido anteriormente decidiu-se pela realização de um levantamento de dados, formando assim um pequeno banco de informações acerca das ocorrências, relacionadas às unidades geradoras do parque gerador de Furnas (restringindo a busca somente às unidades

hidrelétricas). Partindo desse banco de dados pretende-se desenvolver um estudo, comparando-o aos dados obtidos na literatura e apresentados anteriormente, e utilizá-lo como referência futura.

Tal banco de dados inclui ocorrências de eventos de manutenção (preventiva, corretiva, etc.), registros de perturbações, variações de condições operativas, entre outros.

Esse levantamento visa estabelecer uma correlação entre as ocorrências verificadas, os principais equipamentos envolvidos e os dados estatísticos apresentados na literatura especializada mundial (EPRI, IEEE, ANSI, etc em [9][10][13][22][37]). Para esse estudo considera-se principal equipamento envolvido aquele identificado como a provável causa para o desligamento ou parada da máquina.

### **3.3.1. Formação do banco de dados**

Durante o segundo semestre do ano de 2005 iniciou-se um levantamento contendo todos os registros de ocorrências relacionadas a todas as unidades geradoras das usinas de Furnas Centrais Elétricas que provocassem desligamento (impedimento forçado para a operação). O período de observação compreende 5 anos, de 2002 a 2006.

A razão pela qual foi selecionado tal intervalo para avaliação das ocorrências registradas foi o fato primordial de que nesse intervalo a Engenharia de Manutenção, na pessoa da Divisão de Equipamentos Elétricos Rotativos (DEER), realizou com responsabilidade e eficiência a avaliação e registro de todos os problemas verificados nas unidades geradoras mencionadas anteriormente. Além disso a partir do ano de 2001 o registro diário de ocorrências se tornou praxe, estando as mesmas armazenadas em meio digital, desse modo as amostras tornaram-se mais confiáveis e acessíveis.

Para essa avaliação foram observadas somente as usinas hidrelétricas de Furnas. Optou-se por essa linha devido à matriz energética brasileira apresentar largo domínio de Usinas Hidrelétricas em detrimento das térmicas ou aquelas com fontes alternativas de energia.

Em uma primeira avaliação superficial foram observadas diversas ocorrências relacionadas diretamente às linhas de transmissão, ou ainda, a eventos externos às usinas, optou-se por não considerá-las. Desse modo é

possível restringir o universo de falhas a um fator bem próximo dos geradores síncronos, ou como veremos mais adiante, ao grupo Gerador.

Em suas 10 usinas hidrelétricas, com 53 unidades geradoras no total, Furnas representa um universo de comparação e amostragem considerável. Esse universo de controle é representativo, visto que estão ali presentes praticamente todos os fabricantes de vulto (alguns inclusive já passaram por reestruturações, fusões, mudanças de nome ou até mesmo falências) em diferentes equipamentos, desde os geradores propriamente ditos aos servomotores, compressores auxiliares, CLPs, bombas de óleo, conectores, cabos, medidores, etc.

Outra característica relevante do banco de dados de Furnas é referente ao tempo de operação de suas unidades geradoras. Estão presentes unidades de mais de 35 anos de operação, algumas incrivelmente nunca registraram falhas em elementos vitais como os enrolamentos estatóricos, até então, caso da unidade geradora 1 da Usina de Mascarenhas de Moraes, ao lado de outras com apenas 5 anos de operação, e já tendo registrado falhas graves, como uma falha bifásica no enrolamento estatórico da unidade geradora 1 da Usina de Manso, ocorrência apresentada em detalhes na seção 3.4.

Durante o período selecionado para a pesquisa (2002 a 2006) verificou-se um total de 578 ocorrências. É fato que para fins estatísticos ou ainda para fins de desenvolvimento de uma metodologia, essa quantidade de amostras é razoavelmente pequena, porém ainda assim representativa.

É importante ressaltar que dentro de um universo onde as falhas ou ocorrências são consideradas um estorvo e lembrando ainda que a metodologia de manutenção utilizada em Furnas coíbe a ocorrência de falhas durante a operação das máquinas, ocorrências essas danosas ou não, uma quantidade de 578 amostras é sim um número representativo para um universo de 5 anos.

Originalmente esse trabalho propunha uma ratificação dos dados levantados em extensa pesquisa literária ante os organismos internacionais especializados na área de energia elétrica (EPRI, IEEE, ANSI, etc, mencionados anteriormente), porém os resultados obtidos apontaram em outra direção.

A seguir serão apresentados os resultados obtidos com a pesquisa, dados estatísticos, comentários e conclusões.

### 3.3.2. Descrição e apresentação do banco de dados

Como mencionado anteriormente, foi pesquisado um universo de amostras de 578 ocorrências, do qual fazem parte desde desligamentos irrelevantes, de apenas alguns minutos, até paradas de máquina de meses, que incorrem em sérios problemas e prejuízos! [40]

Pode-se facilmente notar que são diversos os equipamentos responsáveis por essas ocorrências, já que uma unidade geradora completa é cercada por inúmeros acessórios e equipamentos auxiliares. Mais uma vez, é importante ressaltar que para essa pesquisa foram levadas em consideração apenas às ocorrências relacionadas diretamente aos geradores síncronos e seus equipamentos circundantes.

Devido à grande gama de equipamentos envolvidos, claramente uns mais importantes que outros, no desenrolar da pesquisa optou-se por dividir as ocorrências de acordo com o equipamento responsável pela mesma, desse modo o trabalho de avaliação e leitura dos dados é facilitado.

Sendo assim formou-se um grupo de equipamentos, para representar as principais causas dessas ocorrências avaliadas, denominado “Grupo Gerador”.

O “Grupo Gerador” é constituído pela unidade geradora em si e seus elementos associados mais importantes. Após cuidadosa avaliação do universo de amostragem, verificando as ocorrências e suas principais causas relacionadas aos equipamentos, assim como os valores relacionados a cada equipamento (em questão de investimento e importância estratégica) foram criados 6 grupos de equipamentos capazes de englobar todas as ocorrências registradas, são eles:

- Enrolamento Estatórico
- Mancais do Gerador
- Turbina
- Sistema de Excitação
- Regulação de Velocidade
- Outros

A seguir encontra-se uma pequena descrição de cada um dos grupos que perfazem o chamado “Grupo Gerador”:

- Enrolamento Estatórico:

Sistema simples abrangendo as bobinas ou barras do enrolamento trifásico de estator, o laminado do núcleo, o barramento circular e a saída do *bus-duct*, até a entrada do transformador elevador das unidades. Junto aos grupos do Sistema de Excitação e Regulação de Velocidade, são os principais focos de problemas relacionados a área elétrica.

Sua modelagem pode ser associada a um circuito trifásico do tipo “R-L”.

- Mancais do Gerador:

Esse grupo compreende os mancais do gerador, que podem ser de guia, escora ou combinado. Cada unidade tem seu próprio conjunto de mancais, ora guia e escora, ora somente escora, ora combinado. Além disso, também fazem parte desse grupo todos os equipamentos diretamente ligados aos mancais, como sistema de injeção de óleo, trocadores de calor, sistema de supervisão de temperatura dos mancais, etc. O fato de compreender todos esses equipamentos eletro-mecânicos faz com que esse grupo seja o mais sujeito a falhas (de acordo com várias fontes da literatura relacionada, alguns exemplos em [9][10]).

Um sistema basicamente mecânico.

- Turbina:

São integrantes desse grupo as turbinas e seus equipamentos envoltórios, como caixa espiral, eixo, anéis de retenção, pás, elementos de selagem, mancais da turbina, etc. Assim como o grupo dos mancais é um sistema basicamente mecânico.

- Sistema de Excitação:

Junto com o sistema de Regulação de Velocidade é o mais complexo dos grupos. No passado seu controle e atuação eram basicamente eletro-mecânicos, porém com o advento da microeletrônica atualmente esses sistemas possuem controle, acionamento e supervisão puramente eletrônicos, com interfaces próprias.

Essa complexidade se dá devido aos níveis de precisão exigidos, a velocidade de resposta, a forte presença de elementos eletrônicos (nas unidades modernas), ou a ausência de componentes eletrônicos (nas unidades antigas) entre outros. Fazem parte desse grupo o regulador de tensão, as

excitatrizes (rotativas ou estáticas), CLPs (onde aplicável), enrolamento de campo, anéis coletores, escovas, comutadores, etc.

- **Regulação de Velocidade:**

Tão complexo quanto o Sistema de Excitação, basicamente pelos mesmos motivos. Seus elementos integrantes são, entre outros, o regulador de velocidade em si, servo-motores, CLPs (onde aplicável), sistemas de injeção de óleo, etc. Percebe-se uma forte presença de elementos mecânicos.

- **Outros:**

Nessa categoria enquadram-se todos os outros elementos para os quais detectou-se pertinência nas falhas registradas nas ocorrências avaliadas. Como exemplo pode-se mencionar: mau funcionamento de relés, falhas em dispositivos de proteção ou supervisão, transdutores defeituosos, falha de operação, etc.

Após o levantamento das ocorrências, as mesmas foram separadas de acordo com sua causa primária e distribuídas nos grupos acima. Com isso, partiu-se para a avaliação dos números obtidos.

### **3.3.3. Resultados obtidos**

A pesquisa das ocorrências registradas em Furnas foi realizada após um vasto estudo teórico acerca das principais causas de impedimento de máquina na indústria mundial.

A partir desse estudo pretendia-se traçar uma estratégia de acompanhamento preditivo, com a utilização de técnicas inteligentes de monitoramento, através da qual seria possível aumentar os índices de confiabilidade e disponibilidade das unidades geradoras, e produzir futuramente, uma ferramenta de diagnóstico para máquinas elétricas de grande porte. O desenvolvimento desse banco de dados pretendia ratificar as informações adquiridas com a revisão bibliográfica.

A partir de registros publicados por organismos internacionais, como o EPRI e o IEEE, além de relatos resgatados em artigos internacionais, publicações em revistas da área de geração de energia elétrica, congressos, seminários e afins, foram verificadas as seguintes constatações relevantes ao trabalho e já mencionadas aqui:

- Pesquisas de confiabilidade executadas pelo IEEE e EPRI, acerca de falhas em máquinas elétricas de grande porte, indicam que falhas nos mancais correspondem a uma faixa de 30% a 50% do total de falhas. Logo em seguida aparecem as falhas atribuídas ao sistema de isolamento dos enrolamentos do estator, com um percentual estimado em torno de 30%[10].
- As políticas de manutenção relacionadas a essas máquinas visam a disponibilidade máxima, sem o detrimento da confiabilidade. Ou seja foco na produção e não na máquina. Esse fato é primordial para a seleção das metodologias de manutenção de máquinas utilizadas (em sua maioria na América do Norte e Europa).
- As metodologias de manutenção verificadas nos países integrantes desses organismos internacionais (principais fontes de dados e publicações) são centradas em ações de monitoramento constante seguidas de ações corretivas ou preventivas controladas. Desse modo a disponibilidade das máquinas é maximizada.
- As metodologias de manutenção utilizadas por Furnas (assim como a maioria das grandes empresas na área de geração elétrica no Brasil) seguem um modelo de manutenção onde a base é constituída por uma associação entre a manutenção preventiva e a corretiva, aliadas ou não aos dados obtidos com os sistemas de monitoramento.

Partindo das considerações listadas acima o resultado obtido com a pesquisa de ocorrências de unidades geradoras de Furnas causou uma certa surpresa inicial, por assim dizer. Diferentemente do esperado a avaliação dos 6 grupos selecionados posicionou em último e penúltimo, respectivamente, justamente os dois grupos aos quais se atribuía a maior frequência de falhas dentro do Grupo Gerador, os Enrolamentos Estatóricos (EE) e os Mancais do Gerador (MG).

As Tabelas a seguir (3.3.3.1. a 3.3.3.6) dispõem os dados obtidos, separados devidamente por grupo, ano a ano. São mostrados os valores absolutos de ocorrências em cada grupo a cada ano, sua relação percentual e por fim os resultados gerais, compreendendo todas as 578 ocorrências verificadas.

Tabela 3.3.3.1. Relação de ocorrências de 2002.

<b>Total 2002:</b>	<b>Abs</b>	<b>%</b>
EE	3	6,00
MG	3	6,00
TB	5	10,00
RV	5	10,00
SE	11	22,00
Outros	23	46,00
Total	50	100

Tabela 3.3.3.2. Relação de ocorrências de 2003.

<b>Total 2003:</b>	<b>Abs</b>	<b>%</b>
EE	1	0,89
TB	7	6,25
MG	12	10,71
RV	15	13,39
SE	27	24,11
Outros	50	44,64
Total	112	100

Tabela 3.3.3.3. Relação de ocorrências de 2004.

<b>Total 2004:</b>	<b>Abs</b>	<b>%</b>
EE	8	6,25
MG	10	7,81
TB	13	10,16
RV	16	12,50
SE	21	16,41
Outros	60	46,88
Total	128	100

Tabela 3.3.3.4. Relação de ocorrências de 2005.

<b>Total 2005:</b>	<b>Abs</b>	<b>%</b>
EE	5	2,907
SE	16	9,302
MG	17	9,884
TB	23	13,37
RV	34	19,77
Outros	77	44,77
Total	172	100

Tabela 3.3.3.5. Relação de ocorrências de 2006.

<b>Total 2006:</b>	<b>Abs</b>	<b>%</b>
EE	7	6,03
SE	13	11,21
MG	13	11,21
TB	15	12,93
RV	25	21,55
Outros	43	37,07
Total	116	100

Tabela 3.3.3.6. Relação de ocorrências de 2002 a 2006.

<b>Somatório 2002 - 2006</b>		
<b>Total por grupo:</b>	<b>Abs</b>	<b>%</b>
EE	24	4,15
MG	55	9,52
TB	63	10,90
RV	95	15,22
SE	88	16,44
Outros	253	43,77
Total	578	100,00

Legenda:

EE – Enrolamento Estatórico

MG – Mancal do Gerador

TB – Turbina

RV – Regulador de Velocidade

SE – Sistema de excitação

Outros – Outros

A seguir são apresentados alguns gráficos de maneira a facilitar o entendimento dos números expostos anteriormente. Os gráficos 3.3.3.1. e 3.3.3.2. mostram respectivamente o total de ocorrências (em valores absolutos e percentuais) separadas por grupo de estudo e sua evolução no período observado.

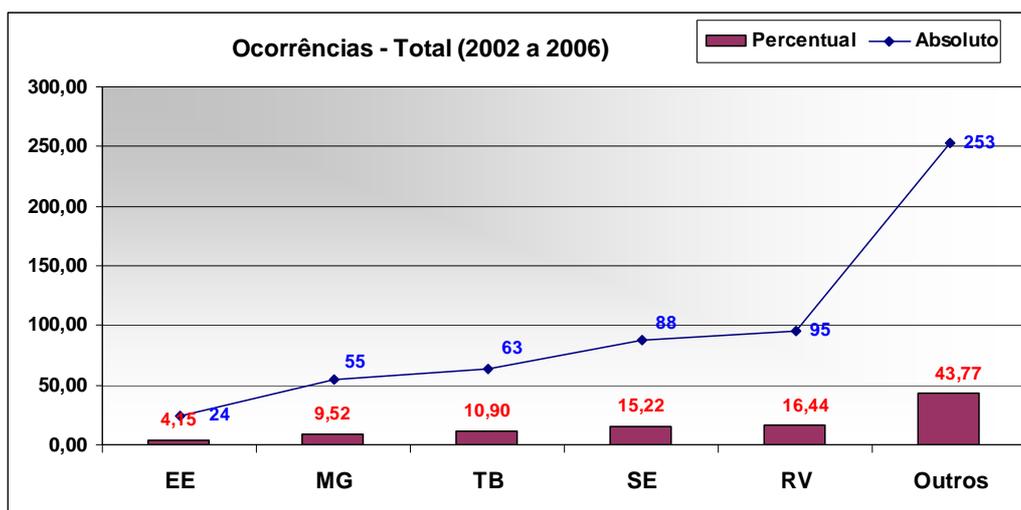


Gráfico 3.3.3.1. Total de ocorrências separadas por grupo.

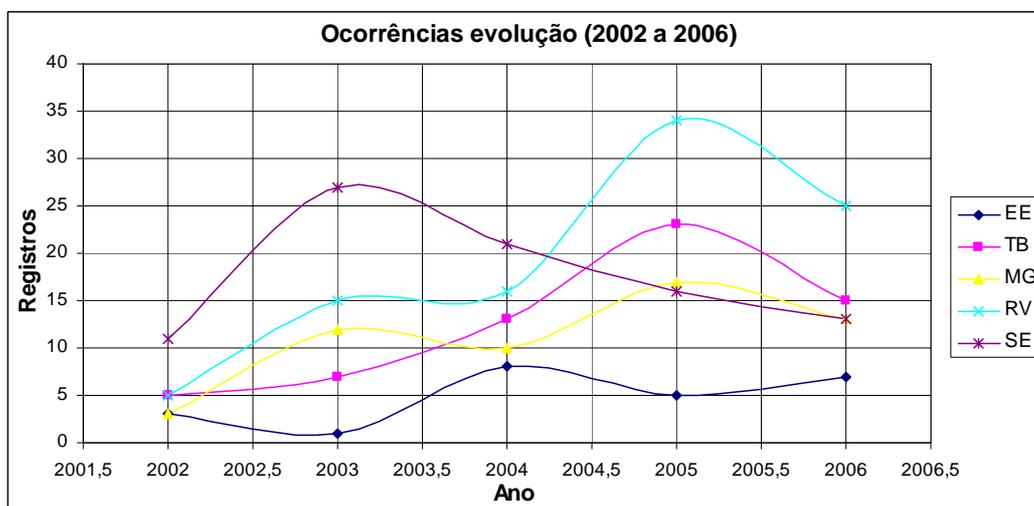


Gráfico 3.3.3.2. Evolução das ocorrências ao longo do período de observação.

Não surpreende o fato de que o grupo “Outros” tenha tido uma frequência de ocorrências tão superior aos demais, já que dentro desse grupo há uma gama muito maior de elementos, todos passíveis de falhas que podem vir a prejudicar o “Grupo Gerador”. Portanto após avaliação criteriosa concluiu-

se que o fato de sua frequência representar 43,77% das ocorrências avaliadas não compromete o resultado da pesquisa.

Para facilitar a avaliação dos demais resultados optou-se por subtrair do universo de amostras observadas aquelas advindas de ocorrências relativas ao grupo “Outros”, obtendo assim o resultado expresso no gráfico 3.3.3.3., a seguir:

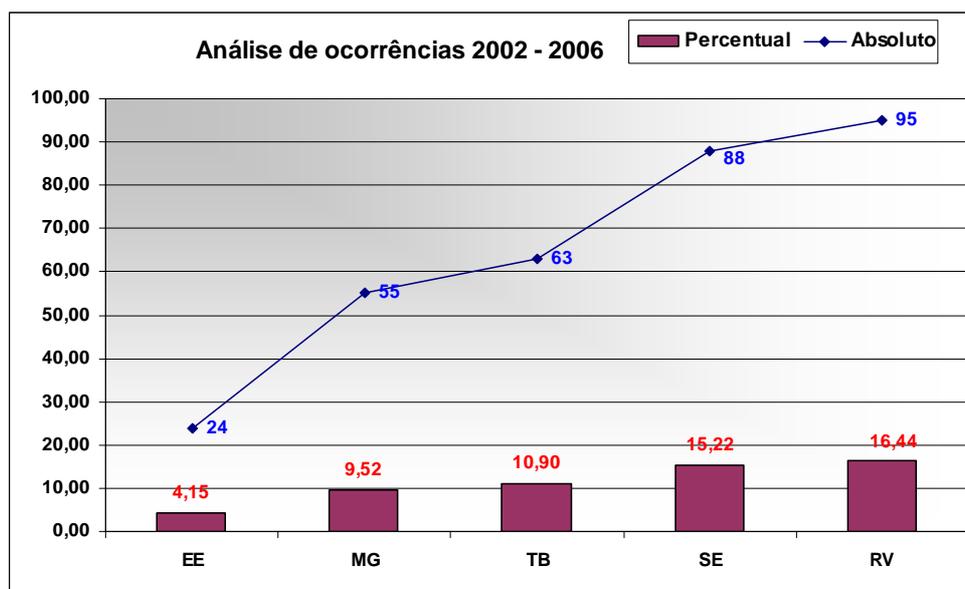


Gráfico 3.3.3.3. Total de ocorrências separadas por grupo, excetuando o grupo “Outros”.

Observando o resultado final (gráfico 3.3.3.3) percebe-se a preponderância das falhas associadas ao Sistema de Excitação (SE) e ao de Regulação de Velocidade (RV), em relação às demais. Juntos esses dois elementos são responsáveis por 31,66% das ocorrências verificadas no período.

Inicialmente isso provocou certa reticência em relação aos dados, até mesmo quanto à sua integridade. Considerando as expectativas quanto a relação percentual de falhas, que evidencia a frequência de falhas nos mancais do gerador e nos enrolamentos estáticos, os números encontrados nessa pequena pesquisa (13,67% do total de ocorrências estão relacionadas aos Enrolamentos Estáticos (EE) e aos Mancais do Gerador (MG), juntos) estão bem aquém.

Fazendo uma comparação percentual as ocorrências relacionadas ao Sistema de Excitação (SE) e ao de Regulação de Velocidade (RV) juntos são

231,60% mais freqüentes que àquelas associadas ao Enrolamento Estatístico (EE) e aos Mancais do Gerador (MG) também juntos.

Os resultados atingidos levantaram dúvidas e maiores questões acerca das razões para tal disparidade em comparação com as publicações visitadas, consideradas em nível mundial. O procedimento seguinte foi iniciar nova pesquisa a fim de buscar a causa, ou causas, provável para justificar a diferença entre os dados estatísticos pesquisados e os resultados obtidos através de levantamento de ocorrências em Furnas. Essa nova análise foi concebida de forma imparcial.

Analisando a disparidade entre as duas pesquisas têm-se que, ambos os resultados são pautados por dados reais, ou seja, a possibilidade de má interpretação ou ainda erro de cálculo não existe para esse banco de dados em questão ou ainda para os dados encontrados na pesquisa à literatura.

Desse modo após algumas considerações acerca dos resultados e suas possíveis incongruências, revisão dos dados e dos valores calculados, são ressaltados os seguintes pontos relevantes:

- Os universos de amostragem são diferentes (como mencionado anteriormente) e para a avaliação do banco de dados da pesquisa supracitada não foi utilizado qualquer desvio ou consideração estatística, os dados foram analisados cruamente;
- O fato das metodologias de manutenção dominantes nas duas diferentes fontes de dados, serem bem diferentes também é de extrema relevância;
- O fato das matrizes energéticas das duas fontes serem também bastante distintas, Furnas em oposição aos países do hemisfério norte, base dos dados das organizações pesquisadas. Enquanto em Furnas temos basicamente unidades hidrelétricas, e para essa pesquisa somente foram consideradas tais unidades, nas demais há a presença maciça de unidades termelétricas. Isso implica em grupos geradores com modelos de máquinas muito diferentes (Apêndice A).
- Outro diferencial importante é justamente as filosofias de manutenção e operação das unidades geradoras nesses dois grupos estudados, enquanto em Furnas o foco é centrado nas máquinas e em seu estado nos demais o foco é centrado na produção.

Esses fatores por si só já fornecem subsídios para explicar a diferenciação entre os dados encontrados. Na seção 3.5 será apresentada de forma mais detalhada uma análise crítica acerca dos dados encontrados.

### 3.4. Exemplo de falha em Unidade Geradora [40]

Em 14 de fevereiro de 2004 a unidade geradora 4 da Usina de Manso foi desligada pela atuação de proteção. A unidade estava operando com 45MW e 4Mvar, quando às 13h01min houve atuação das proteções diferencial da unidade e do gerador, falha para terra no estator 100% e 95% respectivamente. A intensidade da falha registrada pelo sistema de proteção foi tamanha que acionou o sistema de proteção contra incêndio com descarga de CO<sub>2</sub>.

Após inspeção, verificou-se uma falha no enrolamento estatórico envolvendo bobinas das três fases, a qual iniciou-se entre as fases A e B, logo depois se estendendo para a fase C. Além disso, também se verificou um encurvamento das extremidades das barras do enrolamento de amortecimento, o que comprova a intensidade das forças magnéticas envolvidas na ocorrência.

A Usina de Manso é pertencente a Furnas Centrais Elétricas e possui uma capacidade instalada de 212 MW, divididos entre quatro unidades geradoras com as mesmas características.

A seguir uma descrição da Unidade Geradora em questão:

#### GERADOR

Fabricante..... IMPSA  
Data de entrada em operação..... 25/5/2001  
Potência nominal..... 55,5Mva  
Tensão nominal..... 13,8kV

#### ESTATOR

Classe de isolamento..... F  
Número de ranhuras..... 330  
Tipo de enrolamento..... imbricado  
Passo..... 1 a 8(7 ranhuras)

Circuitos por fase..... 5  
Tipo de instalação..... bobina  
Número de espiras..... 4

#### ROTOR

Classe de isolamento..... F  
Número de pólos..... 40  
Tensão de excitação..... 173V  
Rotação..... 180rpm

A falha em questão envolveu bobinas de frente e de fundo da ranhura 1 até a ranhura 33, as quais tiveram o isolamento danificado em diversos graus. O barramento circular também teve seu isolamento danificado. A Figura 3.4.1. apresenta um panorama da região da falha após a retirada do rotor.

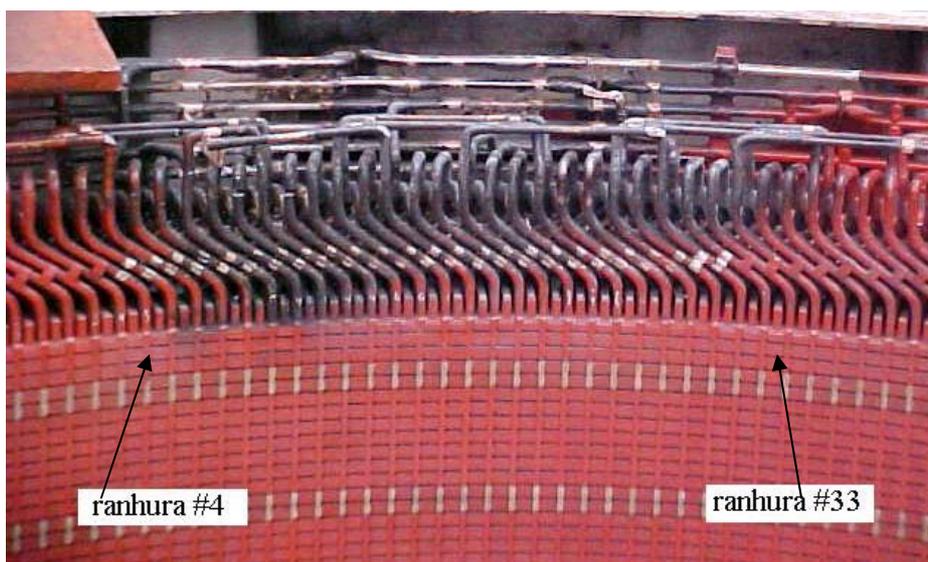


Figura 3.4.1 – Falha a terra da UG#4 da Usina de Manso em 14 de fevereiro de 2004 (USMS.O).

#### 3.4.1. Análise da Ocorrência

Nenhum indício da origem da falha foi encontrado, pois não houve registro de quaisquer anormalidades no sistema na ocasião e a região onde ocorreu a falha encontrava-se completamente carbonizada. A Figura 3.4.1.1. exemplifica o fato.



Figura 3.4.1.1. – Estado das bobinas da Unidade após a ocorrência.

Existem diversos fatores que poderiam contribuir para tal ocorrência, os de maior probabilidade são:

- Impregnação inadequada da resina: às vezes, inadvertidamente durante o processo de impregnação e cura do sistema de isolamento, pequenos vazios são deixados no isolamento. Isto pode ocorrer como resultado de um processo inadequado de vácuo ou pressão, alta viscosidade da resina, temperatura imprópria ou objetos estranhos incrustados na fita de mica. Na presença de esforços de tensão, descargas parciais ocorrerão através destes vazios e atacarão a resina. Segundo STONE<sup>9</sup> se os vazios estiverem próximos ao condutor poderá ocorrer falhas de 2 a 5 anos.
- contaminação do enrolamento: outro fator que pode favorecer o surgimento de descargas é o depósito de materiais condutivos, como por exemplo pó de escovas, entre as amarrações das cabeças das bobinas de fases diferentes, propiciando caminhos de baixa resistência para correntes

---

<sup>9</sup> G.C. Stone, "PD Seminar", Volume 1, Iris Power Engineering, Toronto Canadá, julho de 2004.

de fuga. Neste caso, algum objeto estranho pode ter sido deixado entre as bobinas e ter criado um caminho para a ação da corrente de fuga.

Outros fatores que podem provocar uma falha no isolamento do estator tais como descargas elétricas nas ranhuras, deterioração da camada semicondutiva, afrouxamento das bobinas, vibração das cabeças, deterioração térmica e ciclo de operação/carga são de ação mais lenta. Baseado nos resultados do último ensaio dielétrico<sup>10</sup> podemos supor que a probabilidade destes fatores terem sido os causadores da falha é muito pequena.

No rotor, o enrolamento de amortecimento também foi danificado durante a falha. O enrolamento de amortecimento sofreu um encurvamento nas suas barras de interligação entre os pólos, o qual ocorreu em todo o anel, tanto na parte superior quanto na parte inferior, em diferentes graus de intensidade. Notadamente, a região entre os pólos 23 e 30 foi atingida com maior intensidade. A Figura 3.4.1.2. apresenta melhor esse fato.

O encurvamento destas barras foi causado pela força originada da corrente e do campo magnético no qual o condutor está inserido. Neste caso, durante a falha houve circulação de uma corrente de seqüência negativa no enrolamento de amortecimento, que estava imerso em um campo magnético produzido pela corrente que circulou na armadura durante o evento.



Figura 3.4.1.2. – Danos às conexões dos pólos após a ocorrência.

---

<sup>10</sup> Centro Técnico de Ensaios e Medições, Relatório de Ensaios Dielétricos na unidades geradoras 4 da USMS.O.

Quanto à atuação da proteção, a seqüência de operação foi a seguinte:

Tabela 3.4.1.1. – Seqüência de operação da proteção do evento.

Hora	Evento
13h1min25s206	87U atuado
13h1min25s206	87G atuado
13h1min25s246	DJ 744 aberto
13h1min25s252	86E atuado
13h1min25s551	64G atuado
13h1min25s768	64G normal
13h1min27s625	87U normal
13h1min28s969	87G normal

Conforme pode ser observado na Tabela 3.4.1.1., a proteção diferencial da unidade permaneceu atuada por mais de 3 segundos indicando que a falha persistiu durante este tempo, o que explica a extensão da falha.

Apesar de uma falha dessa monta, bifásica evoluindo para trifásica, provocar grandes danos, presumimos que o tempo de abertura dos disjuntores assim como o tempo de descarga do campo contribuiu para o agravamento da falha.

A Figura 3.4.1.3. apresenta um oscilograma da ocorrência, extraído do sistema supervisor SINAPE®, associado com o sistema de proteção (relés digitais). Através dele pode-se observar claramente a evolução da falha pelas fases do enrolamento estático. A área circundada em pontilhado vermelho concentra as leituras para tensão e corrente respectivamente para as fases A, B e C, de cima para baixo.

Inicialmente as fases A e B são atingidas (instante 0,0), seguidas pelo colapso da fase C, no instante 0,48. A legenda no lado esquerdo da Figura permite a identificação das variáveis medidas, tensões e correntes das fases A, B e C respectivamente.

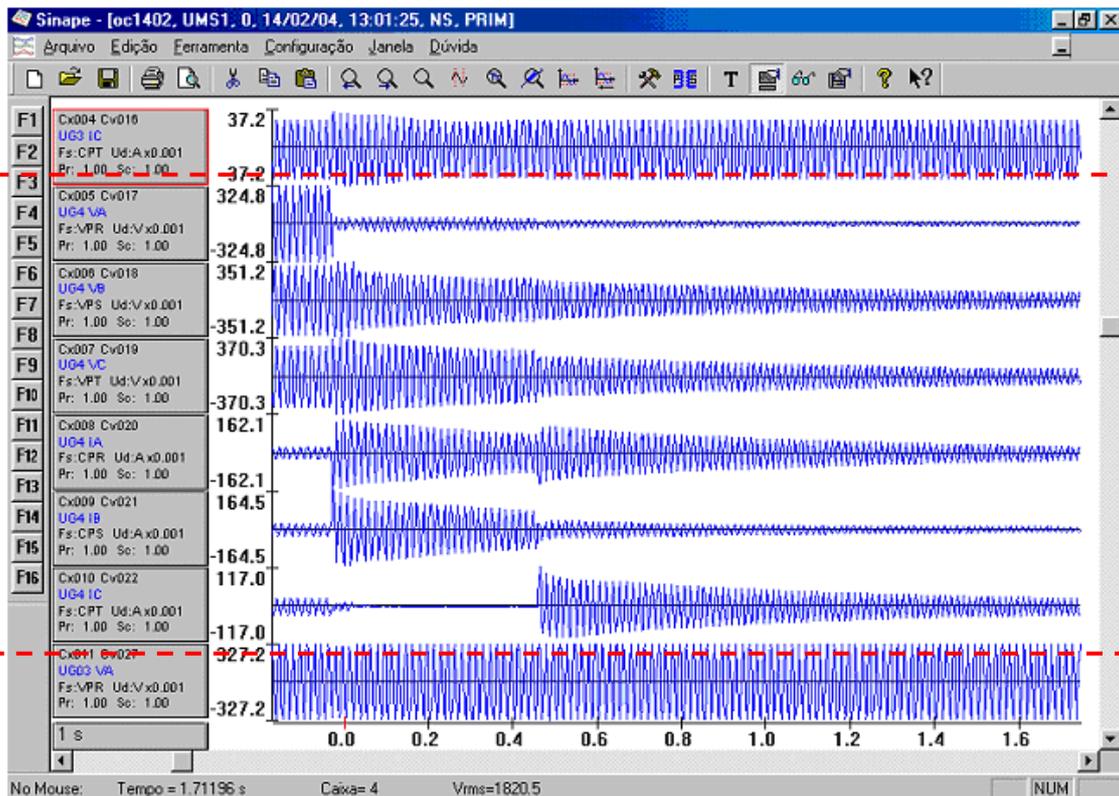


Figura 3.4.1.3. – Oscilograma da ocorrência.

Apesar de todas as proteções terem atuado corretamente e de o disjuntor da unidade ter sido aberto em 40 ms, o tempo de duração da falta foi anormal, pois ela deveria ter sido extinta em poucos ciclos.

Nos testes realizados após a normalização da máquina onde foi simulada a atuação das proteções constatamos que o disjuntor de campo abriu em 80 ms. O tempo de abertura dos disjuntores é considerado longo, pois somando os tempos de cada um deles, o tempo final até a abertura do disjuntor de campo será de 120 ms. Estudos estão sendo feitos no sentido de redução deste tempo.

Além disso, o fato do disjuntor de campo ser desligado tanto tempo após o disjuntor de entrada da máquina (40ms ou aproximadamente 2,5 ciclos) causa um evento de conseqüências perigosas, a motorização da máquina.

Ademais, pelo tempo total que a falha permaneceu, podemos supor que também haja alguma falha no sistema de descarga do campo desta ou de todas as unidades. Estes problemas deverão ser estudados mais detalhadamente.

### **3.5. Análise crítica do Banco de Dados de Ocorrências**

O Brasil possui em sua matriz de energia elétrica um percentual próximo aos 75% de unidades hidrelétricas (Figura 1.1). Em sua grande maioria, essas centrais hidrelétricas possuem máquinas antigas, com mais de 10 anos de uso (Tabela 3.2.1.1 para o caso de Furnas Centrais Elétricas, porém aplicável a maioria do setor elétrico).

Apesar da entrada de muitas unidades geradoras de energia termelétrica na última década, principalmente em virtude de problemas de abastecimento, essa categoria ainda representa uma pequena parcela. Além disso sua taxa de operação é muito baixa, haja visto que em 2006 por exemplo praticamente nenhuma térmica operou.

Com isso é fato que a experiência brasileira no que diz respeito a operação e manutenção de usinas hidrelétricas seja considerada referência internacional.

O modelo de manutenção em voga nas grandes empresas responsáveis pela geração de energia elétrica no Brasil, entre elas Furnas, Chesf, Eletronorte, entre outras, é por assim dizer, conservador, ou seja, prima pelo bem estar das unidades em detrimento algumas vezes da sua taxa de disponibilidade anual. A filosofia de manutenção reinante em Furnas se baseia em tarefas de manutenção preventivas definidas por intervalos de tempo fixos (ou horas de operação) e corretivas.

Um simples exemplo desse fato é que a praxe em Furnas para falhas em bobinas estatóricas, em quaisquer de seus geradores, é a paralisação da operação da unidade e a completa substituição das bobinas em falha, procedimento demorado e de alto custo, enquanto que varias empresas no mundo simplesmente seccionam o enrolamento em torno dessas bobinas, “jumpeando” as mesmas e retornando a máquina à operação em muito menos tempo.

Apesar de algumas empresas estarem investindo em sistemas complexos de monitoramento (entre elas Furnas), esse processo ainda encontra-se em fase embrionária em muitas delas, salvo exceções de sucesso como a Copel. Os dados obtidos desses sistemas ainda não são usados como base para o desenvolvimento de uma nova metodologia de manutenção baseada na condição, mantendo-se firme a filosofia em uso.

Em conjunto a esses dois fatores mencionados há também o fato de que a operação do sistema elétrico brasileiro, realizada pelo ONS – Operador

Nacional do Sistema, é setorial porém não individual. Isso significa que não há prejuízo, ou até mesmo lucros cessantes, para as empresas geradoras caso uma de suas unidades esteja impedida, desde que a energia demandada seja suprida.

Em contra partida temos o modelo de gestão do sistema elétrico praticado no hemisfério norte, aliado as características próprias de sua matriz de energia elétrica (turbogeradores em vez de hidrogeradores) e metodologias de manutenção.

As máquinas termelétricas sofrem esforços muito maiores em suas peças mecânicas de suporte, principalmente os mancais do gerador, por trabalharem com altíssimas velocidade de rotação (na casa dos 3600 RPM), enquanto as hidrelétricas não possuem na velocidade um agente de grandes esforços (trabalham em média na casa dos 180 RPM).

No hemisfério norte investe-se pesado em monitoramento e acompanhamento preditivo, de modo a se ter a qualquer momento uma noção exata das condições da máquina observada. O intuito dessa filosofia é possibilitar, através de criteriosa avaliação, a seleção do momento mais propício de uma parada de máquina (e obviamente menos prejudicial em termos financeiros). É importante ressaltar que nesse caso o fator técnico anda muito mais próximo ao fator econômico, por muitas vezes sendo até mesmo subjugado por ele.

Sendo assim partiu-se para uma análise micro, ou seja, dissecando os dados de ocorrências pesquisados em seus pormenores.

Nos dados obtidos em Furnas, não foi possível identificar uma repetitividade satisfatória nas causas para as ocorrências. Duas ou mais falhas relacionadas a um grupo em particular, como Enrolamentos Estatóricos ou Sistema de Excitação, podem ser originadas por dois ou mais problemas totalmente distintos, em elementos também independentes, ou ainda, várias delas advirem de uma mesma causa.

Apesar de pouco estimulante esse fator é observado em qualquer amostragem estatística, por definição (adequada a esse caso) um grupo é constituído de uma “reunião de objetos formando um todo distinto”<sup>11</sup> ou seja

---

<sup>11</sup> gru.po s. m. 1. Certo número de pessoas reunidas. 2. **Reunião de objetos formando um todo distinto**. 3. Quím. Reunião de átomos que formam uma parte reconhecível, e comumente transferível, de uma molécula. 4. Cada conjunto de 4 dezenas (de 00 a 99) representativo de cada um dos 25 animais do jogo do bicho. - Dicionário Michaelis

objetos distintos ou não que unidos formam um todo. Daí ser compreensível que uma ocorrência em um grupo como o dos Sistemas de Excitação possa advir de uma série de elementos distintos.

Esse fator, a repetitividade, é crucial para o desenvolvimento de qualquer ferramenta de avaliação, como diagnóstico, utilizando técnicas inteligentes. Em se trabalhando com um universo de possibilidades onde a mesma falha macro pode ser resultado de dezenas de falhas micros, seria necessário criar uma nova inferência ou equação lógica para cada possibilidade conhecida.

Ainda assim trabalhar-se-ia com a possibilidade de não se estar cobrindo uma parcela considerável das possíveis falhas, apenas razoável.

Os grupos com maior expressão na freqüência das ocorrências, Sistema de Excitação e Regulação de Velocidade, são também aqueles que possuem um número maior de elementos integrantes e conseqüentemente um número exponencialmente maior de possibilidades para falhas. Porém, o fato de serem grupos compostos por muitos componentes não é somente um fator negativo, essa fragmentação facilita a realização das tarefas de manutenção.

Além das possibilidades matemáticas para variações nos modos de falhas para esses dois grupos é de suma importante ressaltar o fato de que o passar dos anos foi mais rigoroso com esses dois grupos que com os demais.

Esses elementos são mais complexos, demandam maiores cuidados e acabam por necessitar de um número maior de partes sobressalentes, porém com o tempo e o avanço tecnológico (o advento da informática e da microeletrônica) esses equipamentos tornaram-se obsoletos em maior velocidade. Em determinado momento não havia mais onde encontrar peças sobressalentes, determinando assim um certo canibalismo metafórico para mantê-los operacionais.

No caso de Furnas esse problema está com seus dias contados, um grande processo de modernização das usinas, iniciado pela usina de Mascarenhas de Moraes, encontra-se em andamento.

Por outro lado ao avaliarmos grupos compostos por elementos simples como os Enrolamentos Estatóricos ou os Mancais do Gerador ainda assim encontramos diversas falhas independentes, porém em número bem menor. Apesar disso a correta identificação das causas de falhas em elementos dos enrolamentos estatóricos, por exemplo, é uma tarefa difícil e que nem sempre é bem sucedida. Por diversas vezes encontra-se o ponto de falha, o elemento com defeito, porém mesmo após uma detalhada análise desse elemento ainda

assim não se pode afirmar com certeza o que o deteriorou a ponto de apresentar esse defeito.

Outro fator que deve ser observado é o tempo despendido para se reparar uma bobina (ou várias) em falha em um determinado enrolamento que usualmente é muitas vezes superior ao de se substituir um cartão eletrônico defeituoso em um regulador de tensão ou velocidade.

Em sistemas elétricos, a falha de uma parte específica, em geral, acarreta uma série de problemas e perturbações em vários componentes do mesmo, de forma quase simultânea, dada a velocidade em que os fenômenos elétricos ocorrem.

Ainda assim esses dois grupos, Enrolamentos Estatóricos e Mancais do Gerador, continuam sendo os mais acessíveis no quesito avaliação de falhas. Possuem uma elevada gama de variáveis para monitoramento, pontos para entrada de sensores e afins.

Esse fato, aliado à grande presença de publicações internacionais acerca de falhas nesses dois elementos, os torna a melhor fonte de dados para estudos de acompanhamento preditivo e monitoramento da condição de máquinas elétricas.

Sendo assim apesar do resultado da pesquisa de ocorrências em Furnas apontar teoricamente em outra direção, é confirmado como prioridade, por tudo exposto anteriormente, o estudo e a utilização de elementos pertencentes aos grupos do enrolamento estatórico e aos mancais do gerador para determinar o acompanhamento preditivo em máquinas elétricas de grande porte. O resultado obtido com o monitoramento da condição desses dois grupos com certeza será bastante satisfatório.

Esses fatores observados durante a pesquisa [seção 3.5], analisados junto aos artigos e trabalhos pesquisados na literatura [seção 4.4], justificaram a escolha do enrolamento estatórico como base para o desenvolvimento do modelo de diagnóstico apresentado na seção 5.7.

# Capítulo 4

## Métodos de Avaliação de Falhas e Técnicas Inteligentes

Dando prosseguimento ao desenvolvimento do trabalho passa-se a fase de discussão dos métodos existentes de avaliação de falhas, sejam eles através da lógica convencional, chamados métodos tradicionais ou clássicos, ou da utilização de técnicas inteligentes.

Anteriormente nesse trabalho (seções 2.2 e 2.3) foram apresentados modelos de sistemas de proteção e detecção de falhas, largamente utilizados na indústria mundial, não só relacionados a geradores síncronos. Sua confiabilidade e valores são comprovados e já solidificados há tempos.

A seguir serão apresentados métodos construídos a partir de ferramentas baseadas nas chamadas Técnicas Inteligentes. Inicialmente será realizada uma descrição em pormenores de algumas dessas técnicas, na área de inteligência artificial e engenharia do conhecimento. Por fim serão tecidas algumas considerações acerca da interseção entre as técnicas inteligentes e sua utilização para avaliação e diagnóstico de falhas em geradores síncronos.

### 4.1. Técnicas Inteligentes

Para abordar o tema técnicas inteligentes e sistemas especialistas, é necessário ingressar inicialmente na definição e na apresentação de Inteligência Artificial (“AI – *Artificial Intelligence*”).

A Inteligência Artificial pode ser definida como um ramo da ciência que estuda o conjunto de paradigmas que pretendem justificar como um determinado comportamento inteligente pode emergir de implementações artificiais, em computadores [25].

O que pode ser considerado um sistema inteligente é, no entanto, ainda bastante polêmico. Um subterfúgio permite identificar sistemas inteligentes de forma indireta. Considera-se um programa de computador inteligente quando o mesmo é capaz de realizar uma tarefa, que se fosse feita por um ser humano, seria considerada inteligente.

Sistemas como acionadores automáticos ou até mesmo certos robôs, apesar de apresentarem maior complexidade, não devem ser confundidos com sistemas inteligentes. Um robô manipulador que aplica pontos de solda na carroçaria de veículos ou ainda participa na montagem de suas peças, apesar de realizar uma seqüência complexa de movimentos, ter requisitos de operação em tempo real e elementos de segurança aguçados não é considerado inteligente. Este robô apenas repete uma seqüência de movimentos previamente armazenada e que se não for atualizada ou modificada por seu operador se repetirá *ad infinitum* [25].

Falta a este sistema a capacidade de se adaptar a situações completamente novas. Uma das características de sistemas inteligentes é justamente a capacidade de aprender, de se adaptar a um ambiente desconhecido ou a uma situação nova [26].

Visto isso é razoável associar diretamente essa chamada “Inteligência” a alguns conceitos como: aprendizado, capacidade de adaptação, diversidade e compreensão.

Por ser uma área muito extensa o estudo da inteligência artificial possui várias abordagens distintas e classificações, e com elas diversas metodologias associadas. De acordo com a quantidade de dados e/ou capacidade teórica disponíveis, diferentes abordagens (e dentro de cada abordagem diferentes métodos) são indicadas para cada situação em particular.

Os diversos grupos de metodologias ou sistemas ditos especialistas podem ser classificados, grosso modo, em [27] [29]:

- (1) Grupos de modelagem livre (*model-free*);
- (2) Grupos baseados em modelos (*model-based*).

Dentro desses grupos de atuação existem várias metodologias de trabalho, cada uma delas com suas vantagens e deficiências, como: Redes Neurais Artificiais, Lógica *Fuzzy*, Sistemas Especialistas, Métodos Estatísticos, Métodos Probabilísticos, entre outros.

Há metodologias que utilizam redundâncias analíticas, baseadas em modelos numéricos (*model-based*) as quais adquirem seus bancos de amostras através de estruturas de observadores (*observer-based*).

A idéia básica de um esquema baseado em observadores é reconstruir as saídas do sistema alvo a partir de medidas ou subconjuntos de medidas com auxílio de um elemento observador e usando um fator de erro estimado, como um resíduo para a especificação [28]. Utilizam geralmente o monitoramento em tempo real, com aquisição constante de dados e métodos de comparação e avaliação como modelos de médias paralelas. Para tal são desenvolvidos algoritmos numéricos adaptativos em sua maioria.

Quando existem apenas exemplos (amostras representativas) de um dado processo, sem regras que expliquem a sua geração, então os métodos estatísticos permitem obter os melhores resultados.

No extremo oposto dessa situação estão os métodos de Inteligência Artificial Simbólicos, como por exemplo os Sistemas Especialistas (baseados em Lógica *Fuzzy* ou Redes Neurais por exemplo). Neste caso o importante são as regras e o processo de inferência que permite resolver um certo problema e suas variantes.

Os chamados métodos baseados no conhecimento (*knowledge-based*) utilizam algoritmos pré-definidos (não necessariamente numéricos) e independentes, podendo ser utilizados para diferentes modelos. Esses algoritmos baseiam-se em bancos de dados acerca dos equipamentos, seu histórico, dados de manutenções preventivas, e eventos do gênero [5].

Esse trabalho se aterá ao estudo das abordagens simbolista e conexionista, ambas de modelagem livre.

O quadro apresentado na Figura 4.1.1. apresenta de maneira simples a relação entre essas abordagens ou paradigmas e exemplifica metodologias associadas.

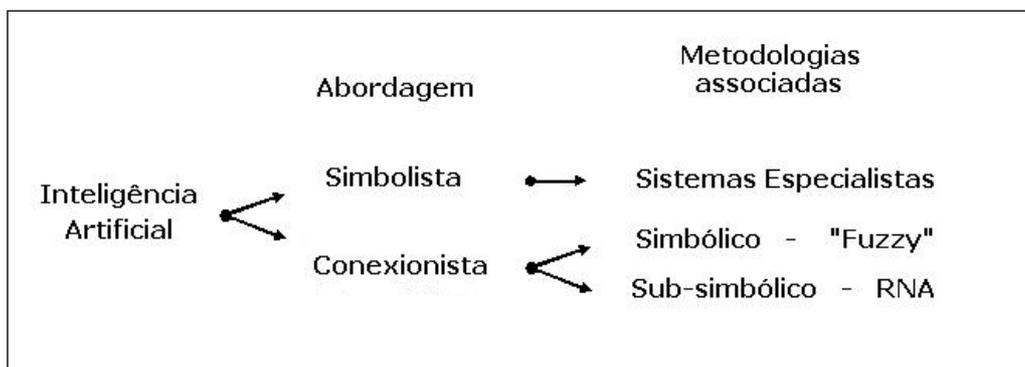


Figura 4.1.1 – Inteligência Artificial, Abordagens e Metodologias.

Seguindo essa linha, podemos ainda dividir esses grupos em outros subgrupos, destacando suas especialidades, como: Métodos baseados em redundâncias analíticas; Métodos baseados no conhecimento, etc.

#### **4.2. Abordagem Simbolista**

A abordagem Simbolista, ou ainda, baseada no conhecimento, é relacionada quase sempre a Sistemas Especialistas. Tais sistemas existem como tal, de certa maneira muito próximos ao que conhecemos hoje, há mais de 30 anos. O desenvolvimento, em meio acadêmico, de técnicas inteligentes sempre teve uma boa aceitação. Esse tipo de estudo ganhou considerável espaço nas últimas duas décadas, em resposta a maior aceitação dessas metodologias no campo e da maior disponibilidade de artefatos tecnológicos capazes de atender as necessidades da metodologia.

Existem várias definições na literatura para Sistemas Especialistas, dentre elas pode-se citar: “Sistemas computacionais, abrangendo software e hardware, capazes de simular o processo de raciocínio de um especialista (*expert*) para solucionar problemas complexos de uma determinada área.”[30]

Sistemas especialistas trabalham geralmente com grandes quantidades de informação, sendo capazes de solucionar problemas de aplicações variadas. Tal fato torna-os únicos na maneira em que lidam e resolvem tais problemas, combinando representação de conhecimento, algoritmos de solução de problemas e, como não podia deixar de ser, os diferentes tipos de problemas a eles associados [27][30].

Os sistemas especialistas também podem ser percebidos em alguns casos como estimadores de modelagem livre, eles são capazes de mapear ações a determinadas condições. Esses “especialistas” não articulam uma função de transferência matemática responsável por relacionar o “grupo” de condições ao de ações, porém a arquitetura desses sistemas é simbólica, favorecendo uma abordagem proposicional e de cálculos preditivos para simular inteligência em detrimento a uma análise numérica matemática ou de simples implementação de hardware.

Sistemas simbólicos podem mudar com o tempo, mas não são sistemas propriamente dinâmicos [29].

Os primeiros registros de sucesso na utilização de sistemas especialistas em campo não ocorreram na área de engenharia e sim na da

medicina (“MYCIN”<sup>12</sup>) e da ciência laboratorial (“DENDRAL”<sup>13</sup>). Após algum tempo várias aplicações se estenderam aos domínios mais tradicionais da engenharia, hoje com ampla participação [27].

A abordagem realizada pelos sistemas especialistas visa não somente a aplicação de processos de relações matemáticas, mas incorporar processos típicos de raciocínio humano à resolução de problemas. Eles possuem a capacidade de manipular sentenças de problemas variados e integrar a essas sentenças peças relevantes provenientes de uma base de dados (como uma coleção de informações) usando técnicas de raciocínio para emular a capacidade de um especialista.

Pela sua natureza, sistemas especialistas relacionam e solucionam problemas com grande quantidade de informações associadas, diversos níveis de variação e que podem apresentar múltiplas respostas corretas ou aceitáveis [30].

Existem diversas áreas e modelos de atuação onde podemos utilizar sistemas especialistas, entre elas:

- Interpretação e Identificação → atuando na explicação de resultados possíveis a partir de uma série de informações de entrada;
- Controle → regulando e guiando a operação de uma determinada máquina, aparato ou sistema;
- Diagnóstico → identificando possíveis causas a partir de uma série de sintomas;
- Planejamento → sendo responsável pelo desenvolvimento de metodologias para a construção de algum item como meio para se atingir determinado fim;
- Projeto → configurando a atuação de determinados objetos dentro de sistemas específicos a partir de alguns limites definidos;

E por fim as duas finalidades que fazem parte do foco desse trabalho:

- Monitoramento → comparando dados ou amostras (advindos de algum elemento observador) com parâmetros estabelecidos previamente;
- Técnicas preditivas → inferindo as possíveis conseqüências para determinado evento.

---

<sup>12</sup> Criado em 1972, seu nome é advindo do sufixo *mycin*, utilizado na maioria dos antibióticos, fonte: <http://en.wikipedia.org/wiki/MYCIN>

<sup>13</sup> Criado em 1960, seu nome é advindo do *Dendritic Algorithm*, fonte: <http://en.wikipedia.org/wiki/Dendral>

Esses são apenas alguns exemplos dentro o vasto universo dos sistemas especialistas. Para esse trabalho em particular não será explorado mais a fundo esse tópico.

### 4.3. Abordagem Conexionista

A abordagem conexionista possui preceitos diferentes da simbolista. Sob a luz da Abordagem Conexionista não seria possível (ou praticamente impossível) transformar completamente algumas tarefas realizadas pela mente humana em algoritmos.

Isto é, reduzir diversas tarefas que a mente humana executa com facilidade, rapidez e perfeição (tendo como base um cérebro sadio é claro), como reconhecer imagens, compreender e traduzir línguas, evocação de memória pela associação a uma seqüência de passos lógicos e aritméticos [25].

O processo computacional associado à técnica inteligente que use a Abordagem Conexionista deve ser capaz de reproduzir a capacidade do cérebro de se auto-organizar, em termos mais simples, de aprender.

A Figura 4.3.1, a seguir, associa (de maneira a exemplificar) funções cerebrais e metodologias de técnicas inteligentes ou inteligência artificial.

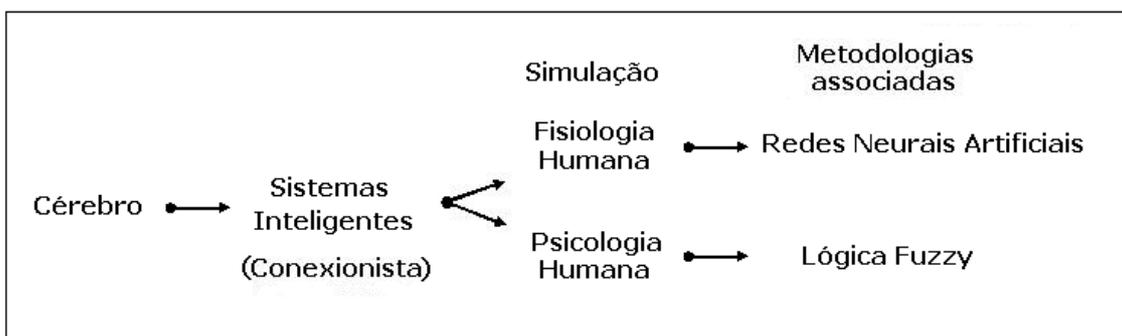


Figura 4.3.1. – Associação: Funções cerebrais X Inteligência Artificial.

Do mesmo modo que a Abordagem Simbolista, a Conexionista se divide em várias metodologias, como as mencionadas no quadro anterior.

Para esse trabalho optou-se por estudar duas metodologias, relacionadas à abordagem conexionista, em particular: As Redes Neurais Artificiais e a Lógica Difusa ou *Fuzzy*.

Redes neurais e sistemas *Fuzzy* não exigem que seja articulado um modelo matemático explícito que relacione as saídas às entradas. Eles são estimadores do grupo tipo modelagem livre (*model-free*), sistemas dinâmicos, eles podem se dizer capazes de “aprender a partir da experiência” utilizando para tal uma amostragem de dados numérica e algumas vezes até mesmo lingüística [29]. Podem ainda utilizar algoritmos numéricos capazes de converter entradas numéricas em saídas também numéricas.

É importante ressaltar que as técnicas descritas a seguir, de origem conexionista, podem ser associadas a sistemas especialistas, formando assim um modelo de inteligência artificial mais completo e dinâmico.

#### **4.3.1. Redes Neurais Artificiais - RNAs**

O objetivo original dos desenvolvedores de arquiteturas computacionais sempre foi construir um artefato (seja ele *software* ou *hardware*) capaz de simular ou emular o cérebro humano, uma grande rede interconectada de neurônios, relativamente simples, trabalhando em paralelo e em alta velocidade. Partindo desse princípio foram inspiradas as primeiras Redes Neurais Artificiais ou RNAs (ANN - *Artificial Neural Networks*).

Convencionou-se assim, chamar de Redes Neurais Artificiais toda estrutura de processamento paralelo que utiliza o conexionismo como paradigma. Talvez a característica mais importante das Redes Neurais Artificiais seja a sua capacidade de aprendizado, *i.e.*, problemas complexos em engenharia podem ser resolvidos treinando-se a rede pela apresentação do padrão de comportamento desejado [25][29].

O desenvolvimento das RNAs segue uma analogia muito próxima ao SNC (Sistema Nervoso Central) humano.

O sistema nervoso humano obtém informações, para compor seu “banco de dados”, a partir do meio ambiente através de “sensores”. Essas informações são combinadas àquelas outrora armazenadas e reagem de modo a produzir as ações do corpo humano.

Ao longo do tempo apenas uma ínfima parte das informações coletadas pelos sensores é relevante para o funcionamento do corpo humano.

Os neurônios biológicos são organizados em camadas e apesar de existirem muitas formas de conexão entre eles, observa-se um padrão de conexão seletivo e específico. Tal conexão é dita “sinapse”, o fluxo de

informações através das sinapses nervosas é feito pelo intermédio de impulsos elétricos [31].

Esse processo pode ser modelado da seguinte maneira: a partir dos diversos estímulos de entrada captados ao meio ambiente pelos sensores é realizado um processo de integração (como uma soma) que ao seu término produz um determinado impulso elétrico. Esses impulsos podem ser excitatórios (estimulantes) ou inibitórios (em forma de negativa) [25].

O modelo básico do neurônio artificial considera as diversas fontes ou entradas através da sua soma ponderada e submete esse resultado a uma função de ativação contínua com controle de saturação. Diferentemente de cérebro humano, que processa impulsos elétricos, os neurônios artificiais trabalham com informação contínua (analógica), que é mais simples.

Assim como os neurônios naturais as RNAs possuem seus neurônios artificiais (chamados “*neurons*”) organizados em camadas, processando as informações da maneira semelhante, quanto mais abstrato o conceito em questão mais profunda a camada associada a ele. Esses elementos ou unidades de processamento podem ser programados globalmente para computação de determinadas tarefas.

As RNAs classificam-se quanto a sua estrutura em três diferentes níveis, que relacionam diferentes características da rede, são eles [25]:

- Micro-estrutura - é definida pelas características de cada neurônio da rede em particular e pela sua função de ativação. Cada neurônio artificial possui um número “n” de entradas cuja soma ponderada é submetida à função de ativação para então gerar a saída específica desse neurônio.
- Meso-estrutura - relativa à organização da rede, número de neurônios por camada, número de camadas na rede e tipos de conexões associadas (alimentação para frente, para trás ou lateral).
- Macro-estrutura - referente ao número de redes, tipo de conexão entre elas, tamanho das redes, grau de conectividade, etc.

A seguir são relacionadas algumas das características, positivas e negativas, das RNAs que merecem destaque [25]:

👉 Capacidade de processamento – são massivamente paralelas e portanto bastante adequadas a simulação / implementação de processamento em paralelo.

👉 Capacidade de representação distribuída do conhecimento – o conhecimento é armazenado de forma distribuída de acordo com seu peso (quão mais abstrato mais profunda a camada que ele ocupa), o que aumenta a tolerância do sistema a falhas de neurônios individuais.

👉 Tolerância a falhas – o sistema pode ser mais tolerante a falhas de neurônios individuais que algoritmos ditos convencionais. Entretanto a rede deve ser treinada para apresentar essa característica, nem toda rede é automaticamente tolerante a falhas.

👉 Capacidade de armazenamento associativo da informação – para um determinado padrão de entrada a RNA fornece o padrão que lhe é mais próximo, ou seja, é capaz de relacionar “meio-termos”.

👉 Robustez – quando devidamente treinadas as RNAs são mais robustas no tratamento de perturbações ou dados ruidosos (padrões incompletos).

👉 O acesso é dissociado do endereçamento.

👉 A aquisição de conhecimento para a rede somente é possível através de aprendizado, ou seja, é necessário treinar a rede. É complicado introduzir a rede conhecimento prévio, principalmente devido a representação distribuída.

👉 Não é possível analisar o conhecimento, ou ainda, percorrer a função de ativação ou procedimento para solução, como é possível com os componentes de explicação de sistemas especialistas.

👉 Difícil implementação de cadeias de dedução lógica seqüencial, como em cadeias de inferência lógica.

👉 O aprendizado é lento na maioria das vezes, principalmente quando se trata de redes totalmente conectadas ou ainda àquelas que utilizam algoritmos de propagação (ou alimentação) reversa.

Como as RNAs não dependem primordialmente de modelos matemáticos para associar (estabelecer relação de dependência) as saídas de um sistema às suas entradas (estimador de modelagem livre) pode-se

relacionar a mesma arquitetura, e dinâmica, a uma grande variedade de problemas.

#### 4.3.2. Lógica Difusa ou Nebulosa (*Fuzzy*)

A teoria dos conjuntos *fuzzy* foi proposta em 1965 pelo engenheiro eletricitista e professor de Berkeley na Universidade da Califórnia Dr. Lotfi Asker Zadeh<sup>14</sup>.

Zadeh criou a lógica *fuzzy* combinando os conceitos da lógica clássica e os conjuntos de Lukasiewicz<sup>15</sup>, definindo graus de pertinência. Ele reconheceu que no mundo real as coisas podem ser freqüentemente definidas por um bit “A” e um bit “não-A”, então, ele desenvolveu uma nova teoria matemática a fim de modelar esse conceito [33].

As implementações da lógica *fuzzy* permitem que estados indeterminados possam ser tratados por dispositivos de controle, de modo a por exemplo avaliar conceitos como morno, médio, baixo, forte, longo etc.

Inicialmente Zadeh recomendou o uso da lógica *fuzzy* em detrimento da lógica convencional para aplicações que envolvessem filosofia e ciências relacionadas ao comportamento humano, posteriormente entretanto ele sugeriu seu uso para o controle de quaisquer sistemas complexos.

A lógica nebulosa ou lógica *fuzzy* é uma generalização da lógica booleana que admite valores lógicos intermediários entre a falsidade e a verdade (como o talvez). Como existem várias formas de se implementar um modelo *fuzzy*, a lógica *fuzzy* deve ser vista mais como uma área de pesquisa sobre tratamento da incerteza, ou uma família de modelos matemáticos dedicados ao tratamento da incerteza, do que uma lógica propriamente dita[32].

Apesar da lógica *fuzzy* ter sido desenvolvida a mais de 40 anos sua popularidade aumentou a partir de meados da década de 80 e nas últimas décadas tem sido usada em uma diversidade cada vez maior de produtos e aplicações. A teoria de conjuntos *fuzzy* tem sido empregada com sucesso para exprimir conhecimento impreciso e resolver problemas em muitas áreas onde a modelagem convencional é difícil, ineficiente ou onerosa [33].

---

<sup>14</sup> Lotfi Asker Zadeh (04/02/1921 - ), [http://en.wikipedia.org/wiki/Lotfi\\_Zadeh](http://en.wikipedia.org/wiki/Lotfi_Zadeh)

<sup>15</sup> Jan Lukasiewicz (21/12/1878-13/02/1956), [http://en.wikipedia.org/wiki/Jan\\_Lukasiewicz](http://en.wikipedia.org/wiki/Jan_Lukasiewicz)

Em meados dos anos 80 Mandani E.H. utilizou-se da teoria *fuzzy* para projetar controladores. A primeira incursão de Mandani na área foi com seu artigo "Applications of *Fuzzy* Algorithm for Control of Simple Dynamic Plant", de 1974 [34]. Após isso houve um grande progresso na área, em especial com muitas aplicações registradas no Japão.

Como visto na seção 4.3.1 a teoria de RNAs, em geral, envereda pelos campos da matemática relacionados com sistemas dinâmicos, controle adaptativo e levantamento estatístico. A teoria *Fuzzy* adiciona a esses campos de ação as Leis Probabilísticas, lógica matemática e a teoria das medidas [29].

A partir da lógica *fuzzy* é possível criar sistemas dedicados atribuindo variáveis lingüísticas para descrição do modelo e a partir delas criar uma base de "regras", também ditas "inferências". Expressões lingüísticas são típicas da natureza humana e do processo de tomar decisões. Por exemplo, as expressões "quente" e "máximo", relacionadas com temperatura e pressão, não significam um valor em particular, mas podem variar dentro de uma faixa considerável de valores.

Estas variáveis lingüísticas podem ser melhor descritas e manipuladas num conjunto *fuzzy* que permite incluir a imprecisão ("*fuzziness*") nos processos decisórios. A possibilidade de descrição lingüística do modelo, ao invés da utilização de equações diferenciais, possibilita o aproveitamento do conhecimento heurístico dos operadores ou especialistas e facilita o desenvolvimento de soluções.

Os sistemas *fuzzy* armazenam grupos ou conjuntos das chamadas "associações *fuzzy*" ou "regras de senso comum", eles "raciocinam" utilizando inferências associativas em paralelo. Uma única associação *fuzzy* já é suficiente para definir um sistema especialista associado com determinado evento ou grupo de eventos [29].

No instante em que se seleciona uma entrada para o sistema, definida através de um conjunto *fuzzy* dentro de determinado universo de discurso, cada uma das regras ou associações *fuzzy* são disparadas em paralelo, mantendo seus diferentes níveis de prioridade, e trabalhando juntas para deduzir uma saída ou conclusão.

As regras de controle dividem-se em duas categorias: conjuntivas e disjuntivas. Nas associações *fuzzy* que utilizam regras conjuntivas é necessário que todas as regras estejam ativas para que seja produzida uma saída *fuzzy*, enquanto que para associações com regras disjuntivas basta que uma regra esteja ativa para que aja saída no sistema.

A observação de um determinado parâmetro, e sua regulação através de sistemas *fuzzy*, pode ser realizada sob diferentes níveis para uma mesma associação *fuzzy*. Isso quer dizer que a interpretação dos parâmetros observados pode sofrer variações dependendo do nível de associação no momento. As respostas obtidas pelo sistema serão diferentes para cada nível relacionado.

A estrutura de universo de discurso proposta por Mandani e King em 1977 [35], envolvendo: variáveis lingüísticas, “*fuzzy*ificação”, banco de regras, máquina de inferência e “*desfuzzy*ificação” ; quando bem assimilada, é uma arma poderosa de simplificação e aumento da velocidade de processamento e robustez do sistema, possibilitando decisões rápidas e coerentes num ambiente de incertezas. O modelo apresentado por Mamdani define a atuação de um ou mais conjunto *fuzzy*, sob determinado grupo de regras, definindo assim um outro conjunto *fuzzy* como resultado do processo. Existem outros modelos (para *fuzzificação* e *desfuzzificação*) como o Takagi-Sugeno [36], que defini pontos únicos para a saída de uma inferência *fuzzy* (como em uma média por exemplo).

O quadro apresentado na Figura 4.3.2.1., exemplifica de maneira simples as relações lingüísticas entre atores em um sistema *fuzzy*.



Figura 4.3.2.1 – Relação lingüística entre atores *Fuzzy*.

A “Máquina de inferências” *fuzzy* segue uma seqüência de passos típicos para obter o resultado da inferência para um determinado conjunto de fatos. São eles:

- Avaliação dos fatos com premissas (antecedentes);
- Verificação do grau de compatibilidade de cada regra;
- Crença em cada regra (nível de pertinência);
- Agregação ao sistema;
- Apresentação do resultado das inferências (conseqüentes).

Uma das principais características da Lógica *fuzzy* é a capacidade de estimar funções, partindo de amostragem, da entrada a saída. Para tal são usadas amostras lingüísticas (simbólicas) ou numéricas. Em caso de avaliação de entradas numéricas faz-se necessário um processo de “*fuzzificação*”.

Em aplicações de engenharia trabalha-se primordialmente com números (variáveis como temperatura, pressão, diferença de potencial, corrente elétrica, força magnética, etc), i. é. as variáveis são contínuas e não discretas. Por outro lado as inferências *fuzzy* utilizam variáveis lingüísticas. Desse modo para que um sistema *fuzzy* seja satisfatoriamente utilizado em aplicações de engenharia é necessário converter números em variáveis lingüísticas e vice-versa. A esse processo dá-se o nome de “*fuzzyficação*” (seu dual seria a *desfuzzyficação*).

O quadro a seguir, Figura 4.3.2.2., apresenta um diagrama esquemático exemplificando o exposto.

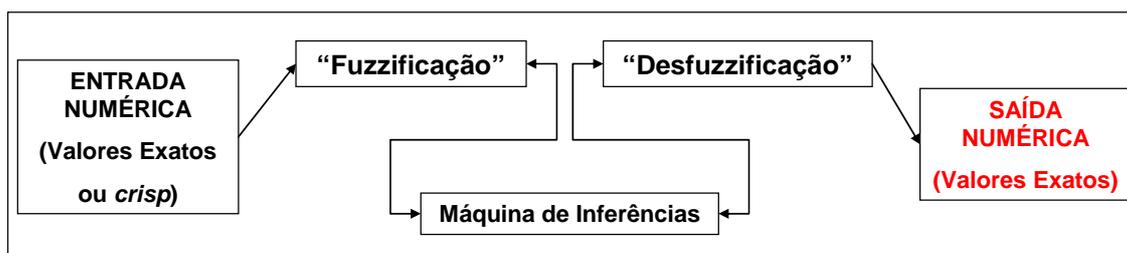


Figura 4.3.2.2. – Diagrama esquemático: fuzzificação e desfuzzificação.

Um especialista pode preferir associações simbólicas (como nos sistemas sob abordagem simbolista), enquanto um sistema *fuzzy* pode inferir e modificar adaptativamente suas associações *fuzzy* de amostras numéricas correspondentes.

Um sistema *fuzzy* adaptativo é capaz de “aprender” a controlar processos complexos (implementar controladores não-lineares) partindo de um punhado de regras básicas capazes de descrever esse processo. Especialistas podem fornecer as regras ou elas podem ser simplesmente extraídas a partir da observação do comportamento do sistema em questão [13] [37].

Observando tal fato pode-se afirmar que sistemas *fuzzy* e RNAs combinam naturalmente. O resultado dessa combinação assemelha-se a um sistema de características adaptativas com componentes sensoriais e cognitivas. Os estimadores de parâmetros advindos de RNAs encaixam-se em uma arquitetura *fuzzy* genérica. Redes Neurais acabam por providenciar e refinar associações *fuzzy* a partir de instruções de dados pré-estabelecidas.

Experiências sucessivas refinam as regras e, usualmente, melhoram a performance, assim como nosso aprendizado como seres humanos.

Todas essas propriedades relativas à estimação de funções, partindo de modelos livres adaptativos, devidamente apresentadas anteriormente, podem ser resumidas como:

“Sistemas inteligentes estimam funções contínuas adaptativamente a partir de bases de dados sem necessariamente especificar matematicamente como as saídas dependem das entradas” [29].

A lógica *fuzzy* pode ser vista como uma técnica comparativamente simples e de vasto espectro de aplicabilidade, em particular em problemas de controle e de tomada de decisões.

#### **4.4. Técnicas Inteligentes associadas a Sistemas Elétricos**

Existe uma gama bastante grande de estudos realizados ou em desenvolvimento que associam sistemas elétricos (industriais ou de potência) com técnicas inteligentes.

A utilização das chamadas técnicas inteligentes na avaliação, monitoramento, e efetivamente formando esquemas de proteção ou acompanhamento preditivo (para base de uma filosofia de manutenção ou ainda mera avaliação) de sistemas elétricos é uma realidade.

Para o escopo desse trabalho a pesquisa desenvolvida observou uma série de publicações na literatura mundial acerca de metodologias, técnicas e proposições quanto à manutenção, acompanhamento preditivo e monitoramento de máquinas síncronas, mais especificamente geradores síncronos.

Devido a grande amplitude do tema, o foco da pesquisa foi mantido sobre os sistemas e metodologias envolvendo RNAs e Lógica *Fuzzy*. Esta escolha é devida a maior ocorrência de conformidades entre as características dessas metodologias e as necessidades do trabalho. Além disso a frequência dessas metodologias em trabalhos correlatos é destaque em relação às demais.

As técnicas de detecção de falhas em máquinas síncronas concentram-se, na maioria das vezes, em avaliações distintas e focadas em detalhes. Ou seja, não há ou pelo menos não foi encontrado, trabalho nessa área capaz de avaliar como um todo as máquinas síncronas e suas diversas características

de falha. As razões para tal ficam evidentes ao se estudar as ocorrências de falhas em geradores síncronos na seção 2.1.1.

Em Penman e Jiang, H. [6] verifica-se a utilização de uma série de variáveis não características para possibilitar um determinado diagnóstico. Neste caso é feito o acompanhamento ou monitoramento do espectro harmônico da corrente de campo e partindo de um padrão pré-especificado podem-se realizar inferências de controle. Porém uma gama grande de problemas, que também podem afetar os enrolamentos da máquina, não são cobertos, reduzindo a efetividade do método.

Há uma freqüência muito grande de estudos que envolvem a detecção de falha entre espiras, tanto no enrolamento estatórico quanto rotórico. Isto ocorre devido as características dessa falha não resultarem em danos diretos à máquina, salvo em condições especiais, como no caso de uma segunda falha no enrolamento do mesmo rotor, permitindo assim a circulação de corrente à terra, como visto na seção 2.1.

O gerador síncrono pode ser exposto a uma grande variedade de condições operativas. Tais variações aliadas ao fator envelhecimento levam ao enfraquecimento do sistema de isolamento (como visto na seção 2.1.1). esse processo fatalmente levará a falhas entre espiras no interior dos enrolamentos, seja de campo ou armadura. Não há dados experimentais capazes de diferenciar falhas entre espiras de pontos fracos no isolamento. É provável que a transição entre esses dois estados se dê de maneira gradual. Um bom indicador para tal é o acompanhamento das descargas parciais que se dão no interior dos enrolamentos.

Sendo assim o diagnóstico prematuro de falhas entre espiras eliminaria danos subseqüentes às bobinas adjacentes e ao núcleo da máquina.

Entre os métodos observados que tratam de falhas entre espiras, os quais não requerem testes destrutivos ou projetos especiais, pode-se mencionar a medição da taxa de variação do fluxo de entreferro, a medição da presença de harmônicos ímpares de corrente na armadura, ou ainda a avaliação da resposta a uma onda trafegante injetada no enrolamento de campo [5].

Dando especial atenção aos métodos que usam técnicas inteligentes pode-se citar o monitoramento dos harmônicos ímpares de corrente no enrolamento de armadura de turbogeradores, causados pela assimetria gerada na força magnetomotriz do rotor, proposto por Grant em [19] e novamente

mencionado por Penman, J. e Jiang, H. em [6], dessa vez monitorando as correntes de campo da máquina.

Em [20] utiliza-se uma RNA fuzzificada para a aquisição da assinatura do sinal e conseqüente detecção, avaliação e comparação com um padrão pré-especificado de onda trafegante injetada no enrolamento de campo. Esta comparação é feita através da reflexão dessa onda, pode-se considerar esse método como uma evolução do utilizado por Grant em [19] com o advento das técnicas inteligentes.

Os trabalhos apresentados por D'Angelo em [5] e Duraisamy em [21], abordam sob óticas diferentes a detecção de espiras em curto no enrolamento de campo. Em [5], baseado na simulação digital de faltas entre espiras do enrolamento de campo de um turbo gerador, é utilizada uma RNA com um algoritmo tipo *backpropagation* para o reconhecimento dos padrões que caracterizam tais falhas. Para tal é utilizada uma análise da curva de capacidade dos geradores, que é diretamente afetada pelo aparecimento de curtos entre espiras.

No trabalho apresentado por Duraisamy em [21], temos um modelo de detecção de falhas entre espiras que usa como variáveis de acompanhamento as componentes de seqüência negativa de tensão e corrente de armadura. O modelo utiliza um sistema de detecção de falhas *fuzzy*, treinado a partir de dados obtidos de um gerador síncrono experimental em laboratório. Apresenta uma grande vantagem já que as variáveis de entrada do detector de falhas *fuzzy* (tensão e corrente de armadura) são obtidas direto da linha de saída.

Em ambos os casos ([5] e [21]) o resultado dos sistemas é o número de espiras em curto no enrolamento de campo do gerador síncrono estudado. Apesar de obter resultados favoráveis, em termos de monitoramento e manutenção baseada na condição, essas informações não são de grande valia.

Outra técnica muito interessante é a utilizada por Chow e Tan em [38], a detecção de falhas nos enrolamentos, nesse caso é realizada através do monitoramento do espectro de vibração do rotor. A partir da captura da assinatura do sinal de vibração da máquina é desenvolvida parametrização *fuzzy* para inferir e obter os resultados. O grande contratempo desse trabalho é a necessidade de sensores de altíssima fidelidade e sensibilidade para a captura do espectro de vibração. Tais equipamentos são onerosos e de difícil manutenção.

Em [31] Khorashadi-Zadeh apresenta um modelo que reúne RNA e *Fuzzy* para possibilitar o diagnóstico de falhas à terra no enrolamento estatístico de um gerador síncrono. Para esse exemplo em particular o trabalho foi todo desenvolvido sobre um modelo computacional de gerador (desenvolvido no PSCAD/EMTDC), obtendo resultados convincentes, cobrindo de 0,1% a 100% do enrolamento em cada fase e referenciado a distância ao neutro.

Essas são apenas algumas das diversas publicações pesquisadas, muitas das outras não mencionadas apresentam resultados semelhantes nessa área.

#### **4.5. Análise Crítica da Literatura**

A expectativa de que técnicas como RNA e Lógica *Fuzzy* venham a substituir as chamadas técnicas convencionais, ou ainda, aquelas baseadas na lógica convencional, não procede. Apesar de estarem se consolidando como novo paradigma quando se trata de trabalho com sistemas complexos.

O dinamismo característico as técnicas inteligentes, como *Fuzzy* e RNA, é imprescindível quando se trata da resolução de problemas na área de engenharia. O aprendizado é um aspecto fundamental na sobrevivência dos seres vivos, a possibilidade de utilizar tal característica no desenvolvimento de sistemas torna-os de antemão promissores.

A correta aplicação de metodologias com abordagem conexionista, como as apresentadas nesse trabalho, é estritamente necessária para o desenvolvimento de um sistema especialista, ou especializado, para lidar com uma determinada gama de processos. Daí a dificuldade de encontrar-se na literatura técnica especializada contemporânea trabalhos que envolvam muitos setores, ou seja, possuam abrangência capaz de diagnosticar de forma coerente qualquer falha em qualquer gerador síncrono.

Exemplificando, é comum sistemas especialistas capazes de monitorar e identificar falhas internas as espiras do enrolamento de campo (rotórico) de um gerador síncrono, como visto anteriormente, porém praticamente inviável um sistema único capaz de identificar, monitorar e diagnosticar quaisquer elemento de falha (no caso todos) nesse mesmo gerador, quiçá em qualquer gerador.

Outro senão relacionado com os sistemas especialistas é justamente a necessidade de um “especialista” para definir as regras que reflitam sua *expertise*. Não basta definir um conjunto aleatório de regras para que o sistema opere com sucesso, essas regras devem ser capazes de refletir o conhecimento matemático (não-linear) subjacente ao problema em questão.

A visão crítica dos resultados obtidos por sistemas inteligentes é fundamental para toda aplicação correlata. A validação (por grupo competente) do sistema desenvolvido é indispensável antes que o mesmo seja empregado em sua aplicação destino. Somente haverá resposta satisfatória de qualquer sistema especialista para aquelas situações que tenham sido consideradas previamente em seu desenvolvimento. O grande contratempo dos sistemas especialistas é a capacidade de lidar com padrões novos ou corrompidos.

Alternativamente tem-se os métodos propostos e baseados em RNAs (como em [2][28] por exemplo). Esses métodos, entre outros, superam alguns contratempos das abordagens dos sistemas especialistas, por outro lado, esses métodos demandam uma grande quantidade de conhecimento ou dados a ser armazenada para a máquina em questão, de modo a evitar “falsos positivos”.

O uso de RNAs tem como principal contratempo a dificuldade e custos associados a conseguir uma completa rede de dados para o treinamento da mesma. Esse contratempo é claramente verificado em [39], onde a RNA é treinada somente com geradores síncronos saudáveis e usada para identificar operação anormal produzida por uma condição de falha.

Em paralelo a isso se tem os métodos que utilizam lógica *fuzzy*, por vezes mais amigáveis e requerem uma quantidade inferior de dados para detectarem as mesmas falhas, porém demandam o desenvolvimento de um conjunto de regras específico e detalhado, o que remonta o problema dos sistemas especialistas. A lógica *fuzzy* é uma técnica comparativamente simples e de vasto espectro de aplicabilidade, em particular a problemas de controle e de auxílio na tomada de decisões.

O movimento natural tem sido unir as vantagens das técnicas baseadas em RNAs e *Fuzzy*, montando dessa maneira um sistema (de certa forma especialista) capaz de suprir as deficiências de ambas as técnicas em separado. Esse modelo é seguido em vários trabalhos estudados, como em [18] e [31], por exemplo.

A grande maioria dos trabalhos estudados gira em torno de falhas específicas, muitas vezes entre espiras, sejam do enrolamento de campo ou estatórico.

Outro aspecto interessante observado é que muitas vezes são usados modelos computacionais para o desenvolvimento dos sistemas de diagnósticos. A utilidade de modelos computacionais é restrita visto que é praticamente impossível (mesmo teoricamente) incluir no modelo todas as não “idealidades” da máquina em si. Fatores ambientais como temperatura e umidade, fatores operacionais como velocidade e corrente de campo, podem afetar a assinatura de uma falha. Tal fato acaba por restringir também o funcionamento do sistema modelado com o auxílio de técnicas inteligentes associadas.

O monitoramento em tempo real de máquinas elétricas em geral pode aumentar a confiabilidade no sistema em si e se utilizado de maneira correta reduzir os custos totais de manutenção.

Existem diversos requerimentos para que um sistema de monitoramento da condição e diagnóstico de falhas seja bem sucedido.

Primeiramente deve ser feita uma análise geral do sistema em questão, no caso desse trabalho o grupo gerador, de modo a avaliar os componentes críticos e que demandem monitoramento. Tal análise pode ser feita usando “pesos” diferentes para questões como economia, confiabilidade, disponibilidade do recurso, peças de reposição, e quaisquer outros aspectos considerados relevantes pela equipe responsável.

A partir daí deve ser feita uma apurada pesquisa acerca dos dados de manutenção, disposição dos equipamentos e características de operação.

De posse desses dados pode-se estimar uma assinatura ou ao menos características de assinatura que sejam relevantes e detectáveis. Essa é a parte mais crítica do processo, como discutido anteriormente.

Foram observados diversos exemplos de modelos que se aplicados podem ser bastante úteis na prevenção e proteção de determinadas falhas, outros nem tanto.

Dentro da proposta desse trabalho o conceito de diagnóstico de máquina através da utilização de ferramentas associadas a técnicas inteligentes fica bem estabelecido com o exposto anteriormente.

#### 4.5.1. Demais Considerações

Das diversas metodologias e estudos aqui discutidos e apresentados, podemos dividi-las em dois grupos próximos entre si. Existem aqueles que exigem uma série de modelos e amostras, para partindo daí montar a configuração de uma base de dados como [5], [11] e [28]. A maior dificuldade dos sistemas especialistas desse gênero é a de lidar com pontos fora da curva, como novas amostras, o aparecimento de novos modelos ou ainda a adulteração do modelo existente.

Por outro lado existem aquelas metodologias, geralmente baseadas em redes neurais (RNAs), como [2] e [20], superam algumas das desvantagens mencionadas para o grupo anterior. Porém esse tipo de abordagem demanda um banco de dados muito amplo para se obter respostas confiáveis acerca da máquina observada. Com isso pode-se cobrir a maioria das possibilidades, evitando-se quase completamente a ocorrência de falsos alarmes.

Como apresentado no item 2.1.1, na parte referente aos esforços de temperatura sobre o isolamento das máquinas síncronas, os dados monitorados devem possuir seletividade específica, ou seja valores e interpretações diferentes para elementos diferentes.

Mediante tal fato o monitoramento e a posterior análise dos dados coletados deve seguir critérios específicos para cada grupo de elementos / componentes dos geradores síncronos. Dessa maneira minimiza-se a possibilidade da incursão em erros de julgamento.

A escolha de uma metodologia baseada na lógica *Fuzzy*, como em [17], [18], [21] e [51], mesclada com alguma das características das redes neurais artificiais é na opinião do autor a que cobriria um universo de possibilidades mais amplo, porém, não necessariamente a mais adequada para toda e qualquer modelagem. É importante ter sempre em mente essa diferenciação.

Como mencionado anteriormente, “Sistemas *Fuzzy* armazenam bancos das chamadas “associações *fuzzy*” ou “regras de senso comum”. Uma única associação *fuzzy* já é suficiente para definir um sistema especialista associado com determinado evento ou grupo de eventos.”

A metodologia da lógica *fuzzy* é amigável (*user friendly*) e requer menor quantidade de informações para detectar as mesmas falhas.

Para que um sistema *Fuzzy* consiga obter resultados satisfatórios é imprescindível que se trabalhe com dois fatores: uma relação de regras (ou

inferências) capaz de cobrir todo o processo e o acesso a um rol de características e dados que dêem base a essas regras e seus resultados.

Sendo assim, para a proposta desse trabalho, um modelo de diagnóstico capaz de avaliar o nível de estresse ao qual está submetido um determinado enrolamento estatórico, a ferramenta disponibilizada pela lógica *fuzzy* se mostra a mais adequada. É importante observar que em caso de mudança no cenário dever-se-ia refazer essa avaliação.

Frente ao exposto, no Capítulo 5 é proposto um modelo piloto baseado em lógica *fuzzy*, para avaliação do nível de estresse ao qual estaria submetido determinado enrolamento estatórico. Futuramente esse modelo pode ser desenvolvido para um caso mais completo, modificando variáveis de entrada e expandindo as condições de contorno, de modo a torná-lo o mais genérico possível.

# Capítulo 5

## Modelagem *Fuzzy*

Como apresentado nos capítulos anteriores o diagnóstico, ou melhor, prognóstico, da condição de uma máquina seja ela síncrona ou não é sujeito a uma gama considerável de variáveis.

Definir as variáveis a serem acompanhadas, seus devidos graus de pertinência, o quão confiáveis são os dados disponíveis e até onde se deve seguir os resultados encontrados no que se refere a política de manutenção são tarefas difíceis e muitas vezes subjetivas.

Partindo dos dados estudados na seção 3.3, verificou-se que a definição das causas de falha (mesmo após a ocorrência das mesmas) é de alta complexidade, principalmente quando se expande o universo de observação.

A partir daí decidiu-se por selecionar um item específico para desenvolver esse estudo. Esse elemento deveria ter um peso considerável no universo de falhas observado para os geradores síncronos e o mais importante, possuir um certo nível de controle, ou seja, limites bem definidos que possibilitem embasar o estudo. Considerando todos os dados pesquisados e apresentados aqui, optou-se pela avaliação do enrolamento estatórico. Não por acaso, o enrolamento estatórico é personagem principal da grande maioria dos estudos acerca de diagnóstico de máquinas síncronas.

Mesmo optando por um único elemento para a realização do estudo o universo de possibilidades ainda é muito extenso, sendo assim é necessário torná-lo mais estreito de modo a facilitar a compreensão e avaliação dos resultados.

Grosso modo, o modelo desenvolvido pretende avaliar o nível de esforço sob o qual encontra-se determinado enrolamento estatórico, a partir da avaliação de algumas variáveis chave.

O modelo será desenvolvido seguindo os preceitos da lógica *fuzzy*, ferramenta considerada a mais adequada para a ocasião. A seleção das variáveis de entrada e saída e a conseqüente atribuição de valores lingüísticos às mesmas permite, em princípio, que a modelagem seja usada para qualquer gerador síncrono, de modo a tornar a avaliação o mais abrangente possível. No entanto é fundamental observar que tal “generalização”, por assim dizer, não é recomendada pois poderia influir de maneira negativa nos resultados do modelo.

Como esse é um estudo teórico, porém com compromisso de se manter o mais próximo possível da realidade das empresas brasileiras, optou-se por usar variáveis não somente passíveis de monitoramento mas que as empresas possuam a prática de monitorá-las em suas políticas de manutenção.

### **5.1. Definição dos esforços envolvidos**

É muito difícil quantificar de forma exata o quão abalado se encontra determinado enrolamento estatórico após a ação de algum elemento agressivo, ou ainda, o quão estressado deve estar esse enrolamento a ponto de falhar sob condições normais de operação. A definição dessa fronteira, o limiar de operação normal / estado de falha é definitivamente uma área nebulosa. Sendo assim, nada mais apropriado para se estudar uma área nebulosa que a Lógica *Fuzzy*.

O principio básico da Lógica *Fuzzy* consiste em definir variáveis e regras de modo lingüístico que se apliquem adequadamente ao caso estudado, para a partir daí montar associações e obter um resultado. Seguindo esse raciocínio serão definidas variáveis de entrada para embasar a utilização dos preceitos da Lógica *Fuzzy*. Como desejado a variável de saída para esse estudo será justamente o nível de estresse a que o enrolamento observado está submetido no momento da avaliação.

Nesse caso as variáveis de entrada são indicadores e alguns dos atores que geram esforços sobre o enrolamento estatórico, incrementando seu nível de estresse e conseqüentemente reduzindo sua vida útil.

### **5.2. Condições de contorno para o modelo**

É importante observar que esse modelo avalia somente o efeito das variáveis de entrada, não considerando nenhum dos outros vários fatores que

afetam o estresse sobre os enrolamentos estatóricos. Apesar disso a contribuição da ferramenta desenvolvida pode ser considerada importante já que as variáveis de entrada selecionadas são de grande peso.

Como a análise de ocorrências apresentada aqui foi realizada tendo como universo de amostragem os hidrogeradores de Furnas, considerou-se para esse modelo o mesmo universo, ou seja, geradores síncronos de pólos salientes, associados a usinas hidrelétricas e com uma faixa de potência entre os 50 e 450 MW.

De modo a mensurar o nível de estresse sobre os enrolamentos os esforços atuantes considerados devem ser contínuos, ou seja, aparições pontuais não são consideradas para contribuição sobre o nível de estresse do enrolamento, salvo em circunstâncias especiais.

É necessário um sistema de monitoramento capaz de entregar ao modelo os dados de entrada requeridos, ou seja, as variáveis de entradas consideradas devem ser monitoradas periodicamente. Caso não seja possível dispor desses dados é necessário atribuir valores às variáveis de entrada condizentes com o estado da máquina sob avaliação. Para tal recomenda-se a utilização de resultados de ensaios dielétricos e relatórios de inspeção como base de informações para o modelo.

O estudo considera um enrolamento com classe de isolamento F e segue os preceitos para definição de vida útil apresentados na Tabela 3.1. Não são considerados os efeitos de possíveis ocorrências relacionadas a esses enrolamentos. Ocorrências, como falhas à terra ou entre fases, mesmo quando reparadas da maneira devida podem reduzir de maneira considerável a vida útil desse enrolamento já que compromete a qualidade das bobinas não envolvidas nas falhas. Tais incursões nas unidades tornariam menos efetivos os dados históricos da máquina quanto a seus índices de manutenção.

Além disso considera-se que não houve nenhum tipo de intervenção no que tange ao enrolamento propriamente dito, seja de manutenção ou qualquer outra espécie que não inspeção visual somente.

O conceito de idade do enrolamento pressupõe determinadas características que podem variar de acordo com uma série de fatores, como o modo de operação e possíveis ocorrências associadas a uma determinada máquina. O regime de operação considerado é o de geração na base (*base load*). É de grande importância essa condição de contorno, já que estudos do IEEE estimam que cada ciclo de partida – parada de uma unidade geradora reduz sua vida útil em aproximadamente 10 horas [13].

Como mencionado anteriormente esse estudo em particular considerou uma unidade geradora com isolamento classe F, sem registros prévios de ocorrências vultosas.

### 5.3. Atribuição de valores lingüísticos

A Figura 5.3.1. apresenta um diagrama simplificado do modelo em questão.

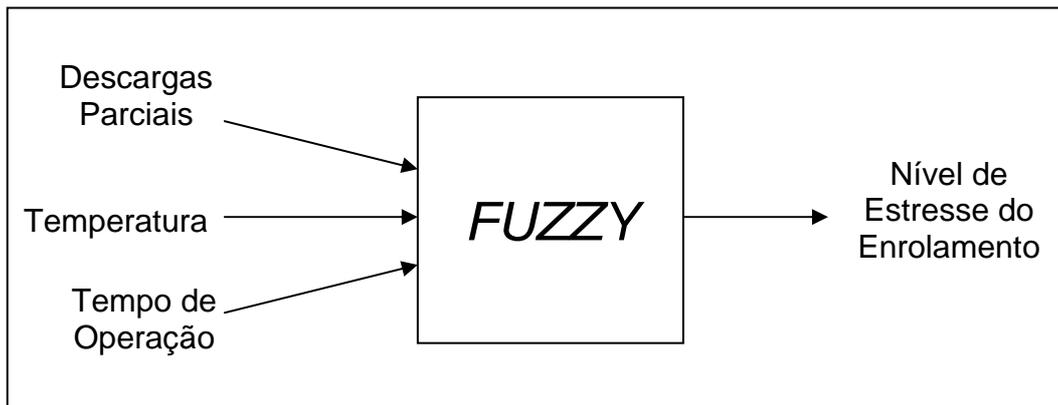


Figura 5.3.1 – Esquema do modelo *Fuzzy* implementado.

Cada uma das variáveis envolvidas no modelo segue uma sistemática própria de definição, porém sob a mesma forma. Cada variável define um conjunto *Fuzzy* “F”, formado por uma série de subconjuntos de pares ordenados. Cada par ordenado é representado por uma variável “x”, pertencente ao universo de discurso “U” e sua correspondente função de pertinência “ $\mu(x)$ ” [41]. Essa relação é apresentada em (9).

$$F = \{x, \mu_F(x) \mid x \in [U]\} ; \quad (9)$$

O universo de discurso, “U”, utilizado nesse trabalho é peculiar a cada variável, porém é sempre contínuo de modo que os conjuntos *Fuzzy* associados podem ser descritos como em (10).

$$F = \left\{ \int_U \frac{\mu_F(x)}{x} \right\} ; \quad (10)$$

Os valores especificados para cada um dos universos de discurso (assim como os valores suporte de cada um dos subconjuntos associados) foram definidos após consenso entre os especialistas. Apesar de diferir em termos de valores todos eles possuem uma característica em comum, quanto maior seu valor numérico (entrada exata ou *crisp*) maior seu fator de degradação para o isolamento do enrolamento estatórico. Dentro de uma mesma escala de referência um valor 10 seria extremamente danoso, enquanto um valor zero irrelevante.

Todos os conjuntos definidos nesse trabalho são ditos Conjuntos *Fuzzy* Completos, ou seja, para todo “x” pertencente a [X] (sendo [X] um conjunto *Fuzzy* qualquer) existe um subconjunto [A], tal que  $\mu_A(x) > 0$  [41].

### 5.3.1. Variável de Saída ou “Conseqüente”

Para o modelo estudado o conseqüente do sistema *fuzzy* deve ser o nível de estresse associado ao enrolamento estatórico estudado. Em termos lingüísticos pode-se definir esse nível de estresse sobre o enrolamento estatórico da seguinte maneira:

- Nível Baixo – nesse nível os esforços atuantes sobre o enrolamento em questão são responsáveis por um pequeno decréscimo na vida útil desse elemento e não o compromete para operação sob condições normais ou de emergência.
- Nível Moderado – para essa condição passa a haver uma pequena possibilidade de falha sob operação normal em médio / longo prazo. Além disso a contínua operação sob tais condições reduz de maneira sensível a vida útil desse enrolamento.
- Nível Alto – ao operarmos a máquina sob esse nível de estresse associado ao enrolamento estatórico espera-se uma redução considerável na vida útil estimada para o mesmo. Ainda sob tais condições, uma falha em operação normal pode ser estimada para curto ou médio prazos.
- Nível Muito Alto – alerta vermelho ! Sob tais condições de operação a redução na vida útil desse enrolamento é drástica. Se mantida, ou seja, a operação sob tais condições for de forma continuada uma falha pode ser considerada iminente.

### 5.3.2. Variáveis de Entrada ou “Antecedentes”

Para esse modelo optou-se por selecionar apenas três variáveis de entrada, fazendo o papel dos atores responsáveis pelos esforços sobre o enrolamento estatórico. Elas foram selecionadas por sua importância e pelo fato de agregarem a contribuição de outros agentes importantes, como é o caso das Descargas Parciais. Para esse trabalho não será demonstrado o funcionamento das Descargas Parciais ou de qualquer outro mecanismo associado a falhas aqui mencionado. Sua seleção foi baseada em conhecimentos técnicos da equipe de Furnas e na literatura internacional. Nas referências bibliográficas associadas a cada um dos itens pode-se encontrar maiores detalhes.

Essas variáveis são as Descargas Parciais (DP), subdivididas em Frequência de Descargas Parciais (DPF), Amplitude dos pulsos das descargas (DPA), taxa de variação das descargas entre medições (DPTX); a temperatura dos enrolamentos estatóricos (TEMP); e o tempo de operação desses enrolamentos (IDADE).

A seguir são descritos em pormenores esses elementos e seus efeitos:

**DP<sup>16</sup>** - A presença de DP, detectadas em alta frequência, com pulsos de grande amplitude ou ambos, é um forte indício de que o enrolamento ao qual essas descargas estão associadas encontra-se sob condições ruins, ou seja, alto nível de estresse do sistema de isolamento e conseqüente alta probabilidade de falha (que aumenta se agregados outros fatores). Apesar de não ser um agente propriamente dito no que tange aos esforços no enrolamento, as DP são conseqüência da ação de uma série desses agentes, como vibração nas bobinas ou barras, falhas na camada de tinta semicondutiva ou problemas na impregnação do verniz, apenas para citar alguns deles. Desse modo, para esse estudo em particular o monitoramento das DP fornece um ótimo indicador do nível de estresse dos enrolamentos estatóricos.

Existem diversas configurações nas quais as DP podem se apresentar, cada uma delas associada a uma ou mais características negativas (ou nenhuma delas). Por exemplo, a presença de muitos pulsos de DP (alta frequência de descargas) pode ser caracterizada pelo fato de a impregnação e/ou processo de cura do verniz do sistema de isolamento não ter sido bem feito,

---

<sup>16</sup> Referências associadas - [14][15][42][57][58][49][51][47]

permitindo assim a formação de pequenas “bolhas de ar” em profusão, que acabam por originar tais descargas. Por outro lado a presença de descargas com alta amplitude evidencia que as bolhas de ar presentes são de maior diâmetro, podendo ser causadas por excesso de vibração, processo mal feito de selagem do isolamento ou ainda falhas de fabricação. Tais espaços vazios com maior diâmetro demandam ação mais rápida visto que sua presença pode originar falhas mais severas. Outra questão importante é a taxa de variação de DP. Caso durante uma medição de rotina (recomenda-se o acompanhamento semestral) o resultado seja muito superior aos dados colhidos na medição anterior a deterioração do sistema de isolamento é evidente e demanda acompanhamento dedicado. Para esse estudo entende-se que são realizadas medições periódicas, on-line e com espaçamento entre medições de 6 meses a 1 ano.

**TEMPERATURA**<sup>17</sup> - As máquinas síncronas possuem uma característica de operação que as permite trabalhar com capacidade inferior ou superior aos seus valores nominais, ou seja despachar mais ou menos potência de acordo com sua curva de capacidade [1]. Geralmente em projeto definem-se limites conservadores, com boa margem de folga, para os elementos físicos de modo a explorar positivamente essas características operacionais. Porém não há bônus sem ônus. Ao se operar uma máquina síncrona sob condições nas quais a temperatura dos enrolamentos estáticos permaneça com valores superiores aos nominais essa operação incorre em significativa redução na vida útil desses enrolamentos. Grosso modo, para cada 10°C acima da temperatura nominal da unidade a vida útil dos enrolamentos estáticos é reduzida pela metade. Esse fator pode mensurar a importância do acompanhamento preditivo da temperatura do enrolamento de armadura e sua importância para esse estudo de caso. É importante ressaltar que ao falar-se em diminuição da vida útil da máquina, não estão sendo consideradas as temperaturas elevadas tais que o material isolante se queime e seja destruído repentinamente, mesmo porque essas temperaturas são proibitivas, ativando o sistema de proteção da unidade geradora. A vida útil da isolação em termos de temperatura de trabalho, bem abaixo daquela em que o material se queime, refere-se ao envelhecimento gradual do isolante, que vai se tornando ressecado, perdendo o poder isolante, até que não suporte mais a tensão

---

<sup>17</sup> Referências associadas - [12][13][14][42]

aplicada e produz o curto-circuito. Como muitos dos dados aqui expostos são advindos de Furnas Centrais Elétricas cabe lembrar que mesmo as unidades mais novas, que possuem isolamento classe F (limite em 155°C) são projetadas para trabalhar com níveis de temperatura de classe B (limite em 130°C), ou seja, sempre com uma margem de segurança bastante grande. A temperatura estatórica pode ser acompanhada constantemente através de mostradores na unidade ou do sistema supervisorio, que armazena valores dentro de faixas pré-estabelecidas. Desse modo somente serão gravados dados de maior relevância.

**TEMPO DE OPERAÇÃO**<sup>18</sup> - Como qualquer outro bem durável os enrolamentos estatóricos (e seus sistemas de isolamento) possuem uma vida útil e quanto mais próximos do fim dessa vida útil maiores os efeitos dos agentes nocivos a esse sistema. Assim sendo um agente que teria como consequência um nível de estresse baixo para um enrolamento relativamente novo pode ser catastrófico para um enrolamento em uso já há bastante tempo. Em contrapartida alguns fatores deixam de ser tão representativos, em um enrolamento com mais de 100.000 horas de operação é razoável que se encontre um nível de DPF relativamente alto, sem que necessariamente esse enrolamento esteja mais deteriorado ou mais próximo de uma falha. Alguns grandes fabricantes de Máquinas, como a Siemens e a ABB, recomendam que as unidades sejam re-enroladas (*refurbishment*) a partir de 100.000 h de operação. Pela experiência de operação de Furnas Centrais Elétricas esse número verificou-se deveras conservador, basta lembrar que a unidade 1 da Usina Marechal Mascarenhas de Moraes está em operação há aproximadamente 50 anos e nunca registrou uma falha sequer no enrolamento estatórico. O universo de discurso associado a essa variável prevê uma vida útil média de 350 a 500 mil horas de operação (Tabela 3.1.).

#### **5.4. Construção das funções de pertinência**

Não havendo, a priori, nada que justifique a utilização de funções complexas, para esse estudo optou-se por utilizar modelos matematicamente simples de funções de pertinência, e adequá-los da melhor maneira possível as variáveis [25][41]. Foram usadas as funções triangular (*trimf*) e trapezoidal

---

<sup>18</sup> Referências associadas - [10][12][13][14][22][48]

(trapmf) (Figura 5.4.1.). Tais funções de pertinência podem variar em sua forma, de acordo com os exemplos mostrados na Figura 5.4.2.

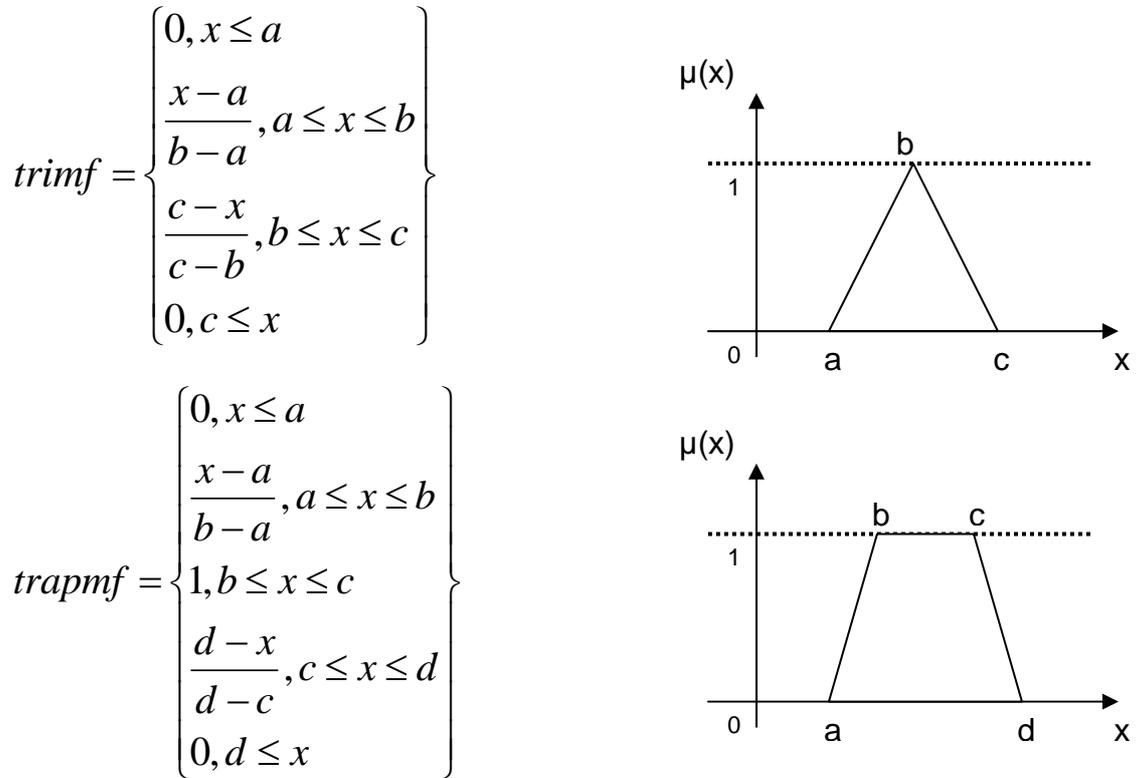


Figura 5.4.1 – Funções de pertinência *Fuzzy*; a) triangular, b) trapezoidal.

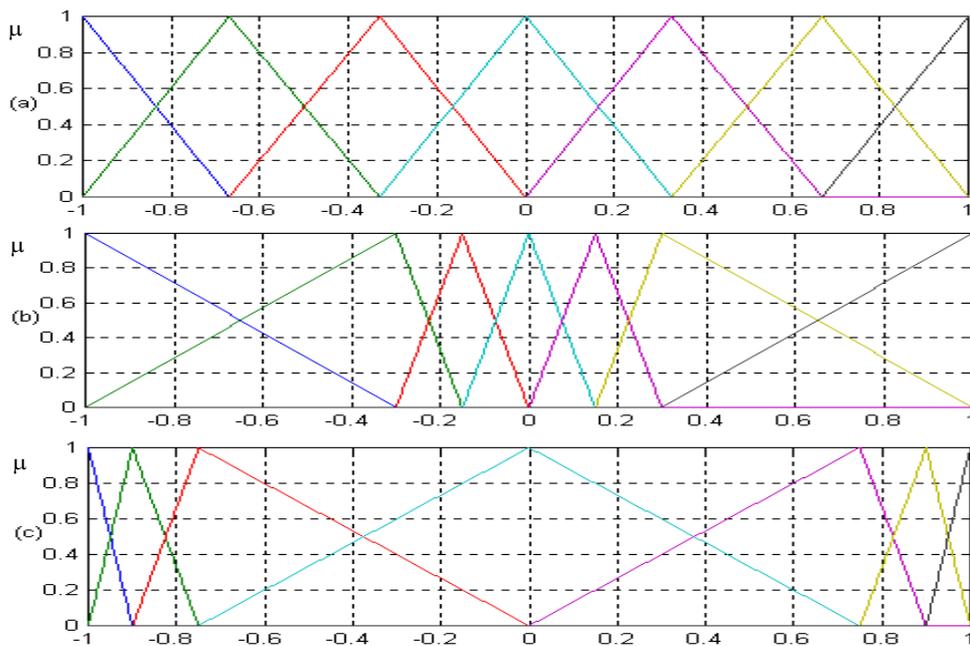


Figura 5.4.2 – Exemplos de variação de funções de pertinência triangulares [51].

Como operadores lógicos para associar os conjunto *Fuzzy* foram utilizados “OR” e “AND”, que em termos *Fuzzy* representam, respectivamente, uma norma S (união, representado por  $\oplus$ ) e uma norma T (interseção, representado por  $*$ ). O operador “AND” foi usado representando uma função mínimo e o operador “OR” uma função máximo. Em (11) e (12) apresentam-se respectivamente as relações para os operadores “OR” e “AND”[41] [51].

$$\mu_{A \cup B}(x) = \max[\mu_A(x), \mu_B(x)] \rightarrow (A)OR(B); \quad (11)$$

$$\mu_{A \cap B}(x) = \min[\mu_A(x), \mu_B(x)] \rightarrow (A)AND(B); \quad (12)$$

Cada um dos subconjuntos *Fuzzy* (9) relacionados às associações entre as variáveis e suas funções de pertinência foi construído de maneira singular, ou seja, com características particulares. Usando como base as funções triangular e trapezoidal (Figura 5.4.1.) foi desenvolvida para cada subconjunto de cada variável uma relação de pertinência. Para tal foi utilizado o conhecimento técnico acerca dos valores de maior importância em cada subconjunto (coração) e a variação dessa importância de acordo com seu deslocamento para ambos os lados no eixo das abscissas, de modo a configurar os conjuntos completos.

O desenho esquemático apresentado na Figura 5.4.3. representa a metodologia utilizada para a construção de cada um dos subconjuntos utilizados no modelo.

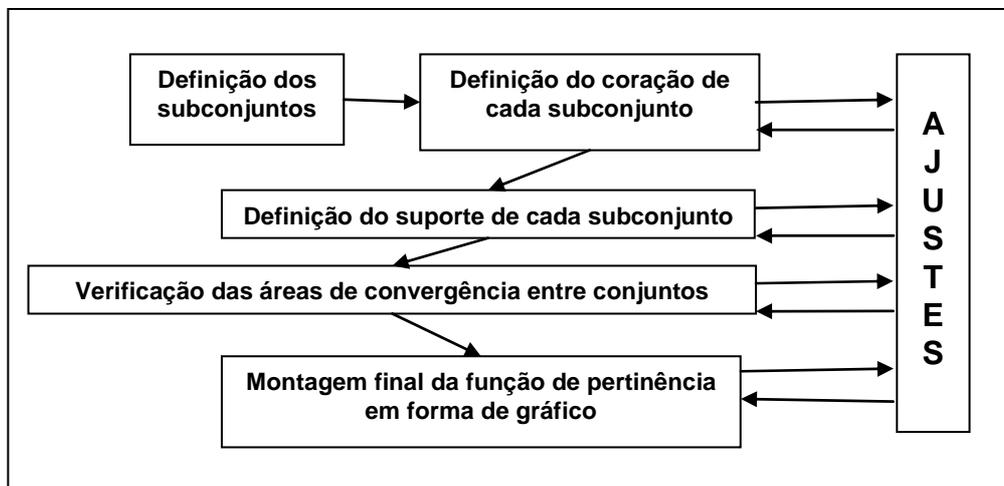


Figura 5.4.3 – Esquema de construção das funções de pertinência.

Definição dos subconjuntos *Fuzzy* e das funções de pertinência para cada uma das variáveis do modelo:

**ESTRESSE** » variável de saída do modelo, representa o efeito produzido pela ação dos esforços submetidos ao enrolamento estatórico e uma leitura dos indicadores utilizados como variáveis de entrada. O Nível de Estresse do enrolamento estatórico é um indicador importante para avaliar sua vida útil e as probabilidades de falha desse enrolamento. Seu universo de discurso foi selecionado de modo a representar um percentual, variando assim de 0 a 100%. O conjunto *Fuzzy* para “ESTRESSE” é formado por quatro subconjuntos relacionando a variável “x” e sua respectiva função de pertinência, são eles: “BAIXO”, “MODERADO”, “ALTO” e “MUITO ALTO”; que são apresentados na Figura 5.4.4. As equações (13) e (14) definem o conjunto *Fuzzy* para “ESTRESSE”.

$$ESTRESSE = \{BAIXO, MODERADO, ALTO, MUITO..ALTO\}; \quad (13)$$

$$ESTRESSE = \{x, \mu_{ESTRESSE}(x) / x \in [0,100]\}; \quad (14)$$

Tabela 5.4.1. – Definição do conjunto *Fuzzy* - ESTRESSE

CONJUNTO FUZZY – “ESTRESSE”			
Subconjunto	Suporte	Coração	Descrição
BAIXO	[0,40]	0	pequeno decréscimo na vida útil do enrolamento, normal;
MODERADO	[10,70]	40	nível moderado, maior redução da vida útil, surge a possibilidade de falha em médio / longo prazo;
ALTO	[40,100]	60	redução considerável na vida útil, possibilidade de falha em curto / médio prazo;
MUITO ALTO	[70,100]	100	alerta vermelho.

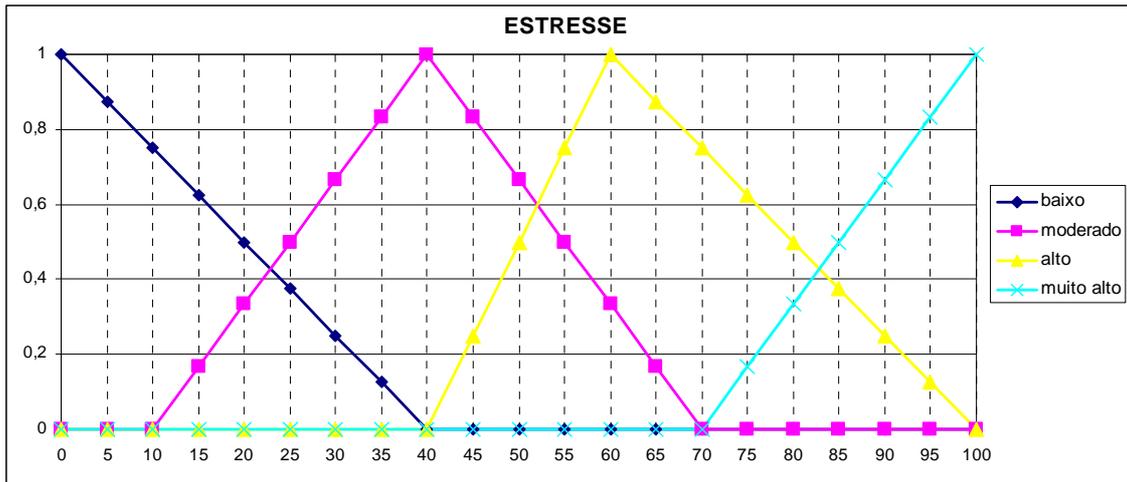


Figura 5.4.4 – Conjunto Fuzzy “ESTRESSE”.

**DPF** » nível da frequência de Descargas Parciais registradas, no período de monitoramento. Seu universo de discurso foi selecionado de modo a representar uma variação contínua de 0 a 10. O conjunto Fuzzy para “DPF” é formado por quatro subconjuntos relacionando a variável “x” e sua respectiva função de pertinência, são eles: “MUITO BAIXO”, “BAIXO”, “ALTO” e “MUITO ALTO”; que são apresentados na Figura 5.4.5. As equações (15) e (16) definem o conjunto Fuzzy para “DPF”.

$$DPF = \{MUITO\ BAIXO, BAIXO, ALTO, MUITO\ ALTO\}; \quad (15)$$

$$DPF = \{x, \mu_{DPF}(x) \ / x \in [0,10]\}; \quad (16)$$

Tabela 5.4.2. – Definição do conjunto Fuzzy - DPF

CONJUNTO FUZZY – “DPF”			
Subconjunto	Suporte	Coração	Descrição
MUITO BAIXO	[0,3.5]	0	praticamente nulo
BAIXO	[0.5,6.5]	4,0	considerado normal para a maioria das máquinas
ALTO	[4,9.5]	6,5	cuidados podendo gerar problemas em curto prazo
MUITO ALTO	[7,10]	10	demanda providências como monitoramento constante com baixos intervalos pode ser indicativo de falha iminente

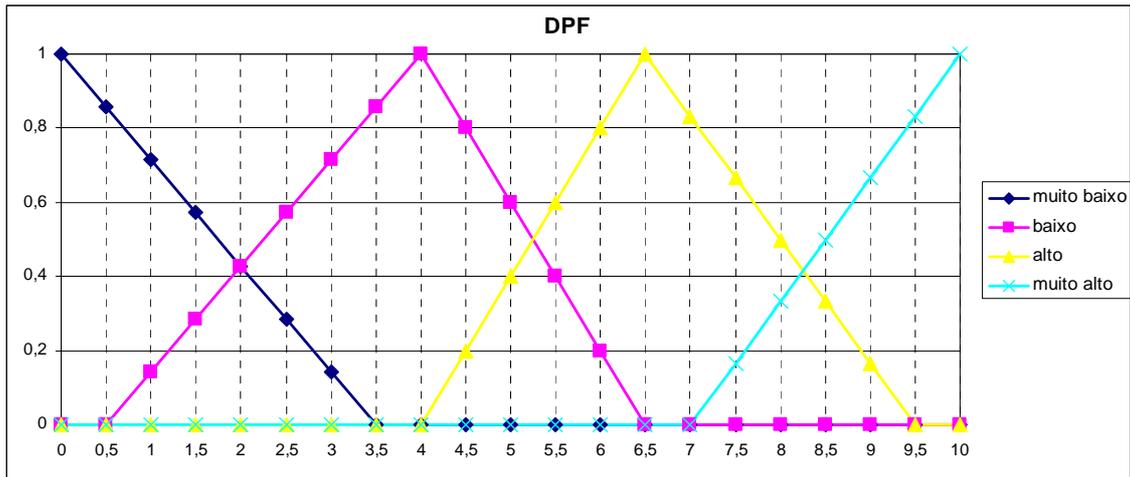


Figura 5.4.5 – Conjunto Fuzzy “DPF”.

**DPA** » fator relacionado à amplitude dos pulsos de Descargas Parciais registrados. Seu universo de discurso foi selecionado de modo a representar uma variação contínua de 0 a 10. O conjunto Fuzzy para “DPA” é formado por quatro subconjuntos relacionando a variável “x” e sua respectiva função de pertinência, são eles: “MUITO BAIXO”, “BAIXO”, “ALTO” e “MUITO ALTO”; que são apresentados na Figura 5.4.6. As equações (17) e (18) definem o conjunto Fuzzy para “DPA”.

$$DPA = \{MUITO\ BAIXO, BAIXO, ALTO, MUITO\ ALTO\}; \quad (17)$$

$$DPA = \{x, \mu_{DPA}(x) \mid x \in [0,10]\}; \quad (18)$$

Tabela 5.4.3. – Definição do conjunto Fuzzy – DPA.

CONJUNTO FUZZY – “DPA”			
Subconjunto	Suporte	Coração	Descrição
MUITO BAIXO	[0,3]	0	presente em praticamente todas as máquinas de AT
BAIXO	[0.5,6.5]	2,5	passa a se destacar e pode representar problemas futuros
ALTO	[3.5,10]	6,5	forte indicador de problemas requer cuidados
MUITO ALTO	[7,10]	10	alerta vermelho possível falha iminente

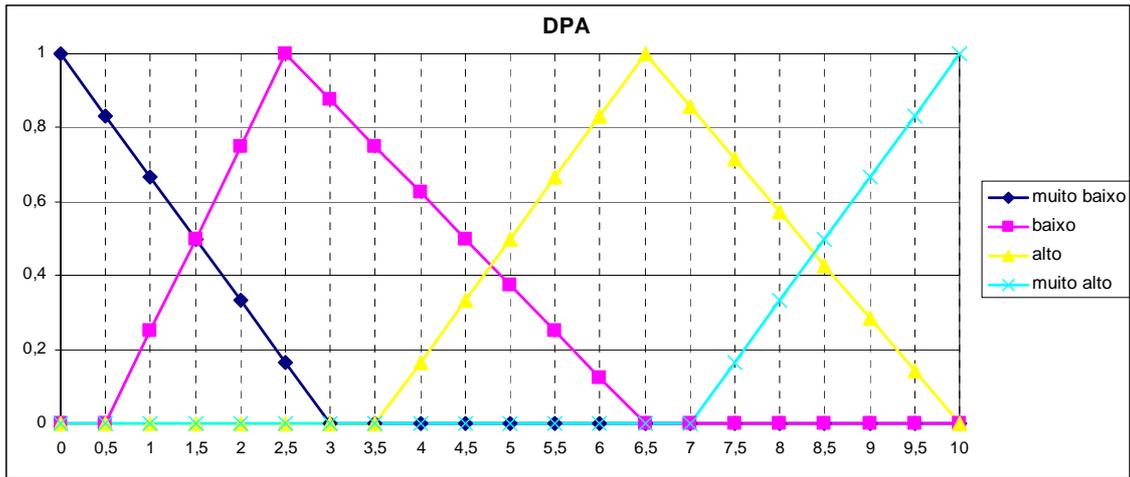


Figura 5.4.6 – Conjunto Fuzzy “DPA”.

**TXDP** » relaciona a taxa de variação entre os níveis de DP medidos na última medição e na anterior a essa (n e n-1). Seu universo de discurso foi selecionado de modo a representar uma variação contínua de 0 a 10. O conjunto Fuzzy para “TXDP” é formado por quatro subconjuntos relacionando a variável “x” e sua respectiva função de pertinência, são eles: “NEGATIVA”, “NULA”, “POSITIVA” e “MUITO POSITIVA”; que são apresentados na Figura 5.4.7. As equações (19) e (20) definem o conjunto Fuzzy para “TXDP”.

$$TXDP = \{NEGATIVA, NULA, POSITIVA, MUITO POSITIVA\}; \quad (19)$$

$$TXDP = \{x, \mu_{TXDP}(x) \mid x \in [0,10]\}; \quad (20)$$

Tabela 5.4.4. – Definição do conjunto Fuzzy – TXDP.

CONJUNTO FUZZY – “TXDP”			
Subconjunto	Suporte	Coração	Descrição
NEGATIVA	[0,3]	0	registra pequeno decréscimo
NULA	[0.5,6.5]	3,5	níveis mantidos constantes ou muito próximos disso
POSITIVA	[3.5,9.5]	7,5	aumento moderado de até 50% ou 70% nos níveis anteriores
MUITO POSITIVA	[7,10]	10	aumentos consideráveis superiores a 50% com relação aos níveis anteriores

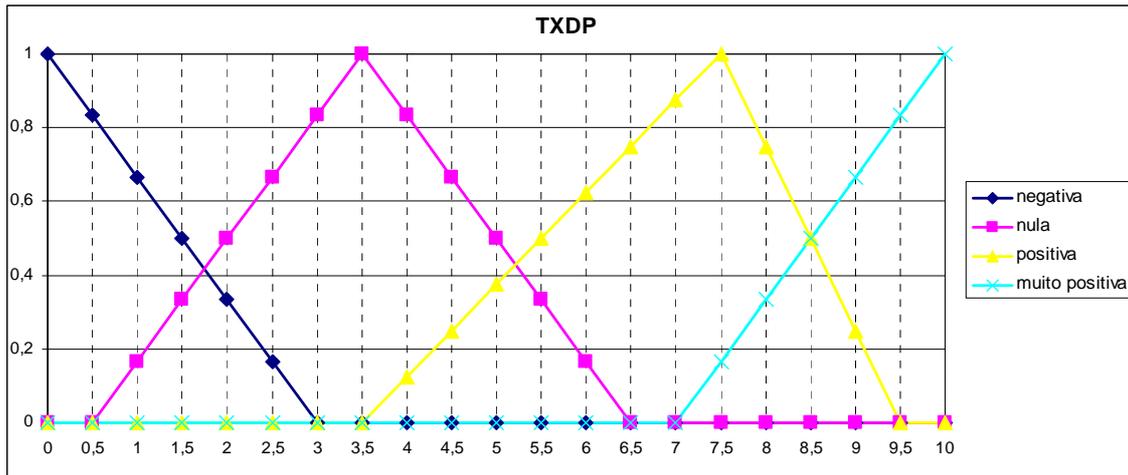


Figura 5.4.7 – Conjunto Fuzzy "TXDP".

**TEMP** » medição dos níveis de temperatura do enrolamento estático. Seu universo de discurso foi selecionado de modo a representar uma variação contínua de 0 a 10. O conjunto Fuzzy para "TEMP" é formado por três subconjuntos relacionando a variável "x" e sua respectiva função de pertinência, são eles: "BAIXA", "NORMAL" e "ALTA"; que são apresentados na Figura 5.4.8. As equações (21) e (22) definem o conjunto Fuzzy para "TEMP".

$$TEMP = \{BAIXA, NORMAL, ALTA\}; \tag{21}$$

$$TEMP = \{x, \mu_{TEMP}(x) \mid x \in [0,10]\}; \tag{22}$$

Tabela 5.4.5. – Definição do conjunto Fuzzy – TEMP.

CONJUNTO FUZZY – "TEMP"			
Subconjunto	Suporte	Coração	Descrição
BAIXA	[0,4]	[0,1]	aquém dos valores de projeto ou da classe de isolamento, inofensiva
NORMAL	[1, 9]	5	níveis em torno da temperatura de projeto ou da classe de isolamento, porém nunca excede tais valores por períodos de tempo longos ou médios, somente muito curtos
ALTA	[6,10]	[9,10]	situada na faixa de até 10°C acima da temperatura nominal do enrolamento. Se mantida de forma continuada ocasiona tremendo esforço sobre o enrolamento estático e conseqüentemente elevados níveis de estresse

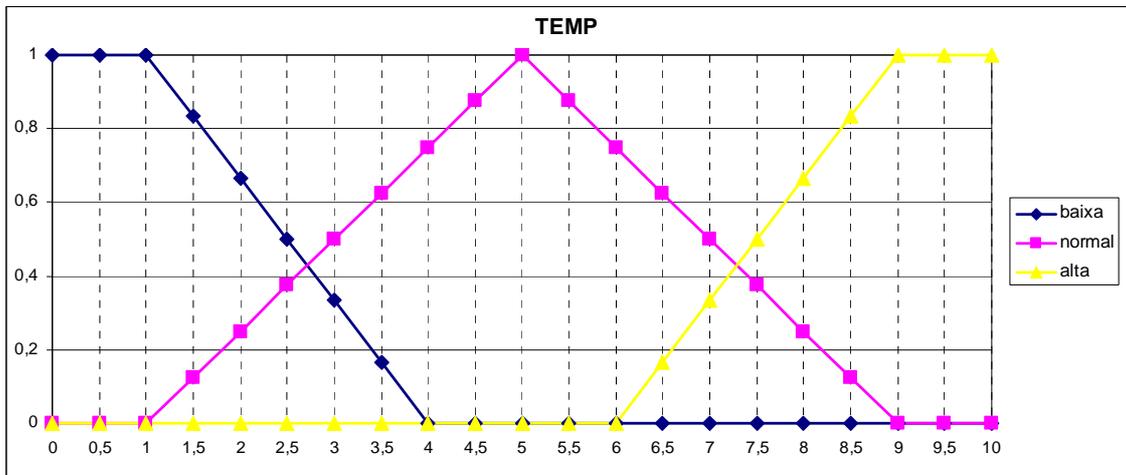


Figura 5.4.8 – Conjunto Fuzzy "TEMP".

**IDADE** » representa o tempo de operação da unidade até o momento. Seu universo de discurso foi selecionado de modo a representar uma variação contínua de 0 a 10. O conjunto Fuzzy para "IDADE" é formado por quatro subconjuntos relacionando a variável "x" e sua respectiva função de pertinência, são eles: "NOVO", "MADURO", "VELHO" e "MUITO VELHO"; que são apresentados na Figura 5.4.9. As equações (23) e (24) definem o conjunto Fuzzy para "IDADE".

$$IDADE = \{NOVO, MADURO, VELHO, MUITO \cdot VELHO\}; \quad (23)$$

$$IDADE = \{x, \mu_{IDADE}(x) \mid x \in [0,10]\}; \quad (24)$$

Tabela 5.4.6. – Definição do conjunto Fuzzy – IDADE.

CONJUNTO FUZZY – "IDADE"			
Subconjunto	Suporte	Coração	Descrição
NOVO	[0,4]	[0,1]	Comissionado e em operação há algumas dezenas de milhares de horas
MADURO	[1,7]	4,5	Aproximando-se da metade da sua vida útil
VELHO	[4,10]	6	Operação entre o segundo e o terceiro <i>quartio</i> de sua vida útil
MUITO VELHO	[7,10]	10	Operação no quarto <i>quartio</i> de sua vida útil

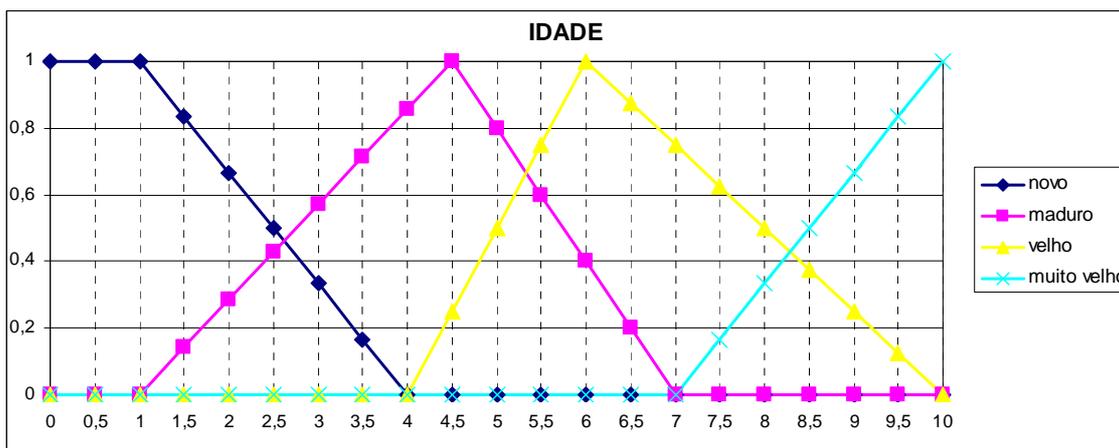


Figura 5.4.9 – Conjunto Fuzzy "IDADE".

### 5.5. Definição das Regras Lógicas

A partir da experiência das equipes de manutenção de Furnas Centrais Elétricas e conhecimentos obtidos através da literatura contemporânea pode-se montar as seguintes regras de conduta, relacionando as variáveis de entrada listadas anteriormente e o nível de estresse submetido ao enrolamento estático:

- ao se operar a unidade geradora com temperatura estática elevada (perto dos 10°C acima da temperatura nominal de operação do sistema de isolamento, 155°C para isolamentos classe F) o nível de estresse submetido ao enrolamento é bastante alto, independente dos demais fatores. Seguindo esse raciocínio para operação sob baixas temperaturas, desde que o nível de DPF e DPA seja baixo ou muito baixo o nível de estresse associado é baixo.
- ao se detectar altos níveis de DP (DPF e DPA) pode-se afirmar que esse enrolamento está sob grande nível de estresse e quanto maior os níveis de DP maior esse estresse, conseqüentemente maior a probabilidade de falhas associadas. Sendo assim para DPF e DPA altos o nível de estresse também será alto, a única exceção a essa regra é para o caso de se tratar de enrolamentos velhos ou muito velhos, nesse caso o estresse relacionado seria apenas moderado. Caso medições anteriores verifiquem uma taxa de variação da DP constante, ou até mesmo negativa, apesar do estresse

moderado infligido ao enrolamento a possibilidade de falha seria muito baixa dado o histórico da máquina de altos níveis de DP.

- em caso de uma variação pertinente dos níveis detectados de DP (acréscimos de 50 a 200% entre medições, como por exemplo de negativa para positiva ou muito positiva), sob qualquer esquema de operação, é necessário avaliação cuidadosa. Tal variação pode significar falha iminente, levando em consideração o elevado nível de estresse para o enrolamento associado a essas variações. Para esse caso de análise não há qualquer influência do tempo de operação da unidade em questão.

- altos níveis de DP em enrolamentos novos e que trabalhem na maior parte do tempo sob temperatura normal indicam problemas com esses enrolamentos e conseqüentemente demandam maior rigor no acompanhamento. Sob tais condições pode-se dizer que o nível de estresse associado a esse enrolamento é alto.

- para o caso de registro de alta freqüência de DP porém com pulsos de baixa amplitude (DPF alto e DPA baixo ou muito baixo) o estresse associado seria apenas moderado, não indicando falha iminente.

- a presença de baixas taxas de variação nos níveis de descargas parciais indica que o enrolamento associado está estável, não há incremento no seu nível de estresse.

Uma vez definidas as regras de inferência, as variáveis de entrada e saída, assim como suas respectivas funções de pertinência, pode-se então partir para a simulação dos possíveis resultados.

A Tabela 5.5.1. relaciona de maneira “computacional” as regras descritas acima detalhadamente:

Tabela 5.5.1. – Banco de regras aplicadas ao caso em estudo.

1. SE TEMP == ALTA então ESTRESSE == MUITO ALTO
2. SE TEMP == BAIXA OU NORMAL E (DPF E DPA) == (BAIXO OU MUITO BAIXO) ENTÃO ESTRESSE == BAIXO
3. SE DPF == (ALTO OU MUITO ALTO) E DPA == ALTO E IDADE == VELHO ENTÃO ESTRESSE == MODERADO
4. SE DPF MUITO ALTO E DPA == ALTO E IDADE == MUITO VELHO ENTÃO ESTRESSE == MUITO ALTO
5. SE (DPF E DPA) == (ALTO OU MUITO ALTO) E TXDP == NEGATIVA ENTÃO ESTRESSE == BAIXO
5. SE (DPF E DPA) == (ALTO OU MUITO ALTO) E TXDP == NULA ENTÃO ESTRESSE == MODERADO
6. SE DPF == (BAIXO OU ALTO) E DPA == ALTO E TXDP == POSITIVA ENTÃO ESTRESSE == ALTO
7. SE (DPF E DPA) == ALTO E TXDP == MUITO POSITIVA ENTÃO ESTRESSE == MUITO ALTO
8. SE DPF == MUITO ALTO E DPA == ALTO E TXDP == POSITIVA então ESTRESSE == MUITO ALTO
9. SE DPF == (ALTO OU MUITO ALTO) E DPA == MUITO ALTO E TXDP == POSITIVA então ESTRESSE == MUITO ALTO
10. SE TXDP == MUITO POSITIVO ENTÃO ESTRESSE == ALTO
11. SE (DPF E DPA) == ALTO E IDADE == NOVO ENTÃO ESTRESSE == ALTO
12. SE (DPF E DPA) == ALTO E IDADE == MADURO ENTÃO ESTRESSE == MODERADO
13. SE DPF == ALTO E DPA == ALTO E IDADE == NOVO ENTÃO ESTRESSE == ALTO
14. SE DPF == (ALTO OU MUITO ALTO) E DPA == MUITO ALTO E IDADE == (NOVO OU MADURO) então ESTRESSE == MUITO ALTO
15. SE DPF == ALTO OU MUITO ALTO E DPA == MUITO ALTO E IDADE == MADURO então ESTRESSE == MUITO ALTO

## 5.6. “Desfuzzificação” ou resultados do modelo

Antes de avaliar o método de desfuzzificação utilizado é importante ressaltar que o modelo seguido nesse trabalho para a associação entre os valores numéricos e as variáveis lingüísticas foi o de Mamdani [34][35].

Existem basicamente dois modelos para tal correlação o de Mamdani e o de Takagi-Sugeno [36].

O modelo Mamdani consiste em um conjunto de regras "SE – ENTÃO" para um conjunto de variáveis lingüísticas associadas as variáveis de saída, definidos pelas funções de pertinência. Nesse caso partindo de conjuntos *Fuzzy*, o resultado das diversas implicações também é formado por um conjunto *Fuzzy*.

O modelo Sugeno combina uma regra geral com uma regra de descrição local, utilizando um mapeamento em geral linear.

A diferença principal entre Mamdani e Sugeno é que as funções de pertinência das saídas de Sugeno são lineares ou constantes, o que permiti a simplificação das duas últimas etapas da inferência *Fuzzy* (agregação dos conseqüentes e desfuzzificação) para uma simples média.

Como o modelo utilizado não requer grande nível de processamento é coerente utilizar o método de Mamdani.

Quanto ao processo de desfuzzificação existem diversas técnicas para transformar variáveis *Fuzzy* novamente em valores numéricos, dentre eles pode-se mencionar a "Média de Máximos" e o "Centróide" [41].

O método de "Média de Máximos", verifica os valores obtidos no conjunto de saída onde as respectivas funções de pertinência possuem valor máximo ( $\mu(x)=1$ ) para posteriormente calcular a média entre esses valores e computá-la como saída numérica. Esse método é muito útil para aplicações que demandam grande número de operações matemáticas, como sistemas de controle em tempo real, apesar de ter sua precisão reduzida. Esse método é representado em (25).

$$y^* = \frac{\sum_{l=1}^N y_{l,c}^* h_l^*}{\sum_{l=1}^N h_l^*} \quad (25)$$

O método do "Centróide" determina o centro de gravidade do conjunto de saída e utiliza tal valor como resultado. Por envolver cálculos integrais é mais lento, porém como no caso desse trabalho especificamente não são necessários grandes níveis de processamento optou-se por usá-lo.

A equação 26 apresenta o método do “Centróide”.

$$y^* = \frac{\int_V y \mu_{Y^*}(y) dy}{\int_V \mu_{Y^*}(y) dy} \quad (26)$$

### 5.7. Desenvolvimento do modelo usando o Matlab®

Usando a ferramenta de modelagem *Fuzzy (FIS Editor)* do software Matlab® versão 6.5, desenvolvido pela “*The Mathworks Inc.*”, e os conceitos apresentados aqui partiu-se então para a simulação do modelo [50]. O modelo piloto foi nomeado “Modelo1”, seu código encontra-se no Anexo I.

As regras de inferência utilizadas foram aquelas apresentadas na Tabela 5.5.1. que ao serem distribuídas na máquina de inferências do Matlab tornaram-se 44 regras. Esse desdobramento se deve ao fato de a ferramenta do Matlab® não permitir que em uma mesma regra seja feita mais de uma referência a mesma variável.

O método de desfuzzificação selecionado foi o do centróide, o de implicação pelo mínimo, agregação pelo máximo, e os operadores AND e OR assumiram valores de mínimo e máximo respectivamente.

A seguir as Figuras 5.7.1 e 5.7.2 apresentam, respectivamente, a tela principal do modelo, contendo as entradas, a máquina de inferências e a saída e a tela contendo a atuação das regras e o valor de saída para o nível de estresse no enrolamento estatístico verificado para os valores exatos (*crisp*) assumidos no momento da simulação.

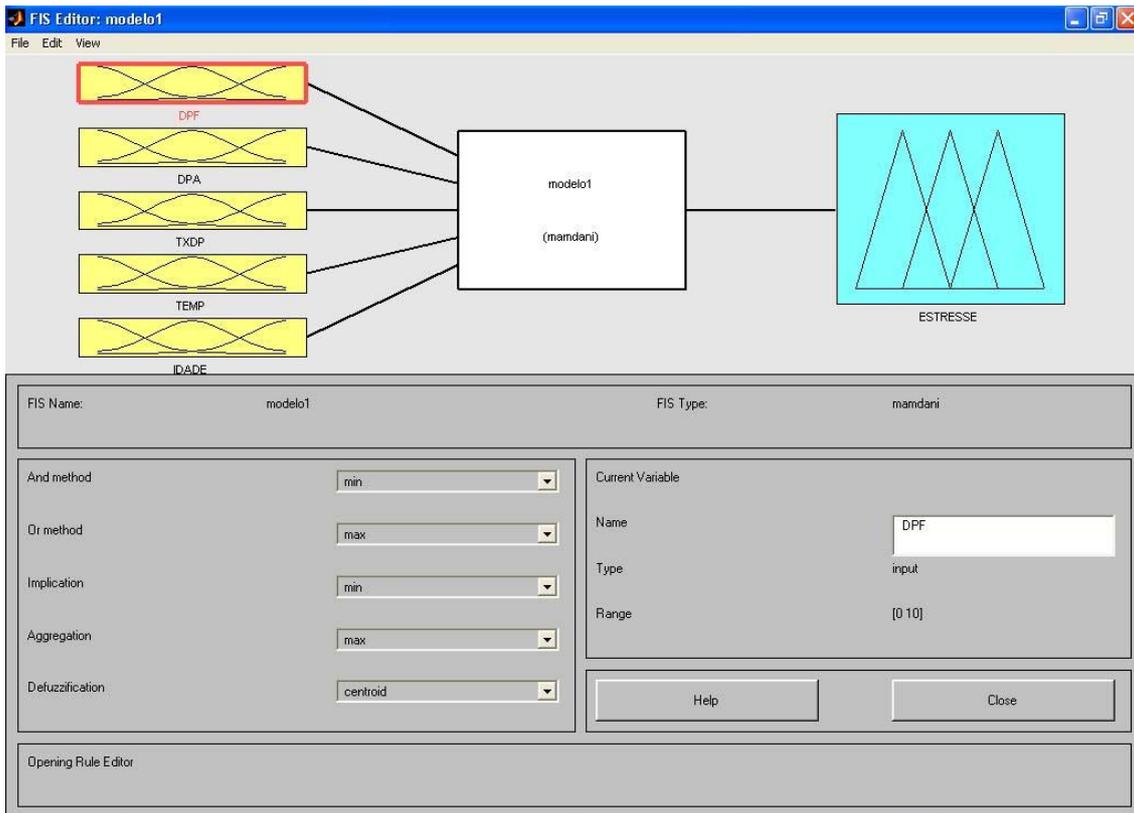


Figura 5.7.1. – Tela de entrada do modelo piloto “MODELO1”.

A tela apresentada na Figura 5.7.2 equivale a saída padrão da ferramenta de simulação do Matlab®, nela todas as variáveis de entrada foram atribuídas com valores exatos equivalentes a metade da sua escala. Como nesse trabalho optou-se por uniformizar o universo de discurso para as variáveis de entrada, variando sempre de 0 a 10, todas as variáveis na Figura 5.7.2. apresentam o valor “5”.

É interessante ressaltar que já para a apresentação padrão do Matlab® (variáveis com valor “5”) a saída apresenta um valor de 45,9%, mostrando a ativação das regras de inferência.

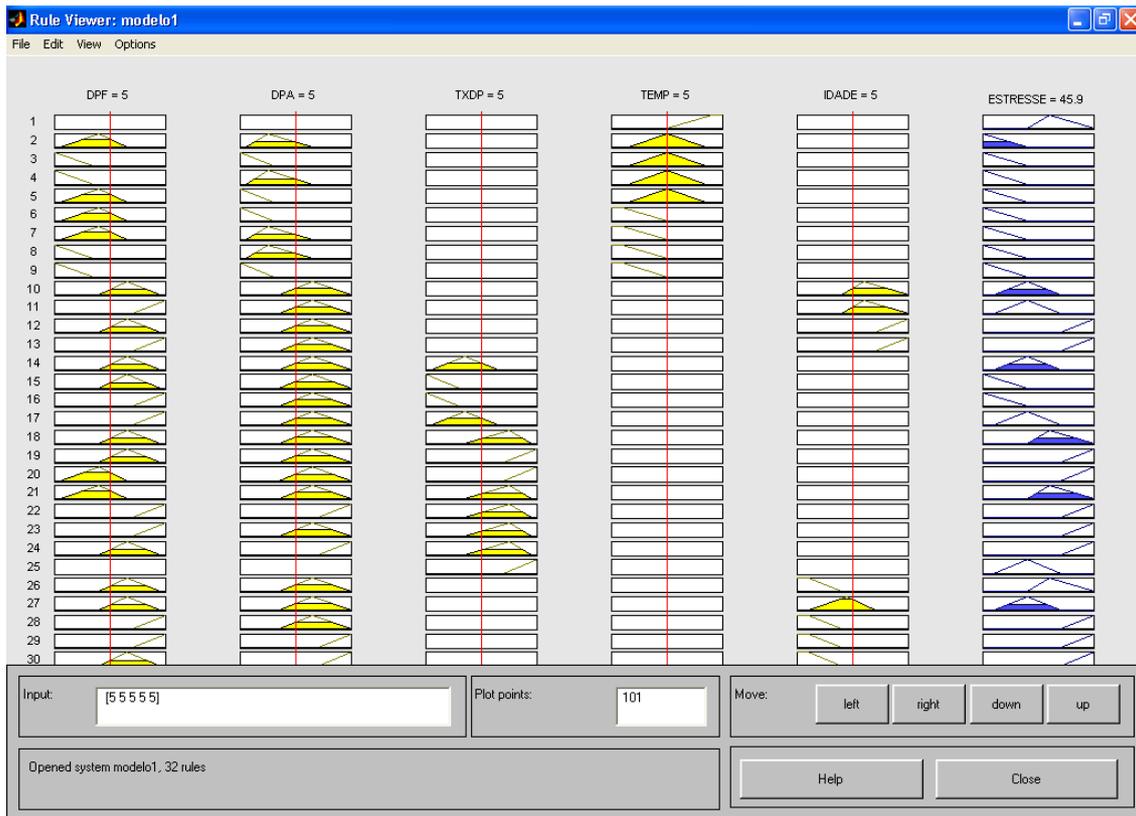


Figura 5.7.2. – Tela de saída do modelo piloto “MODELO1”.

Definido o modelo e feita sua implementação no Matlab®, é necessário que se realize testes no mesmo, avaliando sua capacidade de resposta para diversas situações de entrada.

Para tal foram simulados diversos cenários, inserindo valores distintos para as variáveis de entrada e verificando a resposta do modelo, os resultados das simulações são apresentados na Tabela 5.7.1.

As variáveis foram modificadas em conjunto e separadamente, de modo a verificar o peso de cada uma, se sua importância para o modelo condiz com sua importância na prática, comparando os resultados do modelo com um pretendo valor teórico esperado. Para esse valor teórico de comparação utilizou-se o coração dos subconjuntos, do conjunto “ESTRESSE”, que representam a saída lingüística esperada. Por exemplo, se era aguardada uma saída indicando um nível de estresse moderado, o valor para comparação seria “40.00”, e assim por diante.

Como base para as simulações utilizou-se justamente as relações apresentadas na Tabela 5.5.1. Desse modo pretende-se assegurar que o modelo reflita o conhecimento passado pelos profissionais que integraram o grupo de trabalho para sua formação.

Tabela 5.7.1. – Conjunto de simulações para “MODELO1”.

Variáveis de Entrada					ESTRESSE		E(%) <sup>19</sup>
DPF	DPA	TXDP	TEMP	IDADE	Modelo1	Teórico (0, 40, 60, 100)	
5	5	5	5	5	45,90	MODERADO	14,75%
0	0	0	5	0	13,00	MUITO ALTO	84,70%
0	0	0	7	0	46,80	MUITO ALTO	44,94%
0	0	0	9	0	90,30	MUITO ALTO	6,24%
5	5	0	4	0	47,10	BAIXO / MODERADO	57%
3	3	0	4	0	13,90	BAIXO	7,33%
2	2	0	4	0	15,90	BAIXO	6,00%
1	1	0	2	0	14,20	BAIXO	5,33%
0,5	0,5	0	2	0	14,20	BAIXO	5,33%
4	3,5	0	0	4	13,70	MODERADO	65,75
6,5	5,5	0	0	5	30,40	MODERADO	24,00
8	7	0	0	6,5	31,20	MODERADO	22,00
9,5	8,5	0	0	8,5	46,70	MODERADO	16,75
7,0	5,0	0	0	7,5	38,40	ALTO / MUITO ALTO	52,00%
8	7,0	0	0	8,5	47,30	MUITO ALTO	44,35%
9,5	8,0	0	0	9,75	47,30	MUITO ALTO	44,35%
8	7,0	0	0	9,75	47,30	MUITO ALTO	44,35%
7,0	5,0	0	0	9,75	47,30	MUITO ALTO	44,35%
5	5	0.5	0	0	47,10	BAIXO	214%
6.5	6.5	1.5	0	0	48,60	BAIXO / MODERADO	143%
7.5	7.5	2.5	0	0	52,00	MODERADO	30,00%
8.5	8	1.5	0	0	49,30	MODERADO	23,25%
9.5	8.5	1.0	0	0	48,00	MODERADO	20,00%
9.5	8.5	0.1	0	0	48,00	MODERADO / BAIXO	40,00%
8.5	9	8.5	9	8.5	65.80	MUITO ALTO	34,20%
4	8.5	4	0	0	69.40	ALTO	15,66%
5.5	7	5.5	0	0	57,00	ALTO	5,00%

<sup>19</sup>  $E(\%) = \left| \frac{\text{Teórico} - \text{Modelo1}}{\text{Teórico}} \right| \times 100\%$ , sendo o valor teórico associado à variável lingüística

correspondente, para limites (0 e 100) foi usado um valor médio (15 e 85) respectivamente.



Os resultados apresentados na Tabela 5.7.1. foram em sua maioria satisfatórios. Fica evidente que as variáveis referentes a frequência e amplitude das descargas parciais presentes no enrolamento possuem maior influência no nível de estresse sobre o enrolamento. Esse fato era esperado, pois as descargas parciais são ótimos indicadores associados a diversos mecanismos de degradação do sistema de isolamento, sendo descrito em detalhes em diversas referências como [43][44][47]. É interessante observar que um estado definido não é retroagido por circunstâncias atenuantes, por exemplo, após definido um nível alto de estresse, variáveis que implicariam em níveis mais baixos não são mais efetivas. Esse evento fica claro quando se observa a simulação de níveis altos e muito altos de descargas parciais (frequência e amplitude) em conjunção com taxas de variação nulas ou negativas.

A importância do fator temperatura mostra-se de extrema relevância, quando em altos níveis e sem associação com as demais variáveis. Por outro lado a variação do fator relativo ao tempo de operação passa a perder força a partir de certo ponto, o mesmo fenômeno é verificado quando da redução do fator relativo a taxa de variação das descargas parciais. Mais uma vez essa constatação condiz com o esperado, já que o foco principal do modelo, e conseqüentemente das regras definidas pela equipe, é a sinalização de situações de risco com difícil previsão.

Outro detalhe interessante é que o quanto mais próximo dos extremos, baixo ou muito alto, maior a diferença entre o obtido e o esperado, esse fato ocorre principalmente porque a quão mais drástica a situação maior a influência do conjunto de variáveis. Isso dá consistência ao modelo, evitando que uma medição errada ou a interpretação errônea de uma das variáveis gere um falso positivo. Além disso se fossem esperados resultados exatos, sempre, não seria necessária a ferramenta de lógica *fuzzy*.

É bom lembrar que um falso positivo, indicando uma condição alarmante, é muito prejudicial para a confiabilidade do modelo junto à equipe técnica.

Para validar o modelo e ratificar sua funcionalidade seria necessária uma quantidade de dados de entrada considerável, além de uma gama de situações bastante ampla para verificar a maior parte das possibilidades inerentes a operação de um gerador síncrono.

Com isso partiu-se então para a utilização do modelo em casos reais, ou seja, baseando as entradas das variáveis lingüísticas em valores próximos aos de uma máquina existente de Furnas.

### **5.7.1. Exemplos de utilização do modelo**

A atuação do modelo foi então testada sob condições conhecidas, ou seja, avaliou-se sua resposta para condições relacionadas a dados de ocorrências do passado, aos quais a saída é conhecida.

Infelizmente as unidades geradoras de Furnas, base de dados e conhecimento para esse trabalho, não possuem histórico de medições de Descargas Parciais, indicador de extrema importância para a utilização do modelo. Para substituir essa informação serão avaliados os resultados dos ensaios verificados na última revisão das máquinas observadas para a simulação. Dados como resultados dos ensaios dielétricos no enrolamento estatórico (Resistência de isolamento, fator de potência, etc [13][15][42]), resultados de inspeções visuais, pareceres técnicos, níveis operacionais, registros de vibração ou oscilações anormais, etc. O indicador de Descargas Parciais é uma poderosa ferramenta que conjuga de maneira simples esses fatores, quando relacionados ao nível de degradação dos enrolamentos estatóricos.

Além da utilização dos relatórios e pareceres técnicos foi utilizado também o conhecimento acerca das máquinas em questão. Os engenheiros responsáveis pelas usinas de Funil e Luis Carlos Barreto, dentro do Departamento de Equipamentos Rotativos participaram ativamente de todo o processo.

Foram selecionadas três situações distintas para simulação, como critério para tal seleção procurou-se aproximar os casos às condições de contorno utilizadas no modelo. São elas:

- inserção de dados no modelo advindos de uma unidade que viria a falhar em operação de maneira iminente ou em médio prazo. A unidade em questão é a UG#3 da usina de Funil, que sofreu severa falha entre bobinas da fase A do estator;
- avaliação do modelo mediante dados de uma unidade sadia, será utilizada a UG#1 da usina de Mascarenhas de Moraes que em mais de 40 anos de operação nunca sofreu falha no enrolamento estatórico;

- avaliação de uma unidade que possivelmente estaria trabalhando sob estresse. Para tal será observada a evolução da UG#1 da usina de Luiz Carlos Barreto que em 1991 sofreu uma falha bifásica no estator, resultando em uma indisponibilidade de mais de 6 meses.

#### A) UG#3 da usina de Funil [14][57][52][53]

Essa unidade está em operação desde 1969, somando em torno de 250.000 horas de operação até o momento. No início de 2006 a unidade apresentou alterações na sua disponibilidade, passando a operar sob restrição de potência. Nesse mesmo período houve uma grave ocorrência nos mancais de guia e escora do gerador. Verificou-se problemas quanto a oscilação no eixo do rotor, impondo uma necessidade de retirada do rotor para que fosse realizado trabalho externo à usina. Ao retirar-se o rotor aproveitou-se para realizar uma revisão completa da unidade, incluindo uma bateria ensaios elétricos e mecânicos.

No desenrolar desses ensaios foi detectada falha no enrolamento da fase A, com queima entre duas bobinas de frente, e fuga para a terra. É interessante ressaltar que não fosse a parada devido a problemas nos mancais a unidade acabaria por falhar em operação dentro de pouco tempo.

A usina de Funil vinha desenvolvendo programa de modernização de seus elementos de medição. Até então, quando da época da falha, 75% dos medidores já havia sido substituída por unidade digitais modernas.

Tais medidores constantemente alarmavam por alta temperatura, seja nos mancais ou no rotor. O que nos permite estimar operação sob alta temperatura no estator também. Essa unidade possui enrolamento classe B, portanto seus padrões de temperatura são inferiores (operação em 80°C, alarme aos 90°C e *trip* da unidade aos 100°C).

O resultado da revisão, antes da falha propriamente dita, detectou alto número de estacas frouxas e desgaste considerável na pintura semi-condutiva. Esses dois fatores são indicadores da presença de Descargas Parciais próximas as cabeças das bobinas e com intensidade considerável, variando de pouco a muito freqüentes.

A falha em si ocorreu quando do ensaio de alta tensão, esse fato indica que essa unidade seria capaz de operar por um curto a médio período de tempo antes de falhar em operação. Mediante o exposto nesse trabalho essa

máquina estaria com um nível de estresse em seus enrolamentos estatóricos relativamente alto.

Realizou-se então a simulação a partir dos valores da Tabela 5.7.1.1. e obteve-se um nível de estresse associado ao enrolamento estatórico na casa dos 62,30%, o que indica, como esperado, um nível de estresse entre alto e muito alto, mais próximo ao coração do subconjunto alto (60%). Possibilidade de falha em médio ou curto prazo presente. A Figura 5.7.1.1. apresenta a tela contendo o resultado da simulação no Matlab®.

Tabela 5.7.1.1. Variáveis de entrada para a Simulação 01.

ATRIBUIÇÃO DE VALORES	
Variável	Valor Exato ( <i>crisp</i> )
DPF	8,50
DPA	8,50
TXDP	7,50
TEMP	7,50
IDADE	8,50
<b>ESTRESSE</b>	<b>62,30%</b>

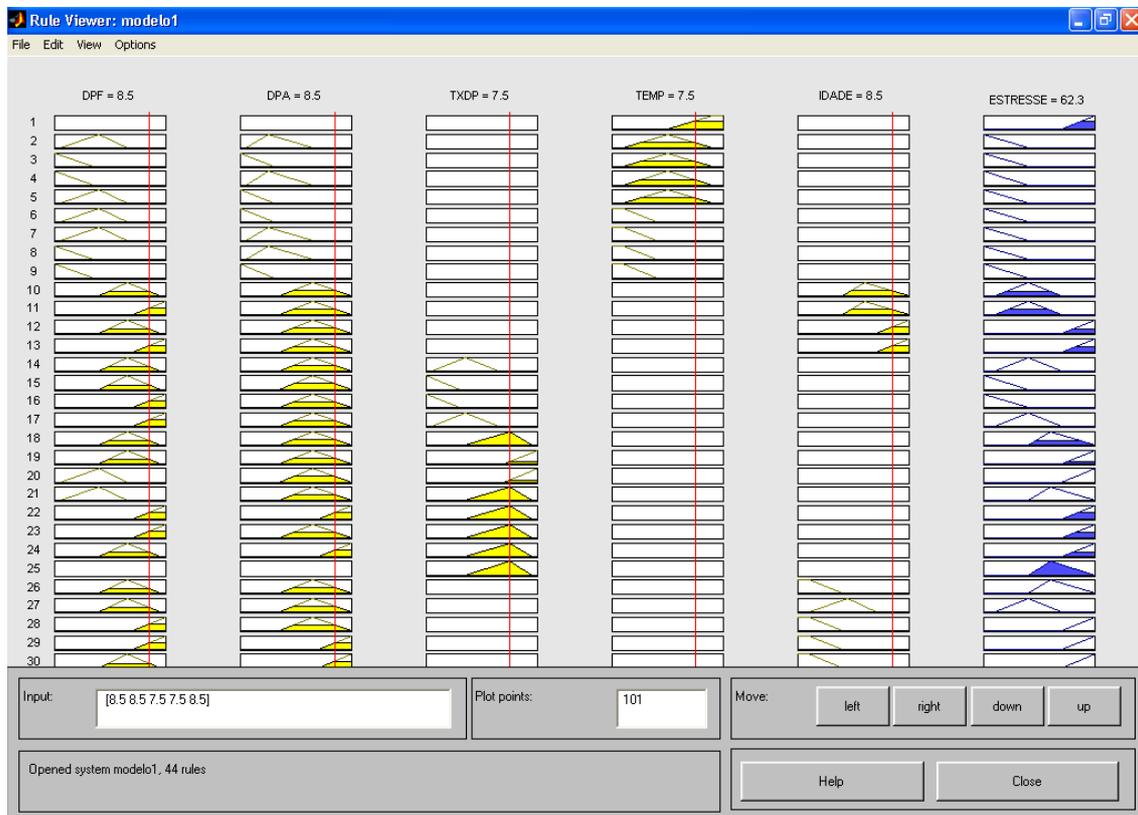


Figura 5.7.1.1. Resultados da simulação 01.

## B) UG#1 da usina de Mascarenhas de Moraes [14][54][55][57]

Essa unidade é a mais antiga em operação no sistema Furnas, com um índice histórico de disponibilidade e fatores de manutenção muito bons [55].

Não há registros de falhas no estator, a unidade sempre operou em carga nominal ou muito próximo a isso, salvo restrições de funcionamento sem carga devido a problemas de vazão do rio.

Em alinhamento com as condições de contorno desse modelo, essa unidade nunca passou por grandes processos de revisão que pudessem modificar as características do sistema de isolação ou ainda dos próprios enrolamentos.

Seguindo o mesmo processo do item anterior foi levantado junto à equipe de manutenção da usina os índices de temperatura e resultados dos ensaios dielétricos dos últimos 6 anos (ensaios realizados em 2001 e 2005 pelo CTE, Centro Técnico de Ensaios e Medições de Furnas). De posse desses resultados foi possível estimar os valores de descargas parciais referentes a essa unidade.

Os valores definidos para a simulação encontram-se na Tabela 5.7.1.2. e a Figura 5.7.1.2. apresenta o resultado dessa simulação.

Realizou-se então a simulação a partir dos valores da Tabela 5.7.1.2. e obteve-se um nível de estresse associado ao enrolamento estatórico na casa dos 13,7%.

Esse nível, baixo e apenas beirando moderado, condiz perfeitamente com o estado de uma unidade que apesar de muito antiga e a ponto de atingir o limite de sua vida útil estimada, nunca tenha registrado quaisquer falhas e possua bons resultados nos ensaios dielétricos.

Tabela 5.7.1.2. Variáveis de entrada para a simulação 02.

ATRIBUIÇÃO DE VALORES	
Variável	Valor Exato ( <i>crisp</i> )
DPF	4,20
DPA	3,50
TXDP	3,00
TEMP	5,00
IDADE	9,50
<b>ESTRESSE</b>	<b>13,70%</b>

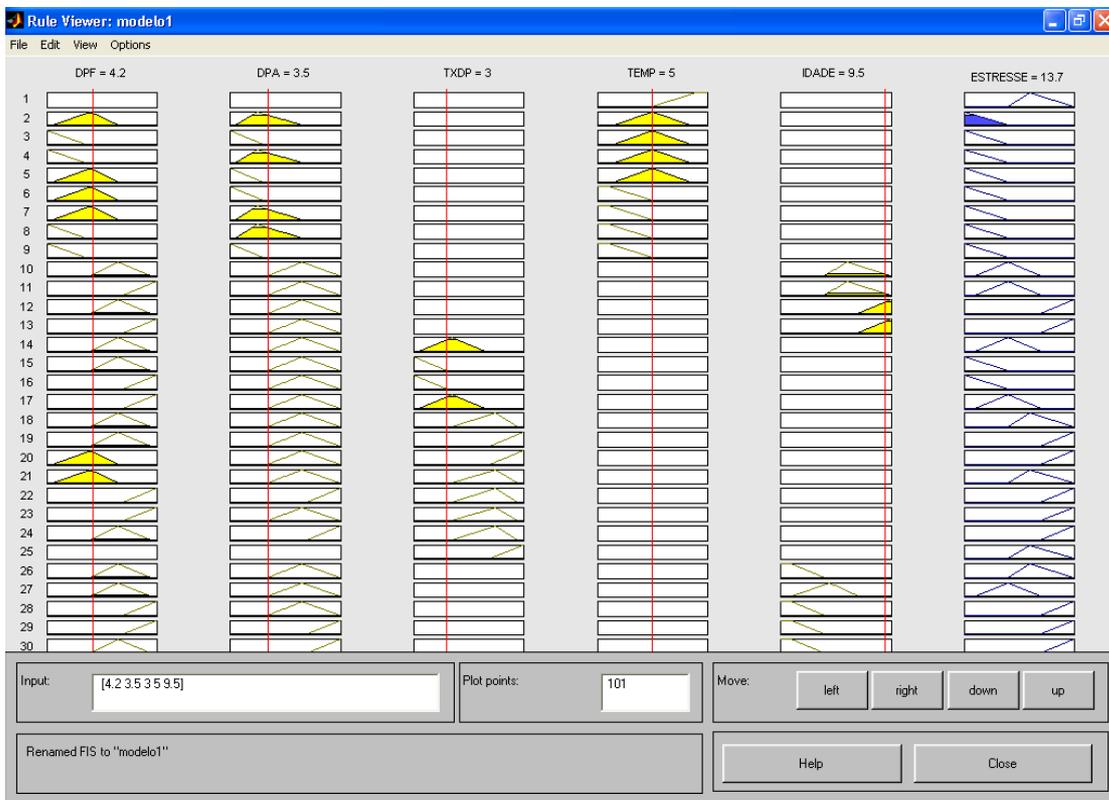


Figura 5.7.1.2. Resultados da simulação 02.

C) UG#1 da usina de Luiz Carlos Barreto [14][48][54][56]

Essa unidade sofreu severa falha em 1991, e várias outras após isso. Essa em particular foi selecionada pois na ocasião desenvolveu-se um trabalho para verificar as causas das constantes falhas nas unidades dessa

usina. Essa unidade em particular possuía histórico positivo até a ocasião, o que se encaixa nas condições de contorno do modelo.

As unidades de Luiz Carlos Barreto possuem uma característica especial, a necessidade de trabalhar somente sob determinadas faixas de potência. Essa usina em questão tem dificuldades no controle da vazão do rio e sérios problemas de cavitação nas suas turbinas, reduzindo a faixa operacional das unidades.

O último ensaio dielétrico da unidade (realizado três anos antes da falha em questão) mostrava resultados satisfatórios, porém foi recomendada observação e realizada substituição de estecas frouxas, além de reparos na faixa de pintura semicondutiva da unidade. O relatório do CTE atentava para a possibilidade de nova inspeção no período de 2 anos.

Tal inspeção não foi realizada e a unidade veio a falhar.

O estresse imposto pelas condições operativas da unidade acelerou o processo de degradação do isolamento do enrolamento estatórico.

Os valores definidos para a simulação encontram-se na Tabela 5.7.1.3. e a Figura 5.7.1.3. apresenta o resultado dessa simulação.

Realizou-se então a simulação a partir dos valores da Tabela 5.7.1.2. e obteve-se um nível de estresse associado ao enrolamento estatórico na casa dos 64,90%.

Esse nível, muito próximo do coração do subconjunto relacionado com alto estresse (60%), condiz com o estado de uma unidade que viria a falhar num período curto ou médio de tempo e sob condições normais de operação. Apesar de se esperar níveis talvez um pouco mais altos considerando a ocorrência de falha em menos de 30.000 horas, é importante observar que as unidades em Luiz Carlos Barreto operam seguidamente sob condições especiais de carregamento (como mencionado anteriormente) o que pode ter retardado o aparecimento da falha.

Tabela 5.7.1.3. Variáveis de entrada para a simulação 03.

ATRIBUIÇÃO DE VALORES	
Variável	Valor Exato ( <i>crisp</i> )
DPF	7.00
DPA	7,00
TXDP	7,00
TEMP	5,50
IDADE	9,00
<b>ESTRESSE</b>	<b>64,90%</b>

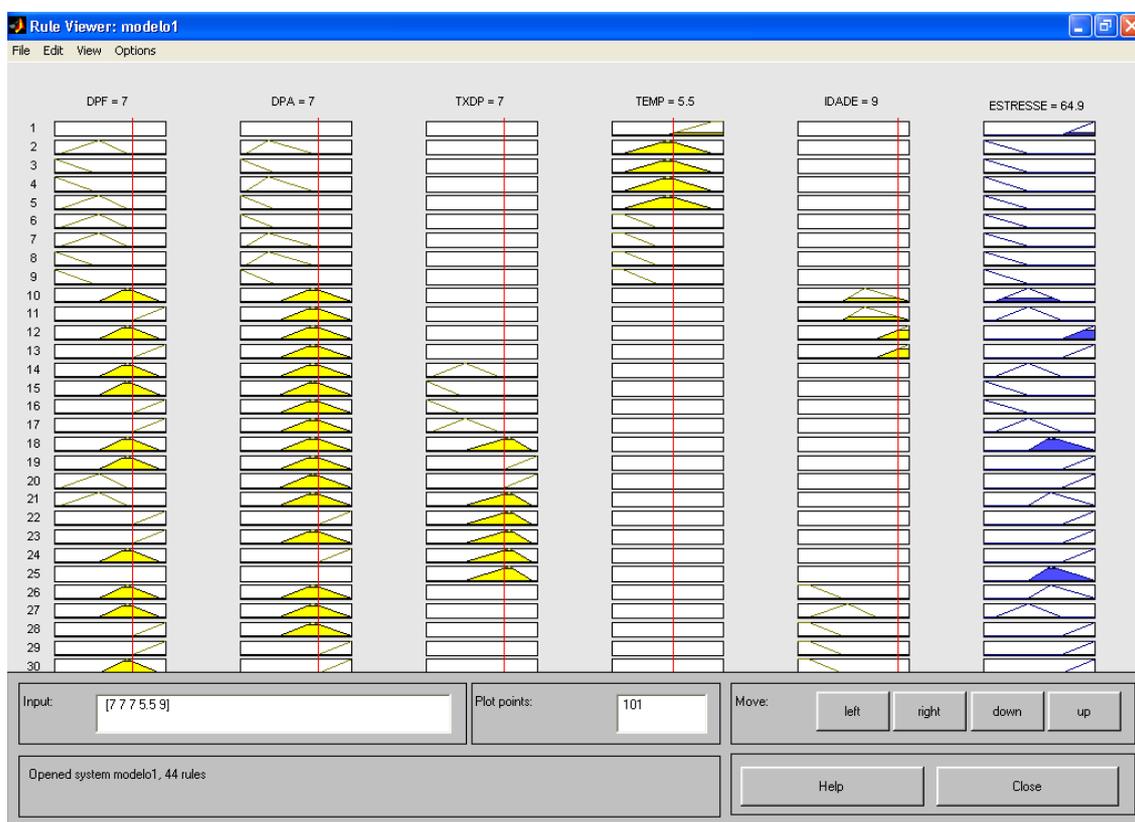


Tabela 5.7.1.3. Resultados da simulação 03.

Os exemplos aqui apresentados servem como ponto de partida para a avaliação do modelo. O ideal seria utilizar dados apropriados e a partir daí montar simulações para verificar se o modelo atende as expectativas.

É interessante observar que os resultados apresentados pelas simulações realizadas indicariam efetivamente a atitude correta de manutenção a ser tomada.

Dentro de pouco tempo, quando finalizado o processo de modernização da usina de Mascarenhas de Moraes, será possível implementar o modelo em sua totalidade, utilizando como entrada os dados advindos do seu sistema de monitoramento, após algumas medições (alguns anos).

## **5.8. Avaliação do modelo *Fuzzy* desenvolvido**

Definidas as etapas anteriores o modelo encontra-se pronto para funcionamento. A partir daí deve ser realizada uma sessão de ensaios para melhor validar o modelo. Uma prévia, utilizando valores randômicos porém relacionados ao conjunto de regras desenvolvido, foi realizada com resultado satisfatório (Tabela 5.7.1.).

Utilizando como base o conhecimento dos especialistas consultados para o desenvolvimento do estudo, variou-se as entradas do modelo a partir de três exemplos significativos, apresentados na seção 5.7.1, e a partir daí foi efetuado o julgamento dos valores de saída obtidos.

O resultado obtido foi bastante promissor. Pode-se afirmar que um operador que insira no modelo os valores correspondentes às variáveis de entrada, obtidas a partir do sistema de monitoramento, seria capaz de verificar o nível de estresse sob o qual encontra-se o enrolamento estático da máquina avaliada e a partir daí subsidiar as decisões a serem tomadas pelas equipes de manutenção.

Nos casos estudados a implantação desse sistema de diagnósticos poderia antecipar uma revisão ou intervenção, caso dos exemplos “A)” e “C)” da seção 5.7.1, ou ainda evitar uma parada de máquina desnecessária por um certo período de operação, caso do exemplo “B)”, também da seção 5.7.1.

Dentre os pontos positivos do modelo pode-se ressaltar: a facilidade de utilização e leitura de resultados; a utilização de variáveis cuja obtenção é relativamente simples (praxe nos sistemas de monitoramento contemporâneos); a participação da equipe técnica na sua definição, o que aumenta em muito sua aceitação; seu desenvolvimento totalmente voltado para o ambiente nacional e suas características marcantes.

Dentre os pontos a melhorar temos: sua pouca abrangência; a necessidade de refinar as funções de entrada e as regras de modo a melhorar seus resultados; o restrito universo de atuação frente as condições de contorno; não ser dinâmico.

Caso se deseje utilizar tal modelo para incursões futuras de diagnósticos é necessário reavaliar suas condições de contorno e prever talvez outras variáveis de entrada, tornando-o assim mais poderoso.

# Capítulo 6

## Conclusões e Trabalho Futuros

### 6.1. Avaliação do objetivo e Conclusões

Após as considerações expostas no decorrer deste trabalho percebe-se a complexidade das metodologias e técnicas utilizadas para avaliação e detecção de falhas.

Dentro do objetivo proposto procurou-se avaliar de maneira crítica algumas dessas metodologias, verificando assim sua validade e os resultados obtidos por elas, positivos ou não, sempre priorizando a relação entre as metodologias utilizadas e a realidade de manutenção no Brasil.

Até hoje já foram propostas, estudadas e analisadas (por várias vezes refutadas também) diversas metodologias para detecção e diagnóstico de falhas em geradores síncronos que fazem uso de técnicas inteligentes e sistemas especialistas. Todo o processo de pesquisa e avaliação das técnicas utilizadas em escala mundial, suas características marcantes, vantagens e desvantagens, foi crucial para o embasamento necessário a verificação de sua atuação no âmbito das empresas nacionais.

Como observado anteriormente é praticamente impossível desenvolver um modelo de diagnóstico que cubra todas as possibilidades de falhas em máquinas síncronas. Desse modo partiu-se para a definição de um elemento de estudo mais específico e optou-se pelos enrolamentos estatóricos. Dentro dos objetivos desse trabalho as publicações avaliadas que utilizam as técnicas inteligentes para avaliar falhas nas bobinas dos enrolamentos de campo ou estatóricos foram as de maior contribuição.

A utilização de um único programa ou modelo capaz de diagnosticar e avaliar a condição de um gerador síncrono como um todo não é viável, porém ao agregar-se mais de um modelo ou técnica de modo a ampliar a cobertura

das mesmas talvez seja possível ampliar também a abrangência sobre as máquinas síncronas.

O modelo desenvolvido no Capítulo 5 e sua avaliação perante a simulação de casos de estudo (retirados de casos reais) é um exemplo prático de como a utilização de técnicas inteligentes associadas ao conhecimento de profissionais especializados pode ser importante para a manutenção de unidades geradoras.

Durante o desenvolvimento deste trabalho foi realizada extensa pesquisa bibliográfica de modo a situar o autor quanto às publicações existentes que pudessem se relacionar com o diagnóstico e manutenção de geradores síncronos associados a técnicas inteligentes. Posteriormente essa pesquisa teve sua abrangência reduzida àquelas técnicas que utilizassem as ferramentas de Redes Neurais e Lógica *Fuzzy*, fato esse justificado pois essas duas técnicas são as mais representativas no cenário de estudo escolhido.

Definidas as técnicas a serem observadas deu-se prosseguimento a pesquisa e foram encontradas mais publicações com ênfase em enrolamentos de campo e estatóricos. Com isso obteve-se o conhecimento necessário para definir o desenvolvimento do modelo a partir da utilização da ferramenta de Lógica *Fuzzy* associada ao diagnóstico da condição dos enrolamentos estatóricos. Desse modo pretendeu-se aliar a necessidade de se monitorar e avaliar a condição do enrolamento estatórico, elemento mais importante haja visto todo o discutido anteriormente, à técnica mais adequada para tal.

Seguiu-se então para o desenvolvimento propriamente dito do modelo, utilizando não somente as referências da literatura e teoria como principalmente o conhecimento técnico (teórico e prático) do autor e da equipe de engenheiros de Furnas associada ao projeto.

O desenvolvimento do modelo, detalhado no Capítulo 5, foi gradual e sempre levou em conta as necessidades do público alvo, ou seja, o “homem de manutenção”. Seu formato atual, basicamente acadêmico, não é adequado para a utilização em campo, porém a partir dele podem ser verificados os resultados que possibilitem o desenvolvimento posterior de uma versão capaz de ser implantada nas áreas.

É importante observar que o modelo desenvolvido considerou o estudado na literatura acerca do assunto em questão. A escolha das variáveis de entrada é um exemplo de integração entre o que propõe este trabalho e o que se viu na literatura. Foram selecionadas tais variáveis de modo a agregar técnicas que geralmente são utilizadas em separado, como a avaliação do

nível de descargas parciais nos enrolamentos e a verificação de seu tempo de operação, quando se trata de acompanhamento preditivo.

Em uma primeira análise o modelo foi capaz de avaliar de maneira correta os dados de entrada e produzir saídas coerentes com sua finalidade. Os casos estudados obtiveram ótimos resultados, mediante ao que se propôs.

Sendo assim conclui-se que o modelo apresentado é capaz de, a partir de dados corretos de entrada, avaliar de maneira coerente o nível de estresse ao qual está submetido determinado enrolamento estatórico, podendo assim ser utilizado como uma ferramenta complementar para a metodologia de manutenção implantada na empresa.

## **6.2. Sugestões para trabalhos futuros**

Para trabalhos futuros seria de grande valia a complementação do modelo apresentado aqui, contemplando outras variáveis de monitoramento. Desse modo poder-se-ia montar um banco de dados mais duradouro e viabilizar modelos de acompanhamento dedicados para determinadas máquinas, ou expandir o atual para uma visão geral, ou seja, aberta ao diagnóstico de qualquer unidade.

Dentre as possíveis variáveis a serem inseridas no modelo pode-se citar, o modo de operação (ciclos de partidas / paradas), mudando assim as condições de contorno e tornando o modelo mais genérico; uma variável de “memória” tornando o modelo capaz de verificar um padrão de melhora ou piora nas condições do enrolamento avaliado; entre outras.

Outro adendo de valia ao modelo desenvolvido seria verificar a possibilidade de ajustar as funções de pertinência e as regras de controle desenvolvidas de modo a torná-las dinâmicas, ou seja, capazes de corrigir possíveis discrepâncias na atuação do modelo. Esse fator seria de grande valia para se evitar falsos positivos durante um diagnóstico.

Um incremento primordial para o futuro seria a construção de uma interface de usuário, de modo a tornar o modelo *user friendly*.

## **6.3. Demais considerações**

Quanto aos resultados obtidos pelo trabalho os mesmos podem ser considerados satisfatórios.

Sob uma visão interna, ou seja, avaliando as opiniões do corpo técnico e gerencial de grandes empresas do setor elétrico (entre outras) no Brasil, é compreensível a postura de alguns deles em contraponto à utilização de metodologias inovadoras para manutenção. Ficam explícitos aqui os fatores que levam técnicos de gerações anteriores a refutar o uso de técnicas inteligentes, ou sistemas de monitoramento dedicados, entre eles: a confiabilidade, ruptura de um paradigma de sucesso e a falta de antecedentes históricos para comparação.

Por outro lado é interessante observar que algumas dessas empresas, como a Copel, se dispuseram a romper o paradigma de metodologia de manutenção baseada no binômio preventiva e corretiva, obtendo ótimos resultados baseados no monitoramento da condição das máquinas e nas intervenções seletivas.

Ainda explorando as ocorrências apresentadas aqui nesse trabalho, têm-se dois ótimos exemplos da importância de uma conduta de manutenção que utilize ferramentas de monitoramento e diagnóstico. A ocorrência na UG#1 de manso, apresentada na seção 3.4, seria muito provavelmente evitada, ou pelo menos de menores proporções, se houvesse um acompanhamento das condições dessa máquina. Outro ótimo exemplo é o apresentado na seção 3.2.2, quando a correta observação dos dados advindos do sistema de monitoramento propiciou a correção de grave defeito na UG#5 da usina Mascarenhas de Moraes [23].

Se associarmos ao sistema de monitoramento um programa de diagnóstico, como o desenvolvido neste trabalho devidamente para atender as necessidades locais, ou com abrangência suficiente, pode-se implementar uma completa metodologia de manutenção baseada no diagnóstico das máquinas.

Fica o conceito que desde que desenvolvida de maneira correta, levando em consideração as opiniões dos profissionais ligados diretamente às máquinas e respeitando as características de cada uma das técnicas inteligentes disponíveis, a mudança de metodologia seria benéfica.

# Referências Bibliográficas

- [1] KRAUSE, P. C., *Analysis of Electric Machinery*, 2<sup>nd</sup> Ed., McGraw – Hill International Editions, New York, USA, 1987.
- [2] DARWISH, H. A., TAALAB, A. I., KAWADY, T. A. "Development an Implementation of an ANN-Based Fault Diagnosis Scheme for Generator Winding Protection", *Power Delivery, IEEE Transactions on*, Volume 16, Issue 2, Page(s): 208 – 214, Apr2001
- [3] HALLIDAY, D., RESNICK, R., *Física III*, 4<sup>o</sup> Ed., Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., Rio de Janeiro, Brasil, 1994.
- [4] FITZGERALD, A. E., KINGSLEY Jr., C., KUSKO, A., *Máquinas Elétricas – Conversão Eletromecânica da Energia, Processos, Dispositivos e Sistemas*, 1<sup>o</sup> Ed., McGraw – Hill do Brasil Ltda., São Paulo, Brasil, 1975.
- [5] D'ANGELO, M. F. S. V., COSTA, JR. P. P., "Detection of Shorted Turns in the Field Winding of Turbogenerators Using the Neural Network MLP", In: *International Conference on Systems, Man, and Cybernetics*, pp. ,Tucson Arizona, USA, Oct 2001.
- [6] PENMAN, J., JIANG, H., "The Detection of Stator and Rotor Winding Short Circuits in Synchronous Generators by Analysing Excitation Current Harmonics", In: *Opportunities and Advances in International Electric Power Generation, International Conference on (Conf. Publ. No. 419)*, pp. 137-142, Durham, UK, Mar 1996.
- [7] PALMA, J. C. P., *Accionamentos Electromecânicos de Velocidade Variável*, 1<sup>o</sup> Ed., Lisboa, Portugal, Fundação Calouste Gulbenkian, 1999.
- [8] HALLIDAY D., RESNICK R., *Física I*, 4<sup>o</sup> Ed., Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., Rio de Janeiro, Brasil, 1984.
- [9] SILVA, J. J., Gennari, M. C., "Diagnóstico Elétrico de Máquinas Elétricas Rotativas", In: *II ENAM – Encontro Nacional de Máquinas Rotativas*, Foz do Iguçu, Brasil, Nov 2004.
- [10] GENNARI M., LEAP – Life Expectancy Analysis Program "for electrical rotating machines", *III Mining Plant Maintenance Meeting*, Viña del Mar, Chile, 6-8 set/2006.
- [11] BO, Z. Q., REDFERN, M. A., POTTS, S., *et al.* , "Non-Differential Protection of a Generator's Stator Utilizing Fault Transients", *Developments in Power System Protection, Seventh International Conference on (IEE)*, pp 503-506, Amsterdam, Netherlands , 4 set – 4 dec 2001.
- [12] BRAGA, C. R. da C., *Um estudo sobre a utilização de ensaios elétricos não destrutivos como possível meio de avaliação do estado da isolação de barras estáticas de hidrogeradores*, Dissertação de M.Sc., COPPE-UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 1987.

- [13] IEEE Std 492, *Guide for operation and maintenance of hydro-generators*, IEEE Std 492, 1999.
- [14] RIBEIRO, A. B. U., *Avaliação do Estado de Enrolamentos Estatóricos de Hidrogeradores Através de Ensaios de Manutenção*, Dissertação de M.Sc., COPPE-UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 1999.
- [15] IEEE Std 1434, *IEEE Guide in the Measurement of Partial Discharges in Rotating Machinery*, Apr 2000.
- [16] ARAÚJO, C. A. S., CÂNDIDO, J. R. R., SOUZA, F. C., *et al.*, *Proteção de Sistemas Elétricos*, 1º Ed., Rio de Janeiro, Brasil, Ligth / Editora Interciência, 2002.
- [17] PEUGET, R., COURTINE, S., ROGNON, J. P., "Two Knowledge-Based Approaches To Fault Detection And Isolation On A PWM Inverter", In: *Industry Applications Conference, 1997. Thirty-Second IAS Annual Meeting, IAS '97., Conference Record of the 1997 IEEE* , pp. 1471-1478, New Orleans, USA, Oct 1997.
- [18] EL-SHARKAWI, M. A., MARKS II, R. J., STREIFEL, R. J., *et al.*, "Electric Power Applications of Fuzzy Systems: Detection and Localization of Shorted Turns in DC Field Winding of Turbine-Generator Rotors Using Novelty Detection and Fuzzyfied Neural Networks", *Electric Power Applications of Fuzzy Systems*, IEEE Press, New York, USA, 1998.
- [19] GRANT, A. E., "Turbo-Generator Rotor Winding Fault Detection by a Recurrent Surge Method", *Technical Disclosure Bulletin*, nº201, Jul 1973.
- [20] STREIFEL, R., MARKS II, R. J., EL-SHARKAWI, M. A., "Detection of Shorted-turns in the Field Windings of Turbine-generators Rotors Using Novelty Detectors – Development and Field Tests", *IEEE Trans. on Energy Conversion*, Volume 11, Jun 2006.
- [21] DURAISAMY, V., DEVARAJAN N., KUMAR, P. S., *et al.*, "A Fuzzy Based Fault Detection Scheme for Synchronous Generator", *Academic Open Internet Journal*, Volume 14, 2005 (<http://www.acadjournal.com/2005/V14/part1/p1/>)
- [22] EPRI, *Hydropower Plant Modernization Guide*, In: Volume 9, Hydroplant Modernization, EPRI, Report GS-6419, Project 2602-2, Final Report, 1989.
- [23] ROLIM, F. I. B., "Using Diagnostic Tools to Understand Abnormal Generator Behavior", *HRW*, pp. 14–17, Dec 2005.
- [24] CLOSE, C. M., *Circuitos Lineares*, 2<sup>nd</sup> Ed., Rio de Janeiro, Brasil, Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 1975.
- [25] BAUCHSPIESS, A., *Aplicações em Engenharia de Redes Neurais Artificiais, Lógica Fuzzy e Sistemas Neuro-Fuzzy*, Ed., Editora da Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, 2004.
- [26] NASCIMENTO JR., C.L., Yoneyama, T., *Inteligência Artificial em Controle e Automação*, 1º Ed., Editora Edgard Blücher e FAPESP, São Paulo, Brasil, 2000.
- [27] TZAFESTAS, S. G., "Knowledge-based system diagnosis, supervision and control", , National Technical University, Athens, Greece, 1989.

- [28] XU, Y., JIANG, J., "Implementation of an Observer-Based Fault Detection Scheme on a Lab-scale Power System", In: *Electrical and Computer Engineering, 1998. IEEE Canadian Conference on*, Vol. 2, pp. 573-576, Ontario, Canada, May 1998.
- [29] KOSKO, B., *Neural Networks and Fuzzy Systems – a dynamical systems approach to machine intelligence*, Ed., New York, USA, Prentice Hall International Editions, 1992.
- [30] WOLFGRAM, D. D., DEAR, T. J., GALBRAITH, C. S., *Expert Systems for the Technical Professional*, Ed., New York, NY, USA, John Wiley & Sons Inc., 1987.
- [31] KHORASHADI-ZADEH, H., "Application of Fuzzy Neuro for Generator Stator Earth Fault Detection", *7<sup>th</sup> Seminar on Neural Network Applications in Electrical Engineering*, Belgrade, Yugoslavia, 2004.
- [32] KASABOV, N.K., *Foundations of Neural Network, Fuzzy Systems and Knowledge Engineering*, Ed., MIT-Press, Cambridge, MA, USA, 1996.
- [33] ATTARAN, M., "The coming age of fuzzy logic", *Journal of Systems Management*, 01 Mar 1996, ABI/INFORM Global.
- [34] MANDANI, E.H., "Applications of Fuzzy Algorithm for Control of Simple Dynamic Plant", *Proceedings of IEEE*, Volume 121, Issue 12, pp. 1585-1588, 1974.
- [35] MANDANI, E. H., King, P. J., "The application of fuzzy control systems to industrial process", *Automatica*, n° 13, pp. 235-242, 1977.
- [36] TAKAGI, T., SUGENO, M., "Fuzzy identification of systems and its application to modeling and control", *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, n°15, pp. 116-132, 1985.
- [37] TAVNER, P.J., Penman, J., *Condition Monitoring of Electrical Machines*, 1° Ed., Research Studies Press Ltd., New York, USA, 1987.
- [38] CHOW, T. W. S., TAN HONG-ZHOU, "HOS-based nonparametric and parametric methodologies for machine fault detection", *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 47, n°5, Oct 2000.
- [39] PARK Y. M., KIM G. W., "A Logic Based Expert System for Fault Diagnosis of Power Systems", *IEEE Trans. Power Systems*, vol. 12, Dec 1994.
- [40] HENRIQUES, F. S., "Falha nas três fases da UG4 da Usina de Manso" ; *I Seminário de Manutenção de Equipamentos Rotativos*, São José do Rio Preto, São Paulo, Brasil, 19-22 set 2005.
- [41] MENDEL, J. M., "Fuzzy Logic Systems for Engineering: A tutorial"; *Proc. of IEEE*, Vol. 83, N° 3, pp. 345-377, Mar 1995.
- [42] IEEE Std 43, *IEEE Recommended Practice for Testing Insulation Resistance of Rotating Machinery*, 2000.
- [43] Stone, G. C., "PD Seminar", *Iris Power Engineering, INC*, Rio de Janeiro, Brasil, 2004.

- [44] RIBEIRO, A. B. U., "Catálogo de defeitos e metodologia para interpretação de ensaios de descargas parciais em hidrogeradores", *II ENAM – Encontro Nacional de Máquinas Rotativas*, Foz do Iguaçu, Brasil, Nov 2004.
- [45] Stone, G. C., "The use of partial discharge measurements to assess the condition of rotating machine insulation", *IEEE Electrical Insulation Magazine*, Issue 21, pp. 23–27, 1996.
- [46] SASIC, M., "Use of continuous on-line partial discharge monitoring for condition-based maintenance and testing of rotating electrical machines", *II ENAM – Encontro Nacional De Máquinas Rotativas*, Foz do Iguaçu, Brasil, Nov 2004.
- [47] CARVALHO, A. T., SANS, J. P., AMORIM, H. P., *et al.*, "Sistema para medição, análise e diagnóstico de descargas parciais – uma proposta de arquitetura econômica versátil e integrada" ; *II ENAM – Encontro Nacional De Máquinas Rotativas*, Foz do Iguaçu, Brasil, Nov 2004.
- [48] BRANCATO, E. L., "The problems of Accelerated Aging", *IEEE Electrical Insulation Magazine*, Volume 2, Nº 2, Mar 1986.
- [49] WANG, L., MENDEL, J. M., "Generating Fuzzy Rules by Learning from Examples", *IEEE Trans. On Systems, Man, and Cybernetics*, Vol. 22, Nº 6, pp. 1414-1427, 1992.
- [50] MATLAB, 2004, "Fuzzy Logic Toolbox". In: The MathWorks Inc, MATLAB Online Documentation, version 6.5R13.
- [51] NETO, J. L. S., *Contribution Aux Algorithmes D'adaptation Par Logique Floue Appliqués À La Commande De La Machine Synchrones À Aimants Permanents*, Ph. D., Faculté Des Sciences Et De Génie Université Laval, Québec, 1999.
- [52] DUARTE, J. L. B., *Relatório de Viagem DER.O.006.2006*, Relatório Técnico ; DEER.O ; Furnas Centrais Elétricas, Rio de Janeiro, Brasil, Fev 2006.
- [53] DUARTE, J. L. B., *Relatório de Viagem DER.O.007.2006*, Relatório Técnico, DEER.O, Furnas Centrais Elétricas, Rio de Janeiro, Brasil, Fev 2006.
- [54] PEREIRA J. M. L., "Aplicação Do Baker No Diagnóstico De Falhas Em Enrolamentos De Máquinas Elétricas", *VI Seminário de Manutenção Elétrica de Equipamentos Rotativos*, Usina de Furnas, Passos, Minas Gerais, Brasil, 200
- [55] HENRIQUES, F. DE S., DUARTE, J. L. B., *Estudo sobre o estado do isolamento dos enrolamentos estatóricos das UGs 1 a 4 da USMM.O*, Nota técnica , DEER.O, Furnas Centrais Elétricas, Rio de Janeiro, Brasil, 2005.
- [56] HENRIQUES F. S., RIBEIRO A. B. U., SECCA L. F. P., *Proposta de uma Metodologia para Determinação do Fim da Vida Útil de Hidrogeradores*, Nota Técnica, DEER.O, Furnas Centrais Elétricas, mar/2007.
- [57] HAYKIN S., *Redes Neurais: Princípios e prática*, 2<sup>nd</sup> Ed., Editora Bookman, Porto Alegre, Brasil, 2001.
- [58] ARKAN, M., KOSTIC-PEROVIC, D., UNSWORTH, P. J., "Modelling and simulation of induction motors with inter-turn faults for diagnostics", *Electric Power Systems Research*, Received 20/04/2004 and Available on-line 4/05/2005.

- [59]** DUARTE, J. L. B., *Monitoração on-line de Descargas Parciais em Hidrogeradores*, Nota técnica DER.O.001.2006, DEER.O, Furnas Centrais Elétricas, Rio de Janeiro, Brasil, Jan 2006

# Apêndice A - Breve revisão teórica da máquina síncrona

## I. Análise Eletromagnética

As máquinas síncronas são divididas basicamente em dois grupos: máquinas com rotores de pólos salientes e máquinas de rotor liso.

As máquinas síncronas de pólos salientes têm como característica construtiva um grande número de pares de pólos, o que ocasiona velocidades de rotação relativamente baixas [equação 5]. Em contra partida as máquinas de rotores lisos possuem poucos pares de pólos e trabalham em altas velocidades de rotação.

A relação entre o número de pares de pólos das máquinas, sua velocidade de rotação e a freqüência da tensão gerada na armadura é comprovada ao observarmos a (5) , uma vez que a freqüência da tensão induzida é sempre mantida constante em 60Hz (no caso do Brasil).

As máquinas síncronas de pólos salientes são utilizadas principalmente em geradores hidráulicos (usualmente de eixo vertical, unidades grandes, pesadas e relativamente lentas), enquanto as máquinas de rotor liso são associadas aos turbogeradores (eixo horizontal, relativamente menores, mais leves e bem mais rápidas).

As Figuras A.I.1 e A.I.2 apresentam, respectivamente, uma vista superior da unidade geradora 1 da usina hidrelétrica de Luis Carlos Barreto, de 150 MW, e uma vista frontal da unidade geradora 1 de uma usina nuclear alemã, de 800 MW. Esses são exemplos de geradores síncronos de pólos salientes e lisos, respectivamente.



Figura A.I.1. – Vista superior da UG#1 – 175MW - da UHE Luiz Carlos Barreto.



Figura A.I.2. – Vista frontal de unidade turbogeradora nuclear – 800 MW.

Construtivamente os geradores síncronos possuem dois circuitos distintos: o circuito de campo posicionado no rotor e alimentado em corrente contínua através de um sistema de excitação; e o circuito de armadura, posicionado no estator, de onde se obtém a saída desejada, no caso a energia elétrica em tensão alternada.

A aplicação de corrente contínua, proveniente do sistema de excitação, aos enrolamentos do rotor, seguida pela movimentação do rotor (rotação)

dentro do corpo estático acarreta o surgimento de um campo magnético acoplado aos enrolamentos estáticos (lei de Biot e Savart, ou de maneira mais abrangente Lei de Ampère apresentada em (1)). Esse campo magnético é rotacional e sempre ortogonal a direção da corrente associada. Seu sentido depende do sentido da corrente que lhe deu origem [1] [3].

$$\int \vec{H} \cdot d\vec{l} = N.I ; \quad \text{Lei de Ampère} \quad (1)$$

Onde:  $\vec{H}$  = campo magnético ( $A.m^{-1}$ );

$d\vec{l}$  = elemento infinitesimal de linha de campo (m);

$\mu_0$  = coeficiente de permeabilidade magnética do vácuo ( $H.m^{-1}$ ,  $4\pi \times 10^{-7}$ , no SI) ;

$N$  = número de espiras do enrolamento (adimensional);

$I$  = corrente (A);

A densidade desse campo magnético ( $\vec{B}$ ), e a conseqüente densidade de fluxo magnético associada ( $\vec{\phi}_m$ ) e sua variação, são os efeitos magnéticos considerados como princípios básicos de funcionamento das máquinas elétricas. Em (2) e (3) define-se a densidade de campo magnético ( $\vec{B}$ ) e o fluxo magnético ( $\vec{\phi}_m$ ) através de uma superfície fechada definida, ainda segundo Ampère.

$$\vec{B} = \mu_0 \cdot \vec{H} ; \quad (2)$$

$$\int \vec{B} \times d\vec{S} = \vec{\phi}_m ; \quad (3)$$

Onde:  $\vec{B}$  = densidade de campo magnético (T,  $Wb.m^{-2}$ );

$\vec{H}$  = campo magnético ( $A.m^{-1}$ );

$\mu_0$  = coeficiente de permeabilidade magnética do vácuo ( $H.m^{-1}$ ,  $4\pi \times 10^{-7}$ , no SI) ;

$d\vec{S}$  = elemento infinitesimal de área ( $m^2$ );

$\vec{\phi}_m$  = densidade de fluxo magnético (Wb);

O estator (ou enrolamento de armadura) das máquinas síncronas trifásicas é construído a partir dos enrolamentos das fases. Esses enrolamentos são distribuídos de forma semelhante aos das máquinas assíncronas e podem ser enrolados de diversas maneiras, tais detalhes construtivos não pertencem ao escopo desse trabalho.

O núcleo magnético do estator é construído em aço laminado com ranhuras para alojar os condutores dos enrolamentos, os quais podem ser bobinas ou barras. O rotor, cujo núcleo pode ser em ferro sólido, possui um certo número de pares de pólos (idêntico ao do estator no caso das máquinas síncronas de pólos salientes) regularmente distribuídos ao longo de sua periferia [4][5].

A Figura A.I.3 apresenta um desenho representando uma vista em corte onde se pode ver em detalhes o estator e o rotor de um hidrogerador.

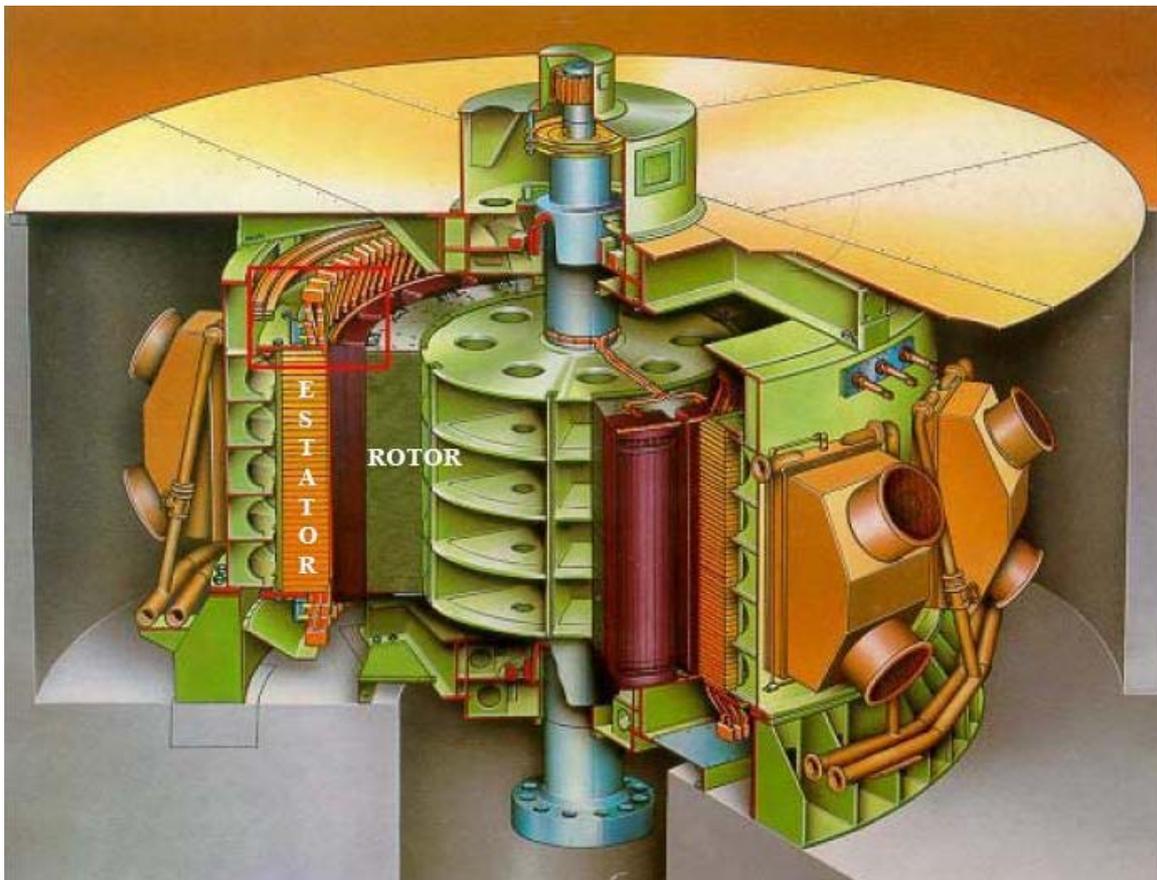


Figura A.I.3. – Vista em corte e detalhe do estator e do rotor de um hidrogerador.

O campo magnético acoplado ao rotor e produzido pela corrente de campo é girado pela energia mecânica fornecida à máquina e irá induzir a

criação de um campo magnético nos enrolamentos de armadura. Esse campo induzido irá acompanhar aquele que o originou, ou seja, uma vez acoplados ambos giram na mesma velocidade em regime permanente. Essa característica é responsável pela definição da nomenclatura da máquina, já que os campos de rotor e estator estão sempre em sincronia desde que a máquina se encontre em operação normal.

Ao associar-se um campo girante sobre um corpo com determinadas características eletromagnéticas varia-se concomitantemente o fluxo magnético através deste corpo. Observando um mesmo ponto fixo no espaço a densidade de campo associada a um elemento infinitesimal de área irá variar seu valor no tempo. Esta variação segue uma característica do tipo bipolar contínua, ou seja, variando de um patamar extremo negativo a um patamar extremo positivo, periodicamente.

Essa variação do fluxo sobre enrolamentos de armadura (condutores eletromagnéticos) do gerador ocasiona o surgimento de uma diferença de potencial induzida entre suas extremidades, como expresso em (4) (Lei de Faraday, Lenz). Esses dois fenômenos podem ser visualizados na Figura A.I.4.

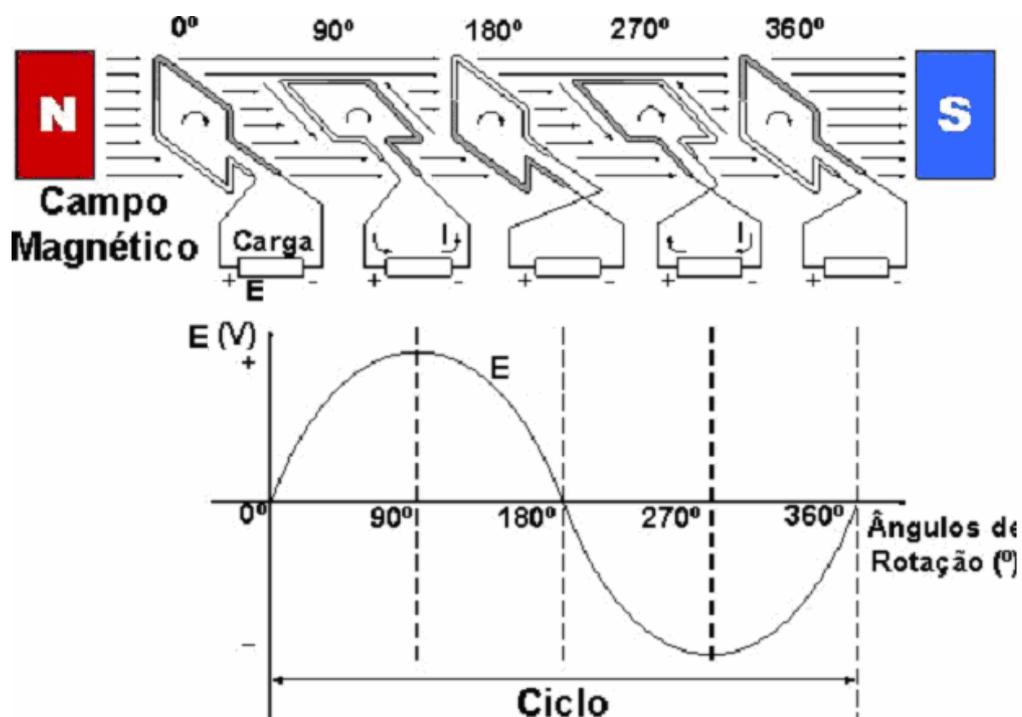


Figura A.I.4. – Variação de B e  $\varepsilon$  em um Gerador Síncrono.

A frequência da tensão induzida nos terminais dos enrolamentos do estator será proporcional à velocidade de rotação do campo magnético do rotor e ao número de pólos da máquina, como visto em (5).

Como visto em (4), e posteriormente em (6) na sua forma instantânea, a tensão induzida nas bobinas é proporcional à taxa de variação do fluxo magnético acoplado [1] [3].

$$\mathcal{E} = - \frac{d\phi_m}{dt} ; \quad \text{Lei de Faraday/Lenz} \quad (4)$$

Onde:  $\mathcal{E}$  = tensão induzida (V);

$\phi_m$  = fluxo magnético (Wb);

$$f_{armadura} = \frac{n \times p}{120} ; \quad \text{Frequência da tensão de armadura} \quad (5)$$

Onde:  $f_{armadura}$  = frequência (Hz);

$n$  = velocidade do rotor (RPM);

$p$  = número de pólos da máquina (adimensional).

$$\mathcal{E} = N * \phi_m * \text{sen}\omega t ; \quad (6)$$

Onde:  $\mathcal{E}$  = fmm induzida (V);

$\phi_m$  = fluxo magnético enlaçado pela bobina (Wb);

$N$  = número de espiras enlaçando  $\phi_m$  ;

$\omega t$  = posição angular do elemento no tempo.

As Figuras A.I.5. e A.I.6. [6] apresentam, respectivamente, desenho esquemático representando um corte transversal de um gerador síncrono de pólos salientes com quatro pólos e a distribuição da força magnetomotriz (fmm) nos seus enrolamentos de armadura. Essa seria a formação típica de turbogeradores com 4 pólos

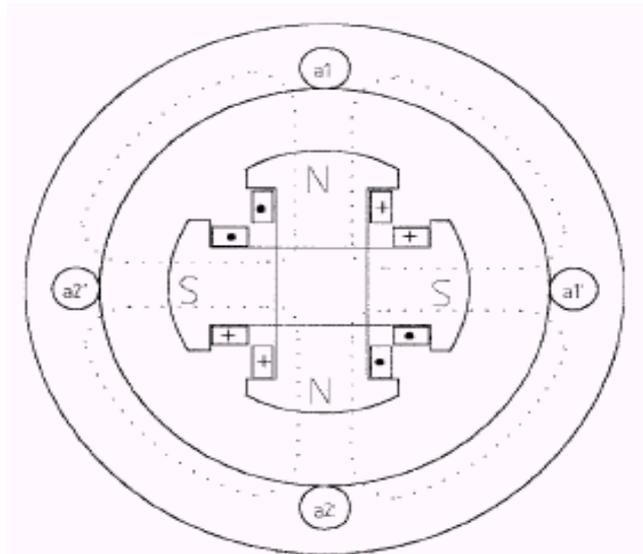


Figura A.1.5. – Gerador Síncrono de pólos salientes, quatro pólos.

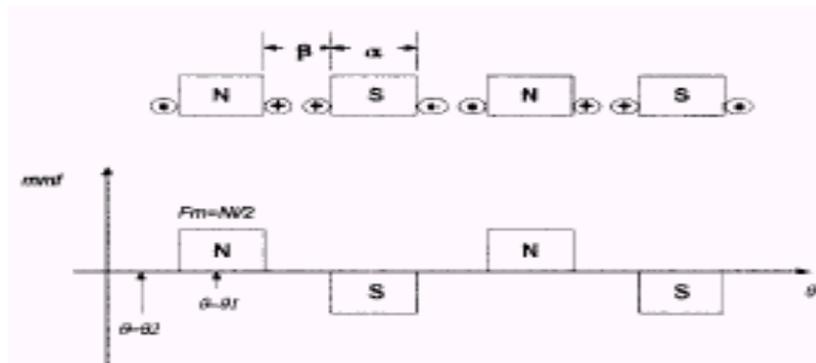


Figura A.1.6. – Distribuição da fmm nos enrolamentos do Gerador Síncrono.

O comportamento eletromecânico da maioria das máquinas síncronas pode ser analisado a partir das equações que descrevem a máquina síncrona trifásica de pólos salientes. Em particular essas equações podem ser utilizadas para modelar a atuação de geradores síncronos (com turbinas a vapor / gás ou hidráulicas), motores síncronos, e com pequenas modificações motores de relutância [1].

Como mencionado anteriormente o rotor de uma máquina síncrona é equipado com o enrolamento de campo e pode possuir também um ou mais enrolamentos amortecedores, para compensar efeitos eletromagnéticos indesejados, entre outros fatores.

O chamado “circuito de armadura” situa-se no estator e é constituído de 3 enrolamentos distintos, representando as três fases do circuito elétrico de saída. Construtivamente esses enrolamentos podem apresentar várias nuances, não estudadas para este trabalho.

Existe uma grande variedade de modelos matemáticos que visam estabelecer relações entre as variáveis das máquinas síncronas, tais como corrente de estator e rotor, tensão de armadura, torque elétrico e torque mecânico.

Para as máquinas síncronas de pólos salientes a construção do rotor não apresenta forma simétrica, devido ao formato dos pólos. Desse modo não há maiores vantagens em se desenvolver transformações matemáticas de coordenadas para o estudo de suas variáveis.

Por outro lado as variáveis com referência no estator podem ser transformadas para facilitar sua análise. Existem várias possibilidades quanto à base, referência e coordenadas a serem utilizadas. Nesse exemplo o desenvolvimento será feito a partir do modelo nas variáveis de Park, normalizado na base da reatância mútua ou recíproca ( $X_{ad}$ ), desprezando-se o acoplamento adicional entre os circuitos do rotor [7].

A Tabela A.I.1. apresenta o conjunto de equações para o Gerador Síncrono de pólos salientes (hidrogerador). Nesse caso o rotor é representado por três enrolamentos: F, D e Q ; enquanto o estator basicamente pelos enrolamentos d e q [7].

Tabela A.I.1. – Equações de tensão e corrente das Máquinas Síncronas.

Transformação de Variáveis de Park		
Máquina Síncrona de Pólos Salientes		
	Estator	Rotor
<b>Eixos d e Q</b>	$V_d = \frac{d\lambda_d}{dt} - r_i i_d - \omega \lambda_q$ $\lambda_d = -L_d i_d + L_{ad} (i_F + i_D)$	$V_D = \frac{d\lambda_D}{dt} + r_D i_D$ $\lambda_D = L_D i_D + L_{ad} (i_F - i_d)$
<b>Eixos q e Q</b>	$V_q = \frac{d\lambda_q}{dt} - r_i i_q + \omega \lambda_d$ $\lambda_q = -L_q i_q + L_{ad} i_Q$	$V_Q = \frac{d\lambda_Q}{dt} + r_Q i_Q$ $\lambda_Q = -L_{aq} i_q + L_Q i_Q$
<b>Eixos 0 e F</b>	$V_0 = \frac{d\lambda_0}{dt} - r_0 i_0$ $\lambda_0 = -L_0 i_0$	$V_F = \frac{d\lambda_F}{dt} + r_F i_F$ $\lambda_F = L_F i_F + L_{ad} (i_D - i_d)$

As equações apresentadas representam o modelo básico para estudos elétricos para a máquina em questão. Desenvolvendo esse grupo de acordo com a finalidade em estudo pode-se lançar mão de uma série de simplificações.

A quantidade de efeitos e/ou parâmetros a serem considerados, está diretamente relacionada com a finalidade para a qual se pretende utilizar o modelo. É importante ressaltar que por mais preciso que seja o modelo utilizado, dificilmente será capaz de representar com perfeição a máquina sob estudo.

Para este trabalho em particular não será necessário estender a modelagem matemática da máquina síncrona, basta entender os conceitos e suas possibilidades.

## II. Análise mecânica

Turbinas hidráulicas e geradores hidrelétricos vêm-se sujeitos a forças e condições operacionais únicas, relacionadas às suas características construtivas e configurações de trabalho. Essas forças, de origem mecânica e eletromagnética, afetam a estrutura e as características construtivas dos equipamentos de maneira diferenciada, de acordo com o momento observado.

As velocidades de rotação as quais são submetidos esses equipamentos (consideradas relativamente baixas) variam geralmente entre 60 e 600 RPM (máquinas síncronas de pólos salientes com um elevado número de pares de pólos mantém velocidades de operação baixas, ver equação 5). Por se tratar de máquinas de grande porte, com rotores horizontais não raramente na casa dos 10m de diâmetro e mais de 1000 toneladas de peso, a quantidade de movimento envolvida é imensa, assim como a energia cinética associada (equações 7 e 8) [8].

$$p = m \cdot V \quad ; \quad \text{Quantidade de movimento (momento)} \quad (7)$$

Onde:  $p$  = quantidade de movimento, momento (N);

$m$  = massa do elemento (kg);

$V$  = velocidade tangencial no ponto de observação (m/s);

$$E_c = \frac{m \cdot V^2}{2} ; \quad \text{Energia cinética acumulada} \quad (8)$$

Onde:  $E_c$  = energia cinética associada (J);

$m$  = massa do elemento (kg);

$V$  = velocidade tangencial no ponto de observação (m/s);

A considerável massa física dos hidrogenadores, associada a sua operação em baixa rotação tendem a aumentar a quantidade de movimento envolvida para largas amplitudes em baixas frequências de vibração. Esse fenômeno exige especial atenção para a capacidade de resposta da unidade em baixa frequência.

Dispensa comentários o fato de que qualquer elemento de deslocamento ou vibração dessa massa pode vir a causar sérios danos ao conjunto de equipamentos envolvido, assim como aos seus arredores.

Esse processo fica mais evidente para máquinas de alta velocidade, como os turbogeradores, já que a parcela de velocidade na equação 8 aparece em forma quadrática.

A Figura A.II.1. apresenta o que restou de um turbogerador (em operação em uma UTE no México) após falha em um de seus anéis de retenção. A falha ocorreu após uma seqüência de eventos negativos, o excesso de vibração acarretou trincas nos anéis de retenção, associadas a uma falha no sistema de proteção tornaram a situação incontrolável. Durante essa ocorrência houve uma dupla contingência (falha no sistema de proteção), o que fez com que a máquina continuasse a rodar mesmo sob falha e se destruísse por completo.

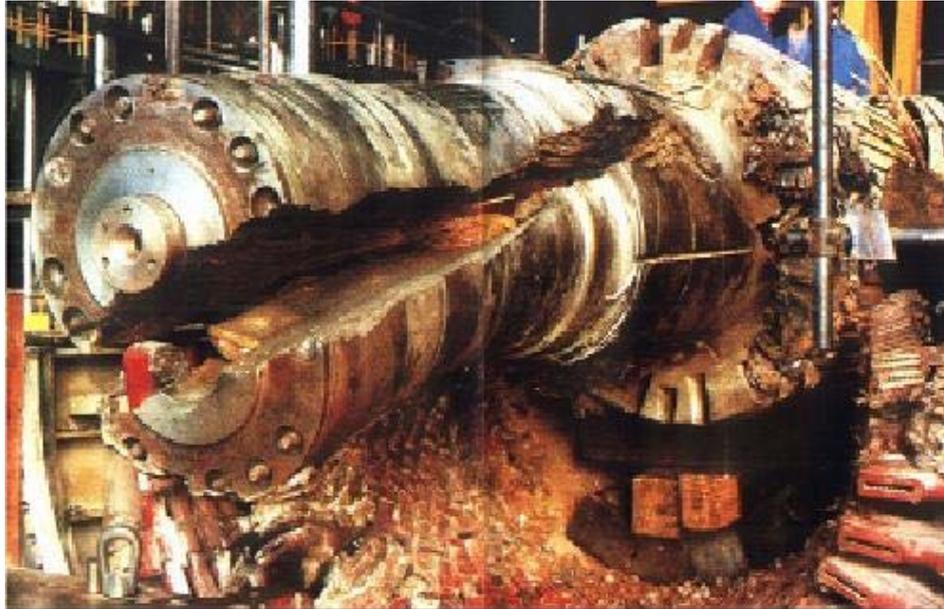


Figura A.II.1. – Ocorrência destrutiva em turbogerador.

A grande maioria das usinas modernas possui sistemas de monitoramento e acompanhamento de vibração. Esse é um fator primordial, em se tratando de monitoramento da condição de máquinas elétricas, principalmente no caso dos turbogeradores. Um sistema de monitoramento eficaz seria capaz de sinalizar aos operadores que essa máquina estaria sob condições perigosas de operação.

# Apêndice B - Programa “Modelo1” em Matlab®

*[System]*

*Name='modelo1'*

*Type='mamdani'*

*Version=2.0*

*NumInputs=5*

*NumOutputs=1*

*NumRules=41*

*AndMethod='min'*

*OrMethod='max'*

*ImpMethod='min'*

*AggMethod='max'*

*DefuzzMethod='centroid'*

*[Input1]*

*Name='DPF'*

*Range=[0 10]*

*NumMFs=4*

*MF1='MUITO..BAIXO':'trimf',[-3.333 -1.11e-016 3.5]*

*MF2='BAIXO':'trimf',[0.5 4 6.5]*

*MF3='ALTO':'trimf',[4 6.5 9.5]*

*MF4='MUITO..ALTO':'trimf',[7 10 13.33]*

*[Input2]*

*Name='DPA'*

*Range=[0 10]*

*NumMFs=4*

*MF1='MUITO..BAIXO':'trimf',[-3.333 0 3]*

*MF2='BAIXO':'trimf',[0.5 2.5 6.5]*

MF3='ALTO':'trimf',[3.5 6.5 10]  
MF4='MUITO..ALTO':'trimf',[7 10 13.33]

[Input3]

Name='TXDP'  
Range=[0 10]  
NumMFs=4  
MF1='NEGATIVA':'trimf',[-3.333 0 3]  
MF2='NULA':'trimf',[0.5 3.5 6.5]  
MF3='POSITIVA':'trimf',[3.5 7.5 9.5]  
MF4='MUITO..POSITIVA':'trimf',[7 10 13.33]

[Input4]

Name='TEMP'  
Range=[0 10]  
NumMFs=3  
MF1='BAIXO':'trapmf',[-3.6 -0.4 1 5]  
MF2='NORMAL':'trimf',[1.5 5 8.5]  
MF3='ALTO':'trapmf',[5 9 10.4 13.6]

[Input5]

Name='IDADE'  
Range=[0 10]  
NumMFs=4  
MF1='NOVO':'trapmf',[-3 -0.3333 1 4]  
MF2='MADURO':'trimf',[1 4.5 7]  
MF3='VEHO':'trimf',[4 6 10]  
MF4='MUITO..VELHO':'trimf',[7 10 13.33]

[Output1]

Name='ESTRESSE'  
Range=[0 100]  
NumMFs=4  
MF1='BAIXO':'trimf',[-33.33 4.441e-016 40]  
MF2='MODERADO':'trimf',[10 40 70]  
MF3='ALTO':'trimf',[40 60 100]

MF4='MUITO..ALTO': 'trimf', [70 100 133.3]

[Rules]

0 0 0 3 0, 3 (1) : 1  
2 2 0 2 0, 1 (1) : 1  
1 1 0 2 0, 1 (1) : 1  
1 2 0 2 0, 1 (1) : 1  
2 1 0 2 0, 1 (1) : 1  
2 1 0 1 0, 1 (1) : 1  
2 2 0 1 0, 1 (1) : 1  
1 2 0 1 0, 1 (1) : 1  
1 1 0 1 0, 1 (1) : 1  
3 3 0 0 3, 2 (1) : 1  
4 3 0 0 3, 2 (1) : 1  
3 3 0 0 4, 4 (1) : 1  
4 3 0 0 4, 4 (1) : 1  
3 3 2 0 0, 2 (1) : 1  
3 3 1 0 0, 1 (1) : 1  
4 3 1 0 0, 1 (1) : 1  
4 3 2 0 0, 2 (1) : 1  
3 3 3 0 0, 3 (1) : 1  
3 3 4 0 0, 4 (1) : 1  
2 3 4 0 0, 4 (1) : 1  
2 3 3 0 0, 3 (1) : 1  
4 4 3 0 0, 4 (1) : 1  
4 3 3 0 0, 4 (1) : 1  
3 4 3 0 0, 4 (1) : 1  
0 0 3 0 0, 3 (1) : 1  
3 3 0 0 1, 3 (1) : 1  
3 3 0 0 2, 2 (1) : 1  
4 3 0 0 1, 4 (1) : 1  
4 4 0 0 1, 4 (1) : 1  
3 4 0 0 1, 4 (1) : 1  
3 4 0 0 2, 4 (1) : 1  
4 4 0 0 2, 4 (1) : 1  
4 4 4 0 0, 4 (1) : 1

4 4 1 0 0, 2 (1) : 1  
4 4 2 0 0, 2 (1) : 1  
1 4 4 0 0, 3 (1) : 1  
4 1 4 0 0, 3 (1) : 1  
2 1 4 0 0, 3 (1) : 1  
1 2 4 0 0, 3 (1) : 1  
2 2 3 0 0, 3 (1) : 1  
2 2 4 0 0, 4 (1) : 1