

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

RENATO LELIO DA SILVA SANTOS

**O ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO CICLO DE PARTIDAS E
PARADAS NO ESTATOR DE GERADORES SÍNCRONOS**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

BELÉM - PA

2011

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

**O ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO CICLO DE PARTIDAS E
PARADAS NO ESTATOR DE GERADORES SÍNCRONOS**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Instituto de Tecnologia da Universidade Federal do Pará como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica com ênfase em Processos Industriais.

RENATO LELIO DA SILVA SANTOS

ORIENTADOR: PROF. DR. ROBERTO CÉLIO LIMÃO DE OLIVEIRA

BELÉM - PA

2011

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

RENATO LELIO DA SILVA SANTOS

TÍTULO: O Estudo da influência do ciclo de partidas e paradas no estator de geradores síncronos

Esta Dissertação foi julgada e aprovada para a obtenção do título de **Mestre em Engenharia Elétrica na Área de Concentração em Processos Industriais do Programa de Pós-Graduação Strictu Sensu em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Pará – ITEC – UFPA**

Prof. Dr. José Antonio de Souza Silva
Coordenador - UFPA

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Sandro Dimy Barbosa Bitar
Membro - UFAM

Prof. Dr. Emanuel Negrão Macêdo
Membro - UFPA

Prof. Dr. Roberto Célio Limão de Oliveira
Orientador – UFPA

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, Antônio e Irenilde, pelo estímulo e carinho constantes.

À minha esposa Cristina, pelo seu amor e compreensão.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por cuidar da minha vida e permitir que eu pudesse chegar até aqui.

À minha família, que sempre torceu por mim.

À Universidade Federal do Pará - UFPA.

Ao Instituto de Tecnologia e Educação Galileo da Amazônia - ITEGAM.

Aos Professores Dr. Roberto Célio Limão de Oliveira e M.Sc. Jandecy Cabral Leite, pela orientação e apoio para a realização deste trabalho.

Ao Eng. Norberto Bramatti da Eletrobrás Eletronorte, pelas valiosas sugestões.

Ao Eng. Rubens Seixas da Eletrobrás Amazonas Energia, por me conceder os resultados dos ensaios.

Aos colegas e professores do curso.

A todos que, direta e indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

Epígrafe:

*“A natureza está pronta a nos ajudar desde que
façamos a nossa parte.”*

Max Freedom Long

RESUMO

SANTOS, R. L. S. **O ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO CICLO DE PARTIDAS E PARADAS NO ESTATOR DE GERADORES SÍNCRONOS.** Dissertação de Mestrado. Instituto de Tecnologia. Universidade Federal do Pará, Belém, 2011. 88 p.

Os geradores síncronos se submetem a diferentes situações de paradas para desligamento forçado, desligamento por condições externas, desligamento programado para manutenção corretiva e preventiva. As diferentes variações de temperatura em que se submete o gerador síncrono, precisamente, ao seu estator, afeta o seu isolamento, que não acompanha essas constantes variações, devido ter um coeficiente de dilatação diferente. No presente trabalho busca-se identificar uma tendência de progressão do envelhecimento do isolamento de seus enrolamentos estatóricos em máquinas que sofrem repetitivas partidas e paradas e que ficam com sua reserva de energia desligada por muitas horas. O estudo foi aplicado nos cinco geradores síncronos da usina hidrelétrica de Balbina, pertencente ao grupo Eletrobrás, que apresenta tal problema. Esse estudo vem comprovar os ensaios de análise de descargas parciais dos geradores síncronos realizados periodicamente para diagnosticar problemas nos seus enrolamentos estatóricos que apresentam diferentes magnitudes e confirmar a hipótese de que máquinas que apresentam maiores magnitudes de descargas parciais em seus estatores são as que se submetem maiores quantidades de partidas e paradas e horas com energia de reserva desligada.

Palavras-Chave: *descargas parciais, gerador síncrono, enrolamentos estatóricos.*

ABSTRACT

SANTOS, R. L. S. **THE STUDY OF THE INFLUENCE OF CYCLE IN STARTING AND STOPS FOR GENERATOR SYNCHRONOUS STATOR.** Master degree Dissertation. Institute of Technology – Federal University of Pará, Belém, 2011. 88 p.

The synchronous generators under different stops situations forced shutdown, shutdown by external conditions, scheduled for corrective and preventive maintenance. The different variations in temperature that undergoes a synchronous generator, exactly to its stator affects its isolation, which does not follow these constant changes, due to have a different coefficient of expansion. In the present work has identified a trend of progressive aging of the insulation of stator windings in their machines that suffer repetitive starting and stopping and staying with his reserve power off for several hours. The study was implemented in five synchronous generators Balbina hydroelectric of Eletrobras group, which presents such a problem. This study confirms for the tests of analysis of partial discharge of the synchronous generators performed periodically to diagnose problems in their stator windings, with different magnitudes and identify the thesis that machines that have larger magnitudes of partial discharges off in their stators are undergoing more amounts of starting and stopping and staying with the most hours with standby power off.

Key Words: *partial discharge, synchronous generator, stator winding.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Esquemático de uma usina hidrelétrica	26
Figura 2.2 - Arquitetura geral de um sistema de prognóstico	32
Figura 2.3 - Elementos básicos de diagnóstico e prognóstico para manutenção baseada em condição	32
Figura 2.4 - Estatísticas de Falhas IEEE e EPRI	36
Figura 2.5 - Pagamentos de sinistro seguradora Allianz, de 1996 a 1999	36
Figura 3.1 - UHE Itaipu: núcleo e enrolamento do estator	42
Figura 3.2 - Barras meia bobina ou barras Roebel	42
Figura 3.3 - Seção transversal de uma barra	43
Figura 3.4 - Tipos de descarga parciais: (a) superficial, (b) corona, (c) interna	46
Figura 3.5 - Aparecimento do pulso PD muito rápido	46
Figura 3.6 - Modelo a-b-c do vazio no isolamento	48
Figura 3.7 - Foto ilustrativa de impregnação inadequada	51
Figura 3.8 - Falha na cobertura semicondutora	51
Figura 3.9 - Foto ilustrando enrolamento solto da ranhura	52
Figura 3.10 - Exemplo de centelhamento por vibração	53
Figura 3.11 - Foto de uma deterioração da interface de alívio de tensão	54
Figura 3.12 - Foto de um exemplo de espaçamento inadequado	55
Figura 3.13 - Foto ilustrando um exemplo de más conexões elétricas	55
Figura 3.14 - Foto ilustrando um exemplo de delaminação	56
Figura 3.15 - Foto de um exemplo de comportamento de ruptura por causa do ciclo de carga	57
Figura 3.16 - Foto de exemplo de contaminação devido a poeiras	58
Figura 4.1 - Arquitetura da montagem dos sensores no final do enrolamento de cada máquina	62

Figura 4.2 - Espectro de freqüência típico para ruído e PD em motores e geradores	63
Figura 4.3 - Foto do PDA-IV com os três pares de acopladores conectados	64
Figura 5.1 - foto da usina hidrelétrica de Balbina	66
Figura 5.2 - Vista superior das 5 unidades geradoras	67
Figura 5.3 - Histórico dos ensaios de descargas parciais NQN da UGH-01	70
Figura 5.4 - Histórico dos ensaios de descargas parciais NQN da UGH-02	70
Figura 5.5 - Histórico dos ensaios de descargas parciais NQN da UGH-03	71
Figura 5.6 - Histórico dos ensaios de descargas parciais NQN da UGH-04	71
Figura 5.7 - Histórico dos ensaios de descargas parciais NQN da UGH-05	72
Figura 5.8 - Histórico da quantidade de horas paradas das UGH 1 a 5 no referido período de 2005	73
Figura 5.9 - Histórico da quantidade de horas paradas das UGH 1 a 5 no referido período no período de 2006	74
Figura 5.10 - Histórico da quantidade de horas paradas das UGH 1 a 5 no referido período de 2007	75
Figura 5.11 - Histórico da quantidade de horas paradas das UGH 1 a 5 no referido período de 2008	76
Figura 5.12 - Medidas das magnitudes de descargas parciais	78

LISTA DE TABELAS

Tabela 5.1 - Resultados de ensaios do PDA-H – NQN dada em mV	69
Tabela 5.2 - Histórico de tempo em horas das unidades geradoras em que ficaram paradas no período de 2005	73
Tabela 5.3 - Histórico de tempo em horas das unidades geradoras em que ficaram paradas do período de 2006	74
Tabela 5.4 - Histórico de tempo em horas das unidades geradoras em que ficaram paradas do período de 2007	75
Tabela 5.5 - Histórico de tempo em horas das unidades geradoras em que ficaram paradas do período de 2008	76
Tabela 5.6 - Magnitudes medidas de descargas parciais do PDA-IV - Qm dada em mV	77
Tabela 5.7 - Quantidade distribuída do número de partida e paradas	79
Tabela 5.8 - Quantidade de horas em operação de cada unidade geradora hidráulica	79

LISTA DE QUADROS

Quadro 3.1 - Mecanismos de falhas, sintomas e testes de detecção de impregnação Inadequada	50
Quadro 3.2 - Mecanismos de falhas, sintomas e testes de detecção de Falhas na cobertura semicondutora	51
Quadro 3.3 - Mecanismos de falhas, sintomas e testes de detecção de Enrolamento solto	52
Quadro 3.4 - Mecanismos de falhas, sintomas e testes de detecção de centelhamento por vibração	53
Quadro 3.5 - Mecanismos de falhas, sintomas e testes de detecção de interface de alívio de tensão	54
Quadro 3.6 - Mecanismos de falhas, sintomas e testes de detecção de espaçamento inadequado	54
Quadro 3.7 - Mecanismos de falhas, sintomas e testes de detecção de má conexão elétrica	55
Quadro 3.8 - Mecanismos de falhas, sintomas e testes de detecção de deterioração térmica	56
Quadro 3.9 - Mecanismos de falhas, sintomas e testes de detecção devido ao ciclo de carga	56
Quadro 3.10 - Mecanismos de falhas, sintomas e testes de detecção por contaminação de enrolamentos	58

LISTA DE SÍMBOLOS E SIGLAS

\vec{H}	Campo magnético
\vec{dl}	Elemento infinitesimal de linha de campo
μ_0	Coeficiente de permeabilidade magnética do vácuo
N	Número de espiras do enrolamento
I	Corrente elétrica
ϕ	Fluxo magnético
P	Potência gerada
g	Aceleração da gravidade
η	Rendimento
R	Resistência
Hz	Hertz
kV	Kilovolts
°C	Grau Celsius
MW	Megawatts (Potência Ativa)
MVA _r	Megavolts – ampére reativo
MVA	Megavolts – ampére
mV	Milivolts
mm	Milímetros
CA	Corrente Alternada
ns	Nanosegundos
f	Frequência
T	Período
km	Kilômetros
h	Horas

BA	Balbina
DP	Descarga Parcial
EPRI	Electric Power Research Institute
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
Fd	Fator de disponibilidade média
FLC	Full Load Cold
FLH	Full Load Hot
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
NLC	No Load Cold
NLH	No Load Hot
NQN	Número de Quantidade Normalizada
NPd	Número de paradas
NPt	Número de partidas
PD	Partial Discharge
PDA	Partial Discharge Analyzer
SIN	Sistema Interligado Nacional
TEIF	Taxa Equivalente de Indisponibilidade Forçada
TEIP	Taxa Equivalente de Indisponibilidade Programada
UGH	Unidade Geradora Hidráulica

SUMÁRIO

RESUMO

ABSTRACT

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

LISTA DE QUADROS

LISTA DE SÍMBOLOS E SIGLAS

CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO

1.1 - IDENTIFICAÇÃO E JUSTIFICATIVA DO TRABALHO 20

1.2 - OBJETIVOS DO TRABALHO 20

1.2.1 - Objetivos Gerais 20

1.2.2 - Objetivos Específicos 21

1.3 - DELIMITAÇÕES DO ESTUDO 21

1.4 - ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO 22

CAPÍTULO 2: PLANEJAMENTO DE PARTIDAS/PARADAS EM HIDROGERADORES E DIAGNÓSTICO DE FALHAS

2.1 - PLANEJAMENTO DE DESPACHO: CUSTOS PARTIDA/PARADA 23

2.1.1 - Ganhos de disponibilidade de geração de máquinas hidráulicas	24
2.2 - USINA HIDRELÉTRICA	25
2.2.1 - Funcionamento de um hidrogerador	27
2.2.2 - Potência Gerada	28
2.2.3 - Perdas Elétricas no Hidrogerador	29
2.3 - MONITORAÇÃO E DIAGNÓSTICO DE FALHAS DEVIDO AO CICLO DE CARGA DOS GERADORES	30
2.3.1 - Conceito de Diagnóstico de Falhas	31
2.3.2 - História do serviço e manutenção de hidrogeradores	33
2.3.3 - Tipos de Falhas decorrentes em hidrogeradores	33
2.3.4 - Esforços atuantes sobre os hidrogeradores	35
2.3.5 - Esforços que afetam o isolamento de enrolamentos estatóricos de hidrogeradores	37
2.4 – CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO	40
CAPÍTULO 3: DETECÇÃO, MEDIDA E ANÁLISE DE DESCARGAS PARCIAIS NO ISOLAMENTO DO ENROLAMENTO ESTATÓRICO DE GERADORES SÍNCRONOS	
3.1 - Construção dos enrolamentos estatóricos em geradores síncronos (hidrogeradores)	41
3.1.1 - Isolamento do Enrolamento Estatórico	43
3.2 - DESCARGAS PARCIAIS	44
3.2.1 - Definição e classificação de Descargas Parciais	44
3.2.2 - Condições para ocorrências de Descargas Parciais	46

3.2.3 - Descargas Parciais em tensão alternada	47
3.2.4 - Degradação de descargas parciais causadas por Falhas de esforços atuantes	50
3.2.5.1 - Impregnação Inadequada: Fabricação	50
3.2.5.2 - Descargas na Ranhura: Falhas na Cobertura Semicondutora	51
3.2.5.3 - Descargas na Ranhura: Enrolamento Solto	52
3.2.5.4 - Centelhamento por Vibração: Fabricação	53
3.2.5.5 - Deterioração da Interface de Alívio de Tensão: Fabricação	54
3.2.5.6 - Espaçamento Inadequado: Instalação	54
3.2.5.7 - Conexões Elétricas Pobres: Instalação	55
3.2.5.8 - Deterioração Térmica: Operação	56
3.2.5.9 - Ciclos de Carga: Operação	56
3.2.5.10 - Contaminação dos Enrolamentos: Operação	58
3.3 - CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO	58
 CAPÍTULO 4: PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	
4.1 - ESPECIFICAÇÃO DO PROBLEMA DA PESQUISA	60
4.2 - COLETAS DE DADOS	61
4.3 - ANÁLISE DE DESCARGAS PARCIAIS	62
4.3.1 - Tipos de metodologias de ensaios utilizados	63
4.3.2 - Metodologia dos testes do Analisador de Descargas Parciais – PDA	64

CAPÍTULO 5: ESTUDO DE CASO: UHE BALBINA – ELETROBRÁS

5.1 - APRESENTAÇÃO DO CENÁRIO	66
5.2 - MÉTODO DE ANÁLISE	67
5.3 - ANÁLISES DOS RESULTADOS	68
5.3.1 - Ensaaios com PDA-H	68
5.3.1.1 - Resultados da UGH-01 a UGH-5 com PDA-H	69
5.3.1.2 - Histórico de paradas das unidades geradoras 1 a 5	72
5.3.2 - Ensaaios com PDA-IV	77
5.3.2.1 - Resultados da UGH-01 a UGH-5 com PDA-IV	77
5.3.2.2 - Histórico das unidades geradoras 1 a 5	78
5.4 - DISCUSSÕES DOS RESULTADOS	80

CAPÍTULO 6: CONSÍDERAÇÕES FINAIS

6.1 – CONCLUSÕES	82
6.2 - SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	83

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

A natureza dos sistemas com forte predominância hidráulica torna necessário um planejamento de operação sobre um horizonte de longo prazo, tendo em vista as variações anuais dos recursos hídricos e das demandas de cargas. Em função deste longo período de planejamento, e da própria complexidade do problema, uma cadeia de planejamento é estabelecida a partir do alcance de suas decisões no tempo, em planejamento de curto, médio e longos prazos (PROVENÇANO, 2003).

O planejamento da operação de curto prazo (um dia à frente) de sistemas de energia elétrica consiste na determinação de um programa de produção de energia elétrica para o próximo dia, sendo denominado como problema de pré-despacho. Neste processo, é importante escolher adequadamente o número de máquinas (conjunto turbina/gerador) em operação em cada intervalo de tempo, pois esta decisão tem grande influência sobre a eficiência do sistema, e sobre os custos de partida/parada e de manutenção (NILSSON & SJELVGREN, 1997b). A variação da curva de carga ou da geração programada ao longo do dia proporciona um freqüente acionamento e desligamento de máquinas no sentido de manter o equilíbrio entre a carga e a geração, de modo que são inevitáveis as partidas e paradas ao longo do dia. Com isso ocasionando algumas perdas elétricas no gerador.

Com essa variação da curva de carga máquinas, no sentido de manter o equilíbrio entre a carga e a geração, acaba afetando o isolamento do enrolamento estático ao longo do tempo, ocasionando descargas parciais dentro da ranhura do estator e das barras nas cabeças das bobinas, e como citado anteriormente é um dos principais custos de partida e parada, objeto de estudo desta dissertação. O sintoma de descargas parciais acontece nos enrolamentos dos estatores, fruto destas partidas e paradas, causou e está causando preocupação aos mantenedores de usinas hidráulicas, que estão tomando medidas cautelosas para controlar por meio de metodologias de medições a fim de diagnosticar as causas para programação de manutenções futuras no intuito de sanar os defeitos.

1.1 IDENTIFICAÇÃO E JUSTIFICATIVA DO TRABALHO

No sistema atual de geração de energia elétrica, as buscas incessantes da maximização do lucro, a competição, estão pressionando os produtores de energia elétrica arcar com energia disponível para atender as demandas das indústrias. Então paradas não planejadas com aumento da quantidade e custos de manutenção, todos os sérios problemas que ocorrem devido à falta de confiabilidade e falhas de equipamentos, o tal ciclo vicioso - operação, falhas e reparos - fizeram com que os mantenedores tomassem um passo fundamental na estratégia de manutenção de geradores (SANTOS, 2010), diante desse cenário, a fim solucionar esse problema, vários pesquisadores e estudiosos na área de grandes máquinas rotativas, descobriram que nestas falhas, quase sempre apareciam sintomas de grandes descargas parciais, prejudicando bastante a saúde da máquina.

Então, por isso, para o presente trabalho surgiu à necessidade de se estudar as descargas parciais que acontecem nos enrolamentos estatóricos de geradores síncronos, que na maioria das vezes, são antecipações dessas falhas elétricas, nas quais são originadas por diversas causas, uma delas é a grande quantidade (ciclo) de partidas e paradas, que acaba prejudicando e diminuindo à vida útil desses geradores.

Conforme apresentado, a contribuição deste trabalho é comprovar estudos já realizados com descargas parciais, a fim de mostrar e analisar uma causa associada a esse fenômeno e tirar conclusões acerca do assunto proposto que já vem sendo estudado por vários pesquisadores na área de máquinas rotativas de alta tensão, e propor um planejamento de operação a fim de minimizar as partidas e paradas, contribuindo então, para uma maior vida útil das máquinas, no caso os geradores síncronos em estudo.

1.2 - OBJETIVOS DO TRABALHO

1.2.1 - Objetivos Gerais

O objetivo geral deste trabalho é fazer um estudo da influência do ciclo de partidas e paradas em geradores síncronos (hidrogeradores) através dos resultados de ensaios da análise de descargas parciais com o desempenho da geração, com isso verificar se é um fator significativo (grande quantidade de partidas e paradas e

horas com energia de reserva desligada) para a diminuição da vida útil no estator (isolamento dos enrolamentos) desses geradores síncronos.

1.2.2 - Objetivos Específicos

Podem-se listar os seguintes objetivos específicos:

- Apresentar os conceitos de descargas parciais, metodologias de ensaios para análise;
- Apresentar as tecnologias empregadas na medição de descargas parciais;
- Apresentar os aspectos construtivos dos geradores síncronos;
- Realizar um estudo de caso aplicado à usina hidrelétrica de Balbina para verificar o desenvolvimento do assunto estudado na dissertação;
- Apresentar dados de desempenho de geração e descrever conceitos sobre partidas e paradas das máquinas hidrogeradoras;
- Apresentar resultados qualitativos e quantitativos considerando os ensaios na metodologia realizada.

1.3 - DELIMITAÇÕES DO ESTUDO

A pesquisa é adaptável a qualquer usina hidrelétrica, mas especificamente foi realizada nas unidades geradoras hidráulicas (UGHs) da usina hidrelétrica de Balbina, referida usina, localizada no estado do Amazonas, que é dotada de cinco unidades geradoras com capacidade total de geração de 250 MW. Foram instalados sensores, precisamente dois pares de capacitores nas três fases de cada unidade geradora hidráulica, totalizando três pares para medições de parâmetros como descargas parciais.

Todos os parâmetros coletados para realização da pesquisa são:

- Descargas Parciais dos enrolamentos em cada fase do estator;
- Temperatura do enrolamento e do núcleo do estator;
- Coleta da potência gerada de cada hidrogerador;

- Análise do tempo de cada hidrogerador que ficou com a reserva de energia desligada, extraindo a disponibilidade de geração e o seu desempenho para se medir o quantitativo de partidas e paradas;

1.4 - ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

O presente trabalho está estruturado em seis capítulos. No **primeiro capítulo**, é apresentada uma introdução sobre o tema abordado, as justificativas para a escolha do tema, os objetivos a serem alcançados. No final deste capítulo são descritas as delimitações do estudo.

No **segundo capítulo** é constituído pela revisão bibliográfica sobre os assuntos pertinentes ao tema da dissertação. Através da revisão, procura-se apresentar conceitos sobre usina hidrelétrica, o seu funcionamento, conceito de planejamento de partidas e paradas e sua disponibilidade de geração, histórico da manutenção de serviços de hidrogeradores e tecnologias de diagnósticos aplicados.

O **terceiro capítulo** é apresentado o tema abordado no estudo de caso, apresentando detecção, medida e análise de descargas parciais no isolamento do enrolamento estatórico, fazendo-se um breve conceito sobre a construção dos enrolamentos estatóricos, as causas do seu envelhecimento, apresentando o principal sintoma da parte elétrica, as descargas parciais.

O **quarto capítulo** apresenta a metodologia proposta aplicada à pesquisa, apresentando o método de coleta de dados, a análise de dados, e mostrando a especificação do problema da pesquisa.

O **quinto capítulo** é responsável por apresentar o estudo de caso realizado na usina hidrelétrica de Balbina para comprovação da pesquisa, mostrando os resultados obtidos e caracterizando uma conclusão a respeito.

Finalmente, as conclusões decorrentes do desenvolvimento do trabalho, bem como sugestões para estudos futuros sobre o tema, são apresentadas no sexto e último capítulo.

CAPÍTULO 2

PLANEJAMENTO DE PARTIDAS/PARADAS EM HIDROGERADORES E DIAGNÓSTICO DE FALHAS

Este capítulo apresenta uma revisão bibliográfica relativo ao assunto planejamento de partidas e paradas de hidrogeradores e seu diagnóstico de falhas. São apresentados conceitos de planejamento sobre partidas e paradas das máquinas bem como suas disponibilidades de geração, conceitos de usina hidrelétrica, a descrição do seu funcionamento, sua potência gerada e perdas elétricas nos hidrogeradores, e por fim neste capítulo será realizada uma descrição sobre diagnóstico de falhas, seus principais esforços atuantes nos hidrogeradores e os esforços que acontecem por causa de falhas nos isolamentos dos enrolamentos estáticos, objeto de estudo desta dissertação.

2.1 - PLANEJAMENTO DE DESPACHO: CUSTOS PARTIDA/PARADA

Um estudo feito por Arce (1999), na qual são consideradas características da geração hidrelétrica, é desenvolvido um modelo de despacho de máquinas incluindo custos de partida e parada usando programação dinâmica, aplicado à usina de Itaipu, diz que o problema do despacho de máquinas numa hidrelétrica surge quando os estudos do planejamento de curto prazo, a programação e mesmo a operação em tempo real define a quantidade de energia que a usina deve produzir ao longo do período do planejamento ou da programação.

A supervisão na operação em tempo real, em ocasiões de desvios nas previsões da geração programada, da disponibilidade do recurso hídrico ou do desligamento de unidades geradoras, redefine o despacho de máquinas para as novas condições de operação do sistema elétrico de potência. Este compromisso nasce da necessidade de manter o equilíbrio entre geração e geração programada. Na prática, muitos são os critérios adotados para o despacho de máquinas, porém os mais comuns são aqueles que visam minimizar as perdas no sistema de geração e aquele que visa minimizar as partidas e paradas, no intuito de valorizar a vida útil das unidades geradoras.

O. Nilsson e D. Sjelvgren, em 1997, publicaram um trabalho, no qual buscam quantificar o custo associado às partidas das unidades hidráulicas, por considerá-las como um aspecto da operação que envolve custo, e que, portanto deve ser minimizado. Para isto, através de entrevistas aos maiores produtores de energia elétrica da Suécia, buscaram estimar os fatores que ocasionam custos nas partidas de máquinas, qual o valor destes custos e como eles afetam a programação de curto prazo. As entrevistas apontaram os seguintes aspectos causadores de custos nas partidas e paradas:

- Degradação do isolamento dos enrolamentos do gerador devido às mudanças de temperatura, verificadas durante as partidas e paradas;
- Desgastes dos equipamentos mecânicos, ocasionando aumento dos serviços de manutenção dos mesmos;
- Falha nos equipamentos de controle durante as partidas e paradas, que ocasiona custos associados ao conserto de falha e a energia que deixa de ser gerada durante a indisponibilidade da máquina.

No trabalho de Santos (2001), o alvo principal de atenção é o planejamento da operação de curto prazo, pois tal planejamento procura compatibilizar a operação energética com a operação elétrica do sistema. Devido à sua proximidade da operação em tempo real, o planejamento da operação de curto prazo requer uma representação matemática mais detalhada do sistema, como, por exemplo, a apresentação da rede elétrica, suas limitações operativas, bem como uma representação detalhada do sistema hidráulico.

2.1.1 - Ganhos de disponibilidade de geração de máquinas hidráulicas

Segundo um trabalho de nota técnica da empresa de pesquisa energética (EPE, 2008), no contexto da operação e gerenciamento de sistemas elétricos, pode-se definir disponibilidade de um equipamento como sendo a capacidade deste equipamento estar em condições de executar certa função, em um dado instante ou durante um intervalo de tempo determinado, levando-se em conta os aspectos

combinados de sua confiabilidade, manutenibilidade e suporte à manutenção, supondo que os recursos externos requeridos estejam assegurados.

Nos modelos empregados nos estudos de planejamento da expansão e operação energética do SIN (Sistema Interligado Nacional), considera-se que o fator de disponibilidade média das unidades geradoras de uma usina hidrelétrica ao longo de um ano (considerando-se somente as indisponibilidades forçadas e programadas das unidades), pode ser calculado pela seguinte expressão:

$$fd = (1 - TEIF) \cdot (1 - IP); \quad (1)$$

TEIF = taxa equivalente de indisponibilidade forçada no ano;

IP = índice de indisponibilidade programada no ano.

Os índices TEIF e IP são calculados anualmente com base nos registros históricos de operação da usina, refletindo seu desempenho médio nos últimos anos.

As usinas hidrelétricas brasileiras apresentam valores relativamente baixos tanto para a TEIF (em torno de 2,5%) quanto para IP (na faixa de 5 a 8%). Em alguns casos, devido a características específicas da usina (supermotorização ou alta sazonalidade hidrológica), é possível ainda concentrar a manutenção programada de todas as unidades geradoras nos meses secos (quando ocorre “sobra de potência”, pois a geração despachada da usina é menor) e, por conseguinte, o índice IP poderia até mesmo ser admitido igual a zero nesses casos. Desta forma, para efeito da presente análise pode-se admitir que no parque gerador brasileiro não haja margem para significativos ganhos de disponibilidade, uma vez que os valores de TEIF e IP que vêm sendo utilizados nos estudos de planejamento da operação já são relativamente baixos (EPE, 2008).

2.2 - USINA HIDRELÉTRICA

Os hidrogeradores são máquinas que convertem em energia elétrica a energia mecânica disponibilizada no eixo pela turbina hidráulica. No processo de conversão

existem perdas de energia, que em máquinas de médio e grande porte atingem no máximo 2% da potência mecânica entregue pela turbina. Embora esse percentual seja pequeno, em termos absolutos isso representa perdas significativas que, dentre outras coisas, aquecem as partes ativas do gerador e requerem um sistema de resfriamento eficaz (LICÍNIO, 2008).

Um aproveitamento hidráulico para geração de energia elétrica é composto basicamente por: uma barragem formadora de um reservatório; uma tomada d'água e condutos forçados que levam a água do reservatório até a casa de força; a casa de força, situada num nível mais baixo, onde estão instalados os grupos turbina-gerador e outros equipamentos auxiliares; além de um canal de restituição, através do qual a água é reconduzida ao rio ou a outro curso d'água, (VIEIRA, 2007) como mostrado na Figura 2.1.

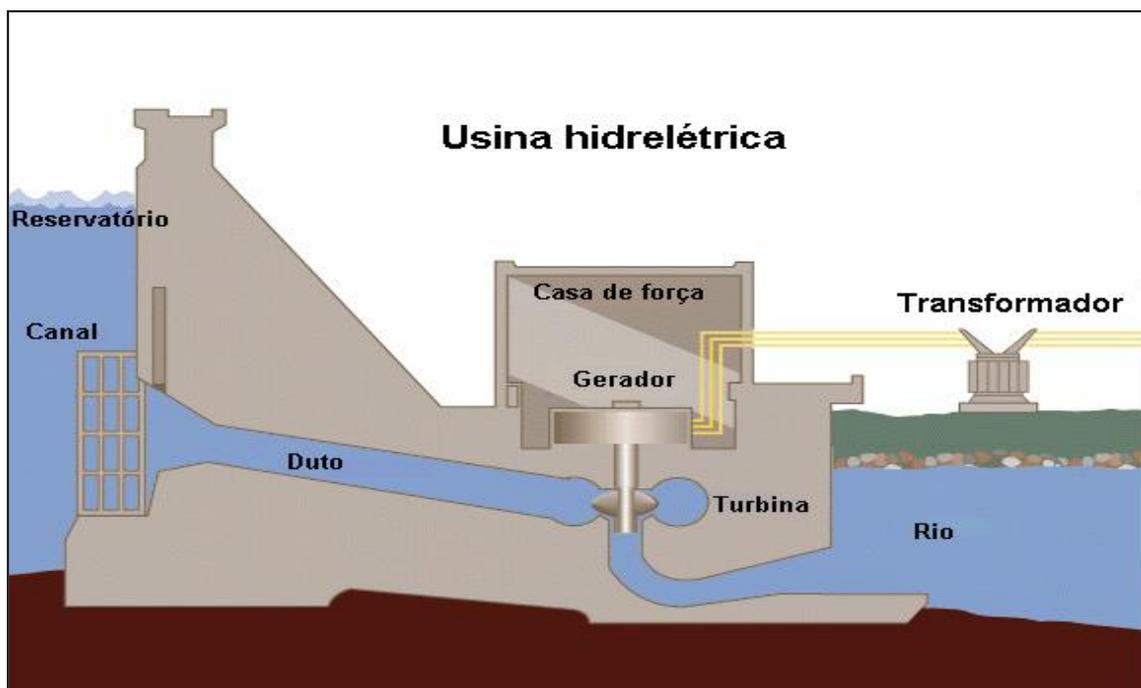


Figura 2.1 – Esquemático de uma usina hidrelétrica
Fonte: VIEIRA, (2007).

No processo de geração de energia elétrica, a energia potencial da água é transformada em energia cinética e energia de pressão dinâmica pela passagem da água nos condutos forçados, ao passar pela turbina, essa energia é convertida em energia mecânica que por sua vez é transmitida pelo eixo ao gerador. No gerador

essa energia é convertida em energia elétrica sendo então injetada no sistema de transmissão que a tornará disponível nos centros consumidores.

Na usina hidrelétrica, conforme a figura 2.1, a barragem tem como objetivo criar uma diferença entre os níveis do reservatório (montante) e do canal de fuga (jusante), formando um reservatório onde a água é captada a produção de energia elétrica.

2.2.1 - Funcionamento de um hidrogerador

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 estatórico acarreta o surgimento de um campo magnético acoplado aos enrolamentos estatóricos (lei de Biot e Savart), ou de maneira mais abrangente Lei de Ampère apresentada em HALLIDAY e RESNICK, (1994). Esse campo magnético é rotacional e sempre ortogonal a direção da corrente associada. Seu sentido depende do sentido da corrente que lhe deu origem (FITZGERALD, et al, 2003).

$$\int \vec{H} \cdot d\vec{l} = N \cdot I \quad ; \text{ Lei de Ampère} \quad (2)$$

Onde:

\vec{H} = Campo magnético (A. m⁻¹);

$d\vec{l}$ = Elemento infinitesimal de linha de campo (m);

μ_0 = Coeficiente de permeabilidade magnética do vácuo (H.m⁻¹, 4π.10⁻⁷, SI);

N= Número de espiras do enrolamento (Adimensional);

I= Corrente (A);

O princípio de funcionamento de um gerador está alicerçado na lei da indução eletromagnética, assim definida (FITZGERALD, et al, 2003).:

$$E \propto \left(\frac{-d\phi}{dt} \right) \quad (3)$$

O fluxo magnético ϕ é produzido pelos pólos do rotor. A variação cíclica do fluxo $\left(\frac{-d\phi}{dt} \right)$ resulta do movimento de rotação do rotor a uma velocidade constante, que faz com que um observador solidário ao estator perceba a passagem alternada de pólos norte e sul numa frequência constante, o que produz um fluxo magnético alternado que atravessa as bobinas do enrolamento estatórico e nele induz uma força eletromotriz E , geralmente na frequência de 50 ou 60 Hz.

2.2.2 - Potência Gerada

A potência gerada numa usina hidrelétrica é uma função da vazão turbinada e da altura de queda, que por sua vez, é uma função não-linear do volume armazenado e da vazão defluente. A potência produzida numa unidade geradora pode ser dada através da seguinte relação matemática (VIEIRA, 2007):

$$P_i = g \times \rho \times 10^{-6} \times \eta_{turi} \times \eta_{geri} \times h_{li} \times q_{ti} \quad (4)$$

Onde:

- P_i é a potência gerada na máquina i (em MW);
- g é a aceleração da gravidade (em m/s^2);
- η_{turi} é o rendimento da turbina i (em %);
- η_{geri} é o rendimento do gerador i em (em %);

- h_{li} é a altura de queda líquida na máquina i (em m);
- q_{ti} é a vazão turbinada na máquina i (em m^3/s);

2.2.3 - Perdas Elétricas no Hidrogerador

No trabalho de Borys (2007), que trata sobre rendimento, descreve sobre perdas elétricas que acontecem em hidrogeradores, diz que em especialmente máquinas elétricas, considerando-se quando há uma corrente circulando, a potência dissipada pode ser calcula por:

$$P = i^2 \cdot R, \quad (5)$$

Onde:

P – potência dissipada [W];

i – corrente circulante [A];

R – resistência do meio [Ω].

Existem duas formas predominantes de perda de energia por motivos elétricos:

- Em função das perdas decorrentes da tensão elétrica (P_{fe}). Esta perda é essencialmente função de correntes parasitas no ferro do gerador e não é calculada, é medida conforme (5);
- Em função das perdas decorrentes da corrente circulante (P_i). Esta perda pode ser separada em duas porções: a perda relativa à corrente no rotor denominada P_{ir} e a perda relativa a corrente no estator denominada P_{ie} .

Portanto a perda devida à corrente circulante pode ser representada por:

$$P_i = P_{ie} + P_{ir} , \quad (6)$$

Onde:

P_{ir} - Potência dissipada no rotor do gerador [W];

P_{ie} – Potência dissipada no estator do gerador [W].

A potência dissipada no rotor não é calculada e sim medida:

$$P_{ir} = i_r^2 \cdot R_1 \quad (7)$$

Onde:

P_{ir} – Potência dissipada no rotor do gerador [W];

i_r - Corrente de excitação do rotor [A];

R_1 – Resistência elétrica no rotor [Ω].

2.3 - MONITORAÇÃO E DIAGNÓSTICO DE FALHAS DEVIDO AO CICLO DE CARGA DOS GERADORES

Estudos de Twerdochlib (1988) enfoca a detecção de falhas com base na monitoração com base nas variáveis elétricas e mecânicas do gerador e demonstrou em seu trabalho, com base em dados reais, que os benefícios da monitoração permanente servem para o aumento da disponibilidade de geração.

No início da década de 90 o IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) publicou a norma 1129, estabelecendo as melhores práticas para monitoração de geradores síncronos. Este documento apresentou uma visão dos principais componentes a serem monitorados:

- Estrutura e núcleo do estator;
- Enrolamento do estator;
- Entreferro e rotor;
- Enrolamento do rotor;
- Componentes diversos (refrigeradores, mancais, etc);
- E sistemas auxiliares externos.

Além disso, o documento (norma 1129) define as variáveis relacionadas com estes componentes e cita os potenciais problemas a serem evitados. A norma do IEEE também estabelece a diferença entre instrumentação para monitoração e instrumentação para proteção. Enquanto a primeira deve ser utilizada somente para informar o operador, a segunda efetua ações automáticas com base nas medições. Ressalta, porém, que o operador não deve ser sujeito ao excesso de informações.

Este detalhe indicou as primeiras necessidades de sistemas de diagnóstico automático para a interpretação de grandes quantidades de dados. O início do século 21 foi marcado pelas primeiras aplicações de manutenção condicional específicas em plantas de geração de energia elétrica. Estudos focados na detecção de falhas de isolamento em enrolamentos e para identificação on-line de parâmetros utilizando técnicas de inteligência artificial foram os principais, demonstrando a aplicabilidade das técnicas e os resultados obtidos (FABRIZIO et al, 2008).

A partir de 2001, técnicas de diagnóstico através da monitoração de variáveis mecânicas e de descargas parciais foram amplamente desenvolvidas e difundidas incluindo experiências em empresas brasileiras de geração na aplicação de tecnologia internacional. Discute-se com detalhes os métodos de diagnóstico por descargas parciais incluindo detalhes sobre sensores, hardware de aquisição de dados necessário, os cálculos computacionais envolvidos e as regras de interpretação dos resultados (FABRIZIO et al, 2008).

Estudos realizados por vários pesquisadores ao longo de anos, final da década de 90 e início do século 21, ressaltam a necessidade de se utilizar múltiplas técnicas computacionais inteligentes para gerar resultados significativos a partir da interpretação de dados das plantas de geração, e assim serem discutidos os principais métodos de identificação de falhas no isolamento dos enrolamentos do rotor (monitoração da temperatura e do fluxo magnético) e do estator (monitoração da temperatura, de partículas, de ozônio, de descargas parciais e da vibração) de geradores e motores, para realização de um melhor diagnóstico e confiável das máquinas.

2.3.1 - Conceito de Diagnóstico de Falhas

Para se entender um pouco esse conceito, é preciso fazer explanação do termo MBC, (Manutenção Baseada em Condição). Um sistema de manutenção baseado em condição é definido por Bengtsson (2004b) como: "Um sistema que usa a manutenção baseada em condição para determinar e programar ações de manutenção preditiva automática ou em interação com outros sistemas ou operadores". Para isso serão apresentadas algumas arquiteturas para visualização do termo diagnóstico:

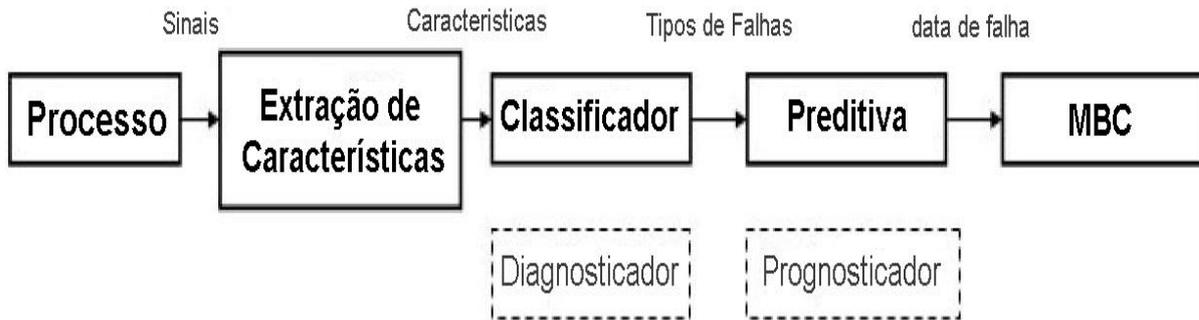


Figura 2.2 - Arquitetura geral de um sistema de prognóstico

Fonte: Amaya, (2008).

Uma arquitetura para manutenção baseada em condição é apresentada por Amaya (2008), chamada de sistema de prognóstico o qual tem como saída o tempo de falha como o objetivo de executar ações de manutenção baseada em condição, ver Figura 2.2. O diagnosticador avalia a condição real de um componente através da medição em tempo real de um sensor, o propósito é chegar à conclusão da existência de uma condição de falha iminente ou incipiente. O prognosticador que tem entradas do diagnosticador decide a necessidade de manter um componente, baseado no histórico de taxa de falha, modelos de falha apropriadas, e programas de manutenção. Outra arquitetura, que exemplifica o estudo desta dissertação, também apresentada por Amaya (2008):

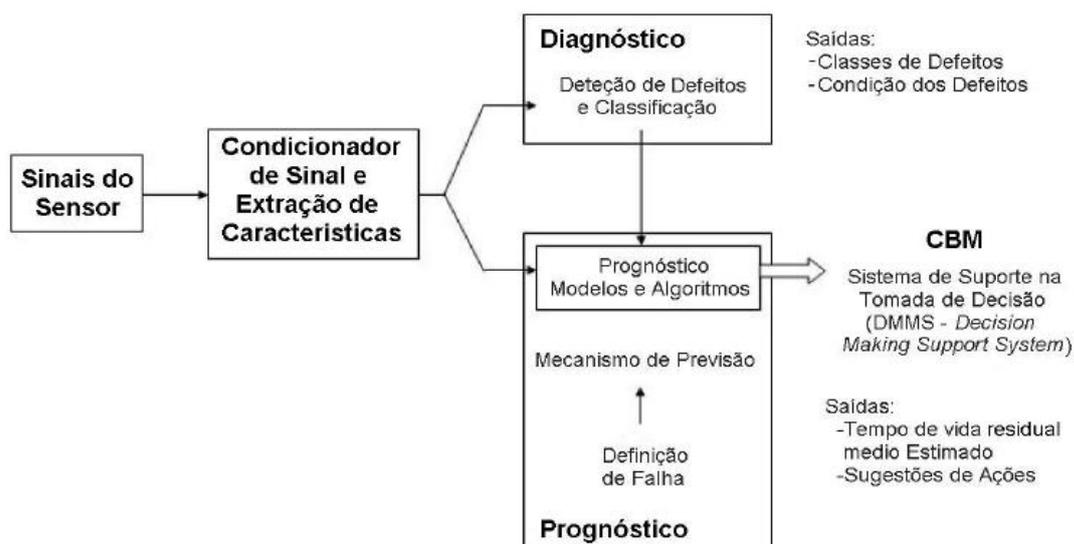


Figura 2.3 - Elementos básicos de diagnóstico e prognóstico para manutenção baseada em condição

Fonte: Amaya, (2008).

A Figura 2.3 apresentada por Amaya (2008), são apresentados os elementos básicos de arquitetura para um sistema de MBC (Manutenção Baseada em Condição) focando o diagnóstico e prognóstico. Descreve que através de um conjunto dos avanços da tecnologia dos sensores, *hardware* de aquisição de dados é possível fazer um diagnóstico da máquina.

Como se pode perceber o termo diagnóstico na manutenção baseada em condição tem a função de avaliar a capacidade de gerar registros no equipamento que indicam as possíveis falhas baseada em tendências do histórico de saúde, estado operacional e histórico de manutenção.

2.3.2 - História do serviço e manutenção de hidrogeradores

No trabalho apresentado por Gerold e Hugh (2003), realiza uma larga explanação sobre falhas de hidrogeradores, diz que a história dos serviços para os enrolamentos estatóricos desempenha um papel importante no final de vida útil, que inclui o número de horas de operações e demanda de carga colocada no enrolamento, por exemplo, a temperatura absoluta de operação no enrolamento.

É comumente aceitável que a temperatura de operação do enrolamento tem uma correlação próxima com a vida útil. Adicionalmente o número de partidas e paradas das máquinas, afeta o ciclo de temperatura dos enrolamentos e da unidade geradora durante sua vida operacional. O ciclo de temperatura causa expansão e contração, afrouxamento das cunhas e, portanto, vibração e movimento relativo dos enrolamentos dentro da ranhura. Então, as freqüentes manutenções e histórico de reparo é também um fator chave que afeta a vida útil do enrolamento estatórico.

2.3.3 - Tipos de Falhas decorrentes em hidrogeradores

No trabalho de Duarte (2007) explana sobre as falhas ou ocorrências, referentes ao Grupo Gerador, que 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:

- 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 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.

2.3.4 - Esforços atuantes sobre os hidrogeradores

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 (DUARTE, 2007).

Em operação os enrolamentos estatóricos dos geradores síncronos e sua isolamento, 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 isolamento dos enrolamentos do estator, com um percentual estimado em torno de 30% (SILVA, 2004). Essa pesquisa teve como cenário os países desenvolvidos do hemisfério norte em sua maioria. A Figura 2.4 apresenta um gráfico que traduz os dados dessa pesquisa.

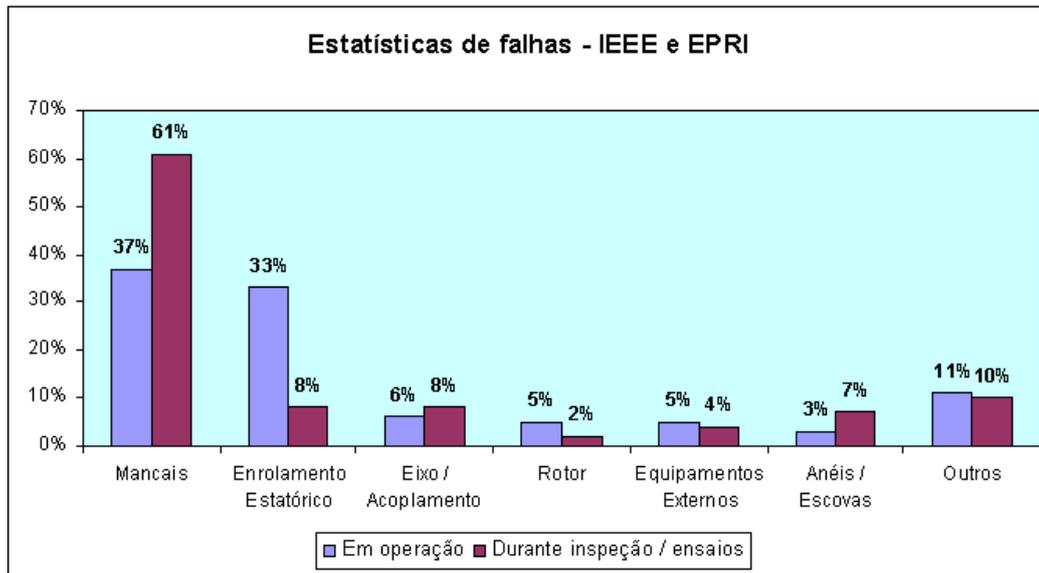


Figura 2.4 – Estatísticas de Falhas IEEE e EPRI
Fonte: Silva, (2004).

Falhas no estator das máquinas síncronas surgem principalmente a partir do colapso do isolamento interno dos condutores (bobinas ou barras) devido à 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 estáticos (DUARTE, 2007). O gráfico da Figura 2.5 apresenta melhor esses resultados.

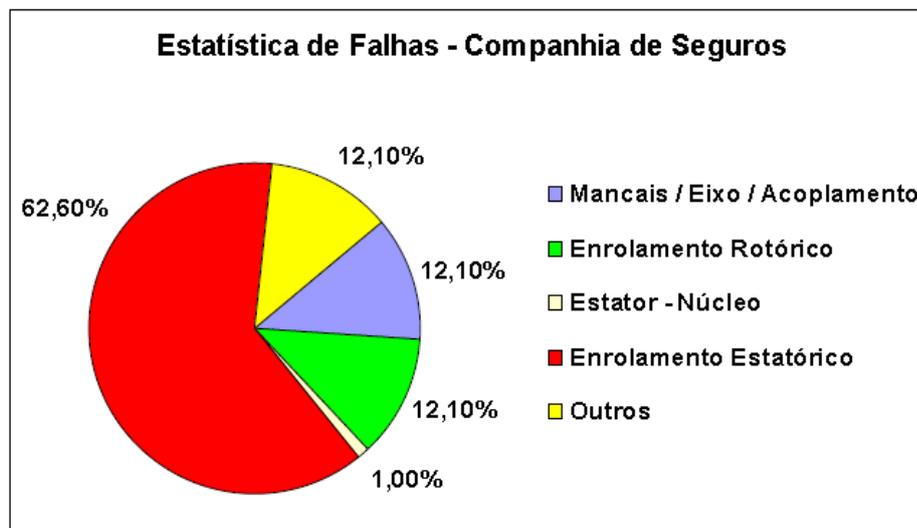


Figura 2.5 – Pagamentos de sinistro seguradora Allianz, de 1996 a 1999
Fonte: Duarte, (2007).

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, 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.

2.3.5 - Esforços que afetam o isolamento de enrolamentos estatóricos de hidrogeradores

Nos trabalhos de Gerold e Hugh (2003) e Duarte (2007) explicam que os enrolamentos estatóricos de hidrogeradores podem falhar devido a diferentes números de mecanismos e fatores de envelhecimento. Estes mecanismos podem ser classificados dentro de quatro causas incluindo esforços devido à tensão elétrica, esforços devido à temperatura, esforços mecânicos, e fator ambiental. Cada causa pode descrita abaixo:

1- Esforços devido à tensão elétrica:

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. São citados alguns exemplos de esforços que podem ser causados por devido à tensão elétrica:

- Esforço de sobretensão;
- Esforço de tensão transiente;
- Corona;
- Insuficiente espaço entre os finais do enrolamento estatórico;

2 - Esforços devido à temperatura:

A deterioração dos componentes de isolamento, 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 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 isolamento 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. O enrolamento do estator opera em alta temperatura por longos períodos de tempo. As altas temperaturas podem ser causadas por:

- Sobrecarga do gerador;
- Degradação do sistema de resfriamento (Por exemplo, o bloqueio de passagens aéreas ou refrigeradores)
- Projeto ruim do sistema de resfriamento;
- Movimento relativo entre a barra e núcleo devido ao ciclo térmico;
- Sobreaquecimento do núcleo do estator devido a curtos-circuitos entre lâminas.

O isolamento do enrolamento estatórico pode ser oxidado a altas temperaturas, resultando em fragilização, descamação, a separação da fita e delaminação. Por conseguinte, a resistência mecânica do isolamento é enfraquecida e descarga parcial pode ocorrer em altas tensões.

3. 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. Algumas causas de esforços mecânicos que podem ser citados:

- Vibração de 120 Hz na barra:
- Movimento da barra devido à deterioração das cunhas, molas e embalagens;
- Perda de cola entre as barras.

Barras Frouxas (por exemplo, devido a cunhas soltas) movem na ranhura contra o núcleo do estator, causando desgaste de revestimentos semicondutores e o isolamento do aterramento. Danos nas camadas semicondutoras resultam em descargas na ranhura. Uma falha de terra é provável em ocorrer se aproximadamente um terço do isolamento aterramento tenha sido desgastada.

4 – Fator Ambiental:

Esse fator abrange diversas fontes de degradação dos equipamentos que muitas das vezes são usuais ao grupo gerador. Contaminações externas podem reduzir o desempenho do isolamento do enrolamento bem como o sistema de suporte do enrolamento. Contaminações de fatores ambientais incluem:

- Óleo de vazamento suspenso no mancal;
- Água ou mistura de vazamento do sistema de resfriamento;

- Materiais abrasivos (por exemplo, poeira) transportados no ar de resfriamento;
- Poluição de materiais condutivos sobre o final do enrolamento, causando traços de impressões de falhas elétricas na qual cobre fase por fase ou fase a terra.
- Variações climáticas abruptas;
- Intervenção humana.

Vários dos fatores acima podem ser responsáveis por, ou contribuir a falhas do enrolamento do estator. Apesar de não possuir atuação tão representativa, o fato de possuir alta imprevisibilidade torna esse fator de elevado risco.

2.4 – CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

Neste capítulo foram estudados, planejamentos de despachos de partidas e paradas de hidrogeradores, conceitos de usina hidrelétrica e suas características de funcionamento, e também sobre esforços atuantes, diagnósticos de falhas que acontecem no hidrogerador e especificamente no isolamento do estator, então o que se pode concluir deste capítulo o seguinte:

Os critérios adotados para o despacho de máquinas são aqueles que visam minimizar as perdas no sistema de geração e aquele que visa minimizar as partidas e paradas, no intuito de valorizar a vida útil das unidades geradoras.

No funcionamento da usina hidrelétrica através geração de potência elétrica existem vários esforços em que ocasionam falhas para a degradação do hidrogerador, como os esforços elétricos, mecânicos, térmicos e ambientais, e que umas das maiores ocorrências desses esforços são decorrentes por motivos de tensão elétrica que afetam os enrolamentos estatóricos que são perdas elétricas que diminui o rendimento e a vida útil do gerador.

CAPÍTULO 3

DETECÇÃO, MEDIDA E ANÁLISE DE DESCARGAS PARCIAIS NO ISOLAMENTO DO ENROLAMENTO ESTATÓRICO DE GERADORES SÍNCRONOS

Este capítulo vem detalhar a explanação que será realizada no estudo de caso, enfatizado o principal fenômeno encontrado nas falhas elétricas no estator, que são as descargas parciais, comumente chamado no inglês de PD (*Partial Discharge*), que neste trabalho será muito mencionado, bem como será realizada sua definição e classificação, as condições de sua ocorrência, como comportam em tensão alternada e por último sua degradação que acontece nos enrolamentos estatóricos. Também será descrito a construção de um estator, detalhando sobre os isolamentos que são instalados para proteção contra os esforços atuantes, já mencionados no capítulo 2.

3.1 Construção dos enrolamentos estatóricos em geradores síncronos (hidrogeradores)

Um gerador é composto de dois componentes principais, o estator e rotor. O rotor é um campo magnético rotativo e o estator é um conjunto de condutores, ou enrolamentos, fixos por um núcleo. Os enrolamentos fornecem um caminho para os elétrons, enquanto que o núcleo foca o campo magnético, fixa os enrolamentos e dissipa calor. Uma vez que a diferença de tensão entre os enrolamentos e o núcleo aterrado pode chegar a alguns milhares de volts, é necessário separar ambas as superfícies por um material isolante. Esse material isolante, embora extremamente necessário na isolação, suporte e transferência de calor, não tem nenhuma função na produção de eletricidade ou torque em si. A isolação, embora confiável por princípio, é também a parte mais fraca e a que envelhece mais rápido, por ação dos mais diversos estresses (elétricos, mecânicos, químicos e ambientais) que estão presentes em uma máquina em condições operacionais (SANTOS, 2010).

O enrolamento do estator é constituído por barras de cobre isoladas que são inseridas nas ranhuras do núcleo e das cabeças de bobina, que fazem o fechamento

das barras em ambas as extremidades de forma a constituir um enrolamento trifásico, conforme mostrado na Figura 3.1.

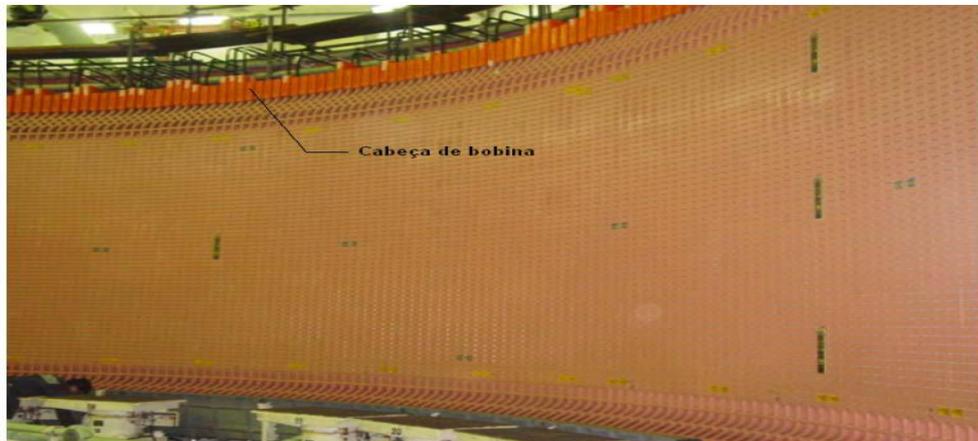


Figura 3.1 - UHE Itaipu: núcleo e enrolamento do estator
Fonte: PORTO, (2008).

Normalmente, em máquinas cujo núcleo é muito longo ou com pequeno diâmetro, onde a montagem com bobina completa é difícil, utilizam-se barras em duas seções denominadas meia bobinas ou barras Roebel, conforme é mostrada na Figura 3.2:

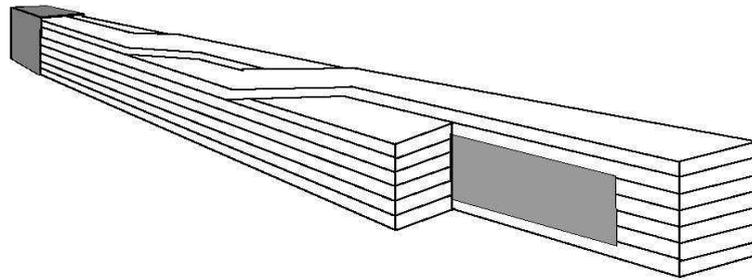


Figura 3.2 - Barras meia bobina ou barras Roebel
Fonte: SANTOS, (2010).

Essas barras são inseridas nas ranhuras e depois conectadas à outra metade, formando a bobina completa. A barra é formada por condutores de cobre isolados

individualmente (*strands*), que torcidos para montagem do efeito Roebel¹, e esse conjunto é coberto por uma isolação externa (*groundwall*).

3.1.1 - Isolamento do Enrolamento Estatórico

Conforme citado anteriormente, na construção dos enrolamentos estatóricos sobre os isolamentos individuais (*strands*) e a isolação externa (*groundwall*), os isolamentos têm uma função importante nas barras, evitar os contatos devido a esforços da tensão elétrica.

Na seção transversal da barra mostrada na Figura 3.3, indica onde estão localizados os tipos de isolações, as isolações internas das barras, em condutores de cobre e nas isolações externas.

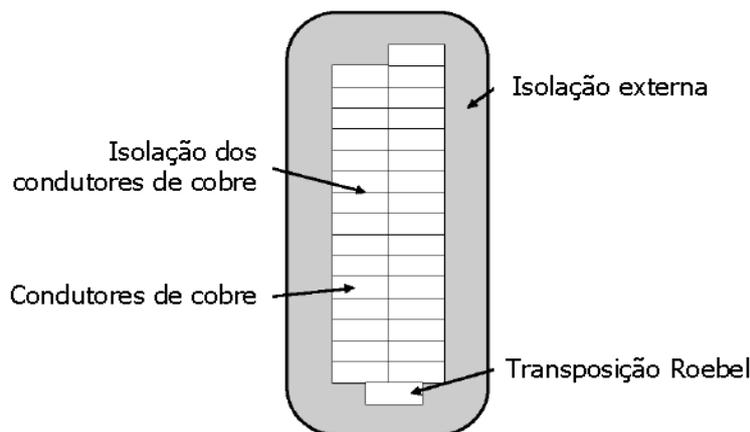


Figura 3.3 - Seção transversal de uma barra
Fonte: SANTOS, (2010).

A falha entre a isolação dos condutores individuais geralmente não apresenta maiores problemas, apenas aumenta as perdas pelo fluxo magnético, mas, se houver centelhamento, pode levar ao dano completo da barra/bobina. Na isolação externa, o propósito é prevenir contra curtos entre os condutores de cobre em alta

¹ Efeito Roebel: termo dado na teoria do eletromagnetismo, devido ao tipo de montagem que faz a rotação dos condutores internos dentro da barra permitir melhor distribuição das correntes pelo efeito da superfície e dissipação de calor (SANTOS,2010)

tensão e o núcleo aterrado. A espessura da isolação externa é dependente exclusivamente da tensão da máquina e do estresse volts/mm definido pelo fabricante. Quanto mais grossa a isolação, menos cobre e maior estresse térmico. Quanto mais fina a isolação, maior estresse de tensão e maior risco de falha. O material básico empregado na isolação externa é a mica, e impregnado tintas de resinas époxi. Essas resinas fornecem melhor estabilidade mecânica, porém podem sofrer impactos resultantes dos estresses elétricos e térmicos. Essas resinas são denominadas termorrígidas (*thermoset*, geralmente Classe F – 155°C) (SANTOS 2010).

Apesar de suas excelentes propriedades elétricas estes materiais poliméricos, empregados em sistemas de isolação, ficam sujeitos a ação de estresse elétrico, térmico, mecânico ou ambiental quando em operação. A ação individual ou conjunta destes estresses pode levar ao envelhecimento e degradação das propriedades isolantes do material e, em última instância, a falha do equipamento. Entre os mecanismos de degradação existentes está o fenômeno conhecido como descargas parciais (SILVA, 2005).

3.2 - DESCARGAS PARCIAIS

Descarga parcial é uma descarga elétrica que ocorre numa região do espaço sujeita a um campo elétrico, cujo caminho condutor formado pela descarga não une os dois eletrodos de forma completa (KREUGER, 1989).

3.2.1 - Definição e classificação de Descargas Parciais

As descargas parciais podem ser classificadas em três categorias de acordo com a sua origem: descarga superficial, descarga corona e descarga interna (MASON, 1995). Ao longo desta dissertação, serão comentados sobre a descarga superficial e a descarga interna.

Descargas superficiais ocorrem em gases ou líquidos na superfície de um material dielétrico, normalmente partindo do eletrodo para a superfície. Quando a componente de campo elétrico que tangencia a superfície excede certo valor crítico o processo de descarga superficial é iniciado. Descargas superficiais ocasionam

alterações na superfície do dielétrico, iniciando caminhos condutores que se propagam ao longo da direção do campo elétrico. Este fenômeno, conhecido como trilhamento, pode levar à ruptura completa da isolação (MASON, 1995), e ainda assim, o que se pode comentar que descargas parciais podem levar um envelhecimento da máquina e a um dano total.

Descargas corona ocorrem em gases a partir de pontas agudas em eletrodos metálicos. Estes pontos concentradores de estresse, ou seja, partes com pequenos raios de curvatura, formam regiões nas vizinhanças do condutor com campo elétrico elevado, o qual ultrapassa o valor de ruptura do gás, dando origem à ocorrência de descargas parciais (KREUGER, 1989).

Descargas corona no ar geram ozônio, o qual pode causar o fissuramento da isolação polimérica. Óxidos de nitrogênio combinados com vapor de água podem corroer metais e formar depósitos condutores na isolação promovendo o trilhamento do material (MASON, 1995).

Descargas internas ocorrem em inclusões de baixa rigidez dielétrica, geralmente vazios preenchidos com gás, presentes em materiais dielétricos sólidos utilizados em sistemas de isolação de alta tensão (KREUGER, 1989), e ainda que se pode comentar, que essas ocorrências acontecem quando as descargas ultrapassam a ruptura dielétrica do ar de 3kV/mm.

A formação de vazios na estrutura de materiais poliméricos pode ser devida a causas distintas, dependendo da natureza do material e do processo de fabricação. No caso de materiais termoplásticos como, por exemplo, o polietileno, a falha pode ocorrer durante o processo de injeção do polímero devido à infiltração do ar atmosférico. Para polímeros termofixos, tais como as resinas epóxi, a formação dos vazios pode ocorrer durante o processo de cura do material, podendo ser devido à infiltração do ar atmosférico ou a formação de gases residuais provenientes de reações químicas. Além dos fatores relativos ao processo de fabricação, os diversos estresses (elétricos, mecânicos e ambiental), a que a isolação é submetida ao longo de sua vida também podem causar o aparecimento de vazios. Descargas internas podem ocorrer numa região do material dielétrico onde o vazio está totalmente circundado pelo dielétrico ou na interface entre o dielétrico e um dos eletrodos [KREUGER, 1989].

A Figura 3.4 apresenta de forma ilustrativa as três categorias de descargas parciais – superficial, corona e interna – que podem ocorrer em sistemas de isolamento. A partir do presente parágrafo o termo descarga parcial será sempre utilizado para designar descarga parcial interna.

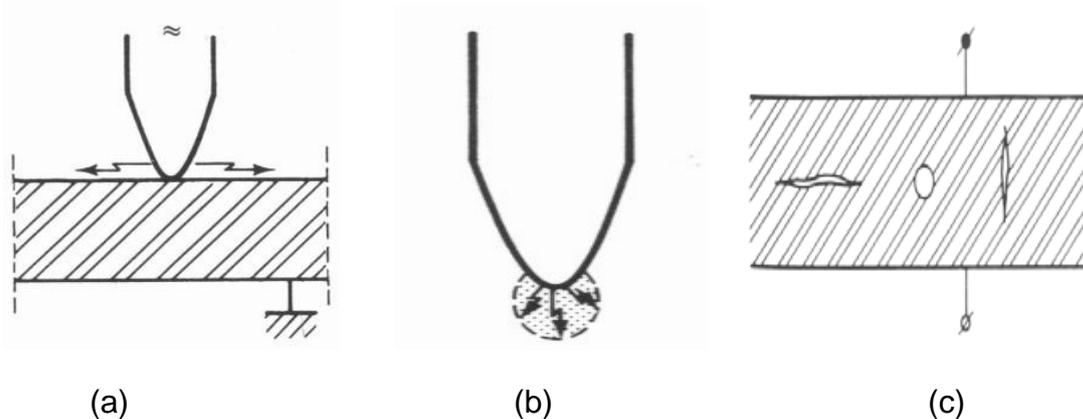


Figura 3.4 - Tipos de descarga parciais: (a) superficial, (b) corona, (c) interna
Fonte: KREUGER, (1989).

3.2.2 - Condições para ocorrências de Descargas Parciais

Quando a tensão 60 Hz é aplicada na máquina, o estresse elétrico dentro do vazio aumenta até que uma condição de sobretensão ocorra dentro desse vazio. A ruptura dielétrica causa uma avalanche de elétrons dentro do vazio, que ocasiona o aparecimento de um pulso muito rápido (alguns nano-segundos) chamado PD (*Partial Discharge*), que se propaga pelos enrolamentos da máquina conforme é mostrada na Figura 3.5.

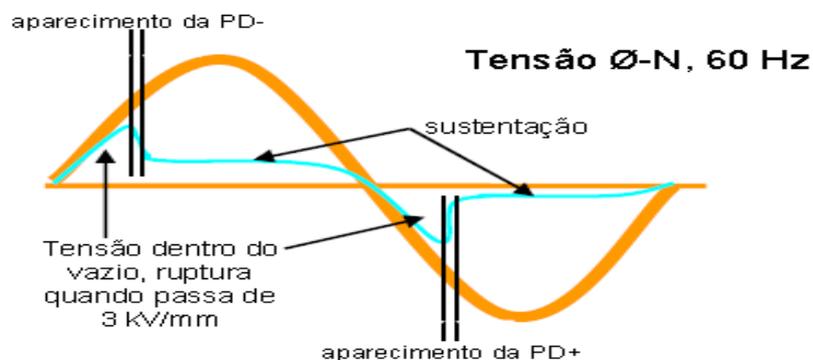


Figura 3.5 - Aparecimento do pulso PD muito rápido
Fonte: SANTOS, (2010).

De acordo com a Figura 3.5, quando a ruptura dielétrica acontece, a tensão através do vazio retrocede a um nível suficiente para sustentar a descarga. Apenas o pulso inicial de ruptura dielétrica é detectado pela maioria dos instrumentos como um pulso PD. Outros pulsos PD somente serão detectados quando a tensão dentro do vazio mudar de polaridade, e outra condição de sobretensão forem estabelecidos. Assim, para cada vazio, aparecerão dois pulsos PD detectáveis em cada ciclo CA.

A frequência e a magnitude das PD dentro de vazio são um fenômeno complexo que depende do tamanho, forma, superfície interna e pressão interna do gás. Quanto maior o vazio, maior a descarga. A tensão fase-neutro decresce linearmente até 0 V na direção do neutro. Uma vez que alto estresse elétrico (3 kV/mm) é necessário para a ocorrência de PD, não existem PD nas bobinas/barras próximas ao neutro. As PD somente ocorrem nos 30% superiores das bobinas enquanto a máquina está em operação. Um pulso PD é unipolar e caracterizado por rápido tempo de rampa (1 a 5 ns) e pequena banda (2 a 6 ns). O período de oscilação, o tempo de rampa e a magnitude variam para cada pulso, isso depende da geometria da máquina, localização do pulso e material de isolamento. As PD são pulsos, produzem energia através de espectro de frequência CC até GHz. Aplicando a fórmula $f = 1/T$, a faixa de frequência para pulsos PD de 1 a 5 ns (cujos períodos são de 4 a 20 ns respectivamente) é de 50 a 250 MHz.

3.2.3 - Descargas Parciais em tensão alternada

Duas diferentes aproximações são utilizadas para descrição do comportamento das descargas parciais em vazios quando sob tensão alternada: o modelo de circuito equivalente e a aproximação por campo elétrico (SILVA, 2005). O primeiro modelo de circuito equivalente desenvolvido, denominado circuito **a-b-c**, é uma aproximação simplificada utilizada para facilitar a compreensão da ocorrência das descargas parciais sob tensão alternada (BARTNIKAS, 1979), e além do mais, esse modelo descreve os vazios que são encontrados dentro da ranhura das barras do estator.

Um esquema ilustrativo deste modelo é apresentado na Figura 3.6. Neste circuito **a** corresponde à capacitância do dielétrico em bom estado e **b** à capacitância do dielétrico em série com a capacitância do vazio **c**. De acordo com o modelo **a-b-**

c , quando a tensão sob o vazio, v_c , atinge tensão de início, uma descarga ocorre no vazio. Após a extinção da descarga a tensão sobre o vazio recomeça a aumentar. Esta tensão é dada pela superposição do campo elétrico aplicado e do campo formado pelas cargas superficiais deixadas na parede do vazio após a última descarga. Quando a tensão sobre o vazio atinge novamente a tensão de ruptura, uma nova descarga ocorre. Este efeito repete-se diversas vezes durante cada semiciclo da tensão alternada e, desta forma, grupos regulares de descargas recorrentes são encontrados (BARTNIKAS, 1979, KREUGER, 1989).

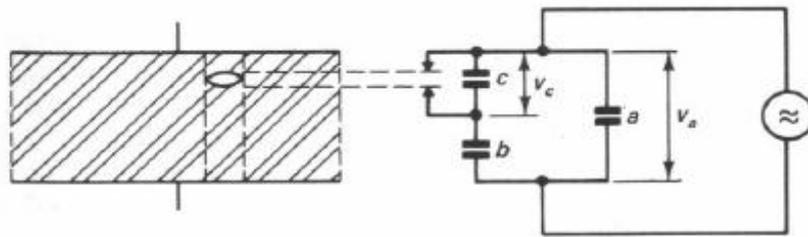


Figura 3.6 - Modelo a-b-c do vazio no isolamento

O modelo **a-b-c** não leva em conta fatores como geometria, localização do vazio e presença de cargas espaciais. Desta forma, a simples operação de um circuito equivalente não necessariamente corresponde aos processos físicos que ocorrem em um sistema físico real (BARTNIKAS, 1979) e ainda pode-se comentar que a frequência e a magnitude das PD dentro de vazio são um fenômeno complexo que depende do tamanho, forma, superfície interna e pressão interna do gás, quanto maior o vazio, maior a descarga.

O modelo de aproximação por campo elétrico considera um vazio esférico circundado por um material dielétrico, onde uma tensão alternada é aplicada entre dois eletrodos metálicos. Inicialmente não há presença de cargas superficiais e espaciais. Além disto, antes da primeira descarga, o campo local é aproximadamente uniforme, isto é, aproximadamente igual em todos os pontos do vazio, e varia proporcionalmente à tensão aplicada. Satisfeitas as condições de ocorrência (ver item 3.2.3) a primeira descarga é disparada.

As cargas liberadas pela primeira descarga são dirigidas pelo campo aplicado para as paredes do vazio, local no qual são depositadas. O campo local passa a ser

a soma do campo devido à tensão aplicada e do campo gerado pelas cargas superficiais e espaciais. As descargas consecutivas seguem o campo total no interior do vazio e a descarga seguinte ocorrerá quando o campo de início for novamente atingido. Este processo faz com que as descargas ocorram mesmo no instante em que a tensão aplicada é zero, pois o campo local pode ser suficientemente elevado para alcançar o campo de início. O processo de descarga passa então a ser comandado pelo campo local e não mais pela tensão aplicada (BOGGS, 1990, EDIN, 2001).

Nos trabalhos desenvolvidos por MORSHUIS (1993) trata sobre um amplo estudo dos mecanismos e processos físicos envolvidos na ocorrência de descargas parciais em vazios quando sob tensão alternada, de acordo com seu estudo, uma vez satisfeita às condições necessárias para o início da ocorrência das descargas e tendo sido iniciado o processo de avalanche, uma quantidade significativa de carga espacial é construída no vazio.

Dois processos competitivos passam a determinar a característica da descarga no vazio:

- 1 - O processo de ionização do gás no vazio reforça o campo no interior do vazio através do acúmulo de carga espacial formada por íons positivos;
- 2 - A corrente de deslocamento que flui no circuito externo reduz o campo local. O processo dominante dependerá do valor da sobretensão aplicada, a qual é a diferença entre a tensão de início das descargas e a tensão mínima de ruptura.

Ainda, segundo MORSHUIS (1993), por analogia aos mecanismos de descarga estudados nos processos de descarga em gás entre eletrodos metálicos, os mecanismos de descarga parcial que ocorrem em vazios são denominados avalanche (*Townsend*) e canal (*Streamer*).

MORSHUIS descreve que, basicamente a descarga tipo avalanche consiste em uma avalanche auto-sustentada com sucessores iniciados no catodo e a descarga tipo canal consiste de avalanches sucessivas, iniciadas no gás presente no interior do vazio por fótons de alta energia, geradas a partir da ionização do campo de carga espacial.

Uma distinção importante entre as descargas do tipo avalanche e canal pode ser feita com relação à magnitude das descargas. Na descarga tipo avalanche a magnitude da descarga aumenta linearmente com a sobretensão e independe da altura do vazio; na descarga tipo canal a magnitude da descarga é praticamente insensível ao aumento da sobretensão e aumenta com o aumento do tamanho do vazio.

Ainda, quando o vazio está submetido a estresse elétrico e ocorrência contínua de descargas parciais, os mecanismos de descarga tipo avalanche e canal podem ser relacionados com estágios de envelhecimento do material (MORSHUIS, 1993).

3.2.4 - Degradação de descargas parciais causadas por Falhas de esforços atuantes

Conforme explanado no capítulo 2, no item 2.3.5, sobre falhas elétricas, devido à ocorrência de esforços atuantes com elétricos, mecânicos e ambientais no isolamento, então acabam em ocasionar vazios que aplicado um campo elétrico criando descargas parciais.

Como foi descrito anteriormente, a descarga parcial são sintomas de falhas que acontecem devido a esforços atuantes nos enrolamentos. Vários trabalhos descrevem sobre essas falhas ocasionando as descargas parciais como os trabalhos de SANTOS (2010) e STONE et al (2009), e muitos outros.

3.2.5.1 - Impregnação Inadequada: Fabricação

Quadro 3.1 - Mecanismos de falhas, sintomas e testes de detecção de impregnação Inadequada

Mecanismo de Falha	Sintomas	Testes de detecção
Impregnação inadequada	PD	PDA, $\tan \delta$, fator de potência

Quando sob estresse de tensão, descargas podem ocorrer no interior desses vazios e atacar a resina orgânica. Isso pode danificar as isolações dos condutores de cobre e das espiras quando as descargas ocorrem próximas aos condutores de cobre. Se as descargas ocorrem no interior da isolação, isso é menos prejudicial,

pois todo o vazio está circundado por mica, podendo levar anos para uma falha de grande porte (ZHU, et al, 2006), conforme mostrado na Figura 3.7.

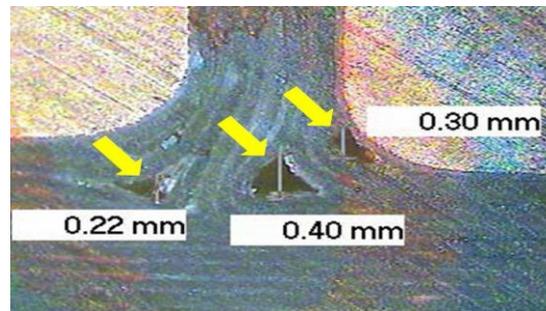


Figura 3.7 – Foto ilustrativa de impregnação inadequada
Fonte: ZHU, *et al*, (2006).

3.2.5.2 - Descargas na Ranhura: Falhas na Cobertura Semicondutora

Quadro 3.2 - Mecanismos de falhas, sintomas e testes de detecção de Falhas na cobertura semicondutora

Mecanismo de Falha	Sintomas	Testes de Detecção
Falhas na cobertura semicondutora	PD, descarga na ranhura, ozônio	PDA, inspeção visual e monitorar ozônio

Se a camada semicondutora deteriora, ou se há uma alta resistência de contato (maior que 5000 ohms), descargas elétricas surgem dentro da ranhura com conseqüente produção de ozônio, as descargas e o ozônio aceleram a decomposição das resinas epóxi ou poliéster. Se as barras forem mantidas fixas, pode levar décadas para a ocorrência de uma ruptura elétrica, portanto o sistema de cunhagem deve ser verificado e mantido em pleno funcionamento. O reparo é muito difícil, portanto a prevenção é essencial (STONE *et al*, 2009), como mostra na Figura 3.8:



Figura 3.8 – Falha na cobertura semicondutora.
Fonte: STONE *et al*, (2009).

3.2.5.3 - Descargas na Ranhura: Enrolamento Solto

Quadro 3.3 - Mecanismos de falhas, sintomas e testes de detecção de Enrolamento solto

Mecanismo de Falha	Sintomas	Testes de Detecção
Enrolamento solto	PD, ozônio, cunhas Soltas	PDA, inspeção visual, monitorar ozônio e testes da cunhagem

O sistema de cunhagem fixa as bobinas, sustentando-as contra forças radiais. Se essa fixação é feita e mantida de modo adequado, dificilmente ocorrerão problemas com bobinas soltas. Entretanto, algumas resinas utilizadas atualmente encolhem após a cura, fazendo com a bobina possa ficar solta dentro da ranhura. Também alguns tipos de cunhagens e materiais de fixação podem encolher ou ficarem quebradiços com o tempo, permitindo que bobinas fiquem soltas.

Na presença de vapor de óleo e contaminantes, cunhas tipo mola (*ripple springs*) e alguns materiais de fixação perdem totalmente suas características de fixação, quando as bobinas ficam soltas, elas vibram e sofrem abrasão contra a parede do núcleo. No início desse processo, os danos são mais localizados, nos pontos onde a superfície semicondutora se afasta e volta a tocar o núcleo. Com o incremento do problema, a superfície pode se danificar totalmente devido tanto os estresses elétricos quanto mecânicos. O tempo de falha é desconhecido, porém pode ser bem rápido (algo em torno de 2 anos) em isolações termorrígidas (*thermosets*), como epóxi e poliéster, em função da diminuição da espessura da isolação (*groundwall*) (STONE WARREN, 2010), como mostrado na Figura 3.9.



Figura 3.9 – Foto ilustrando enrolamento solto da ranhura
Fonte: POLUX, (2010).

3.2.5.4 - Centelhamento por Vibração: Fabricação

Quadro 3.4 - Mecanismos de falhas, sintomas e testes de detecção de centelhamento por vibração

Mecanismo de Falha	Sintomas	Testes de Detecção
Centelhamento por vibração	PD, ozônio, cunhas soltas	PDA, inspeção visual, monitorar ozônio e testes da cunhagem

Apesar de visualmente parecido com descargas na ranhura, o centelhamento por vibração é um processo de deterioração completamente diferente. O mecanismo deriva do fluxo magnético no núcleo e, enquanto que as descargas parciais somente podem ocorrer nas barras de maior potencial, o centelhamento por vibração pode ocorrer em qualquer ponto do enrolamento, incluindo o neutro. Essencialmente, se uma barra pode vibrar na ranhura, uma área ao longo da superfície da barra pode se tornar isolada do núcleo. Um circuito de corrente pode então ser criado entre a cobertura semicondutora, as laminações e os tirantes de fixação do núcleo. Se a cobertura semicondutora for muito condutiva, uma corrente pode circular por esse circuito devido ao campo magnético no núcleo. A vibração da barra faz com que a cobertura semicondutora perca o contato com o núcleo, fazendo com que a corrente seja interrompida e ocorra um centelhamento que pode danificar a isolação da barra (STONE, WARREN, 2010) como mostrada na Figura 3.10:

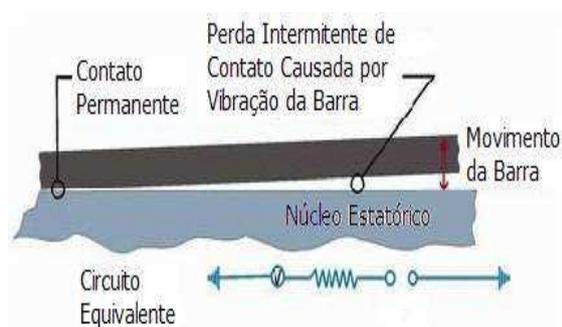


Figura 3.10 – Exemplo de centelhamento por vibração
Fonte: BILL et al, (2008).

3.2.5.5 - Deterioração da Interface de Alívio de Tensão: Fabricação

Quadro 3.5 - Mecanismos de falhas, sintomas e testes de detecção de interface de alívio de tensão.

Mecanismo de Falha	Sintomas	Testes de Detecção
Interface de alívio de Tensão	PD, pó branco (ácido nítrico), ozônio	PDA, $\tan \delta$, fator de potência, inspeção visual e monitorar Ozônio

Devido aos altos estresses elétricos e temperaturas, a interface de alívio pode deteriorar, especialmente quando usada pintura ao invés de fitas. Como resultado, a interface de alívio perde contato com o núcleo, e flutua para níveis de alta tensão, fazendo surgir arcos da interface para a cobertura semicondutora (aterrada) (POLUX, 2010), a Figura 3.11 exemplifica este tipo de falha:



Figura 3.11 – Foto de uma deterioração da interface de alívio de tensão
Fonte: POLUX, (2010).

3.2.5.6 - Espaçamento Inadequado: Instalação

Quadro 3.6 - Mecanismos de falhas, sintomas e testes de detecção de espaçamento inadequado

Mecanismo de Falha	Sintomas	Testes de Detecção
Espaçamento inadequado	PD, pó branco, descoloração da isolação e ozônio	PDA, inspeção visual, monitorar ozônio

Devido a erros de projeto, algumas máquinas são construídas com um espaçamento inadequado entre barras de fases diferentes, nas cabeças das bobinas. Esse pequeno espaçamento pode ser suficiente para iniciar atividades de

descargas parciais, com conseqüente erosão da isolação e eventual ruptura (STONE *et al*, 2009), conforme a Figura 3.12:



Figura 3.12 – Foto de um exemplo de espaçamento inadequado
Fonte: Stone et al, (2009).

3.2.5.7 - Conexões Elétricas Pobres: Instalação

Quadro 3.7 - Mecanismos de falhas, sintomas e testes de detecção de má conexão elétrica

Mecanismo de Falha	Sintomas	Testes de Detecção
Má Conexão elétrica	PD, pó branco e descoloração das conexões	PDA, inspeção visual, temperatura com infravermelho

Conexões mal feitas ou envelhecidas, em parafusos na conexão de cabos de alimentação de motores ou no fechamento (solda) das barras nos geradores, podem levar à oxidação do cobre e conseqüente faiscamento e sobreaquecimento localizados (POLUX, 2010), como mostrado na Figura 3.13:



Figura 3.13 – Foto ilustrando um exemplo de más conexões elétricas
Fonte: POLUX, (2010).

3.2.5.8 - Deterioração Térmica: Operação

Quadro 3.8 - Mecanismos de falhas, sintomas e testes de detecção de deterioração térmica

Mecanismo de Falha	Sintomas	Testes de Detecção
Deterioração térmica	PD, descoloração da Isolação	PDA, $\tan \delta$, fator de potência, inspeção visual

Quando exposta à sobrecarga térmica, a isolação perde suas características adesivas, acarretando o fenômeno chamado de delaminação, ou “desfolhamento” das camadas. Os condutores internos de cobre ficam livres para vibrar e então atividades de descargas parciais aparecem nos vazios internos. Os danos à isolação são cumulativos e não reversíveis. A deterioração térmica pode ocorrer devido a diversos motivos, como operação contínua em regime de sobrecarga, erro no projeto das barras fazendo com que as mesmas trabalhem sempre em sobrecarga térmica mesmo com a máquina em operação nominal, refrigeração deficiente (ou entupida por contaminações) e desbalanço das fases (STONE *et al*, 2000), como mostrado na Figura 3.14:

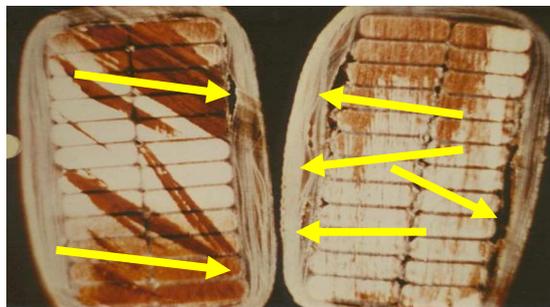


Figura 3.14 – Foto ilustrando um exemplo de delaminação

Fonte: STONE *et al*, (2000).

3.2.5.9 - Ciclos de Carga: Operação

Quadro 3.9 - Mecanismos de falhas, sintomas e testes de detecção devido ao ciclo de carga

Mecanismo de Falha	Sintomas	Testes de Detecção
Ciclos de carga	PD, ruptura da isolação na saída da barra	PDA, $\tan \delta$, fator de potência, inspeção visual, Surge Test, Hipot

Os materiais que compõem as barras do estator possuem diferentes coeficientes lineares de expansão térmica. O cobre se expande linearmente devido às perdas por I^2R , enquanto que a isolamento a ele colada, devido ao seu baixo coeficiente de expansão e à menor temperatura a que está sujeita, não se expande do mesmo modo. Esse estresse pode causar o enfraquecimento da cola entre a isolamento e o cobre, levando a curtos os condutores de cobre e espiras. Esse problema é mais comum em máquinas com grandes núcleos, com grandes barras ou bobinas (maiores que 2 m).

Os ciclos de partida e parada também exigem eletromagneticamente as barras, e caso o sistema de fixação e cunhagem esteja falho, as barras podem se movimentar dentro da ranhura, causando abrasão da superfície semicondutora contra o núcleo e conseqüente deterioração. Em alguns sistemas antigos de isolamento (termoplásticas, como asfalto), os ciclos de carga causam pequenos rompimentos da barra que ocorrem na circunferência da bobina no ponto de saída da ranhura (um fenômeno chamado "*girth cracking*"). Isso ocorre porque o cobre aquecido expande linearmente e arrasta a isolamento fora da ranhura. Quando o cobre esfria e se contrai, a isolamento não retorna à sua posição e forma originais. Esse comportamento repetitivo leva à ruptura da parte externa da bobina (WILLIAM, 2005), como mostrado na Figura 3.15:



Figura 3.15 - Foto de um exemplo de comportamento de ruptura por causa do ciclo de carga

Fonte: WILLIAM, (2005).

3.2.5.10 - Contaminação dos Enrolamentos: Operação

Quadro 3.10 - Mecanismos de falhas, sintomas e testes de detecção por contaminação de enrolamentos.

Mecanismo de Falha	Sintomas	Testes de Detecção
Contaminação dos Enrolamentos	PD, combinação de óleo, poeira, graxa, pó branco	PDA, IR, PI, Hipot, $\tan \delta$, fator de potência e inspeção visual

A contaminação em uma máquina pode ser causada por uma mistura de vapor de óleo, poeira, sujeira, resíduos do desgaste de peças da própria máquina ou deixados em procedimentos de manutenção. Essa contaminação pode propiciar o aparecimento de pequenas “pontes” entre diferentes potenciais (na ranhura fase neutro ou nas cabeças de bobinas fase-fase), causando o surgimento de descargas parciais que atacam a isolação (WILLIAM, 2005), como mostrada na Figura 3.16:



Figura 3.16 - Foto de exemplo de contaminação devido a poeiras
Fonte: WILLIAM, (2005).

3.3 - CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

Neste capítulo foram estudados conceitos sobre a construção dos enrolamentos estatóricos assim como seus isolamentos, e realizada um estudo detalhado sobre descargas parciais, destrinchando vários itens como classificação, condições para ocorrências, o seu comportamento na tensão alternada e por último uma descrição sucinta da degradação de descargas parciais causada por falhas de vários esforços atuantes, então o que se pode concluir deste capítulo o seguinte:

Descarga parcial é uma descarga elétrica que ocorre numa região do espaço sujeita a um campo elétrico cujo caminho condutor formado pela descarga não une os dois eletrodos de forma completa e que o fenômeno da sua ocorrência é

decorrente de vários fatores de esforços atuantes como por motivos devido à tensão elétrica, mecânicos e ambientais, e o mais específico que interessa para estudos de caso desta dissertação, descargas parciais decorrente ao ciclo de carga (partidas e paradas) que podem causar pequenos rompimentos da barra que ocorrem na circunferência da bobina no ponto de saída da ranhura.

CAPÍTULO 4

PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Este capítulo apresenta uma descrição da metodologia utilizada nesta dissertação do estudo realizado na usina hidrelétrica de Balbina. Será realizada uma abordagem do equipamento que foi utilizado para as medições, o método de medição e mostrar alguns modelos de ensaios de análise de descargas parciais para apresentar no estudo de caso. A análise dos dados medidos através dos ensaios será comparada com as informações do desempenho de geração no período destes ensaios, extraídos do centro de comando central da usina hidrelétrica de Balbina.

4.1 - ESPECIFICAÇÃO DO PROBLEMA DA PESQUISA

Nas usinas hidrelétricas e também em usinas termelétricas, é freqüente haver ciclo de carga, isto é, freqüentes partidas e paradas em geradores síncronos e turbo geradores, que pode influenciar no rendimento da máquina, na sua vida útil. Para comprovar essa influência, foi escolhida uma usina hidrelétrica, no caso a usina hidrelétrica de Balbina, para a realização do estudo a fim de se verificar o grau da severidade no prejuízo em perdas elétricas nas suas máquinas. Para identificação do decaimento da vida útil das máquinas, através destes ciclos de partidas e paradas que geralmente causam uma deterioração do isolamento dos enrolamentos, foi usado como parâmetro medidas das descargas parciais encontrados nos instrumentos PDA²-H e PDA-IV.

Pesquisadores, há mais de 50 anos de experiência com testes de descargas parciais, têm mostrado que, em geral, para máquinas avaliadas acima de 3,3 kV, frequentemente é dado o aviso da progressão da descarga parcial antes mesmo da provável falha no enrolamento ser conhecida (STONE, 2004).

² - PDA: Analisador de descargas parciais, instrumento usado para verificar a magnitude das descargas parciais no estator.

Diante desse fato, a proposta deste trabalho, foi apresentar um histórico dos resultados de monitoramento do grau de deterioração dos isolamentos através de diagnósticos nos instrumentos que medem descargas parciais ao longo de um período 2005 a 2008, identificando através do sumário NQN (número quantizado normal) no PDA-H e comparando com número de horas das máquinas paradas nesse período, com isso comprovando uma tendência de decréscimo da vida útil do estator da máquina já esperado. Também no período entre janeiro a setembro de 2010 será registrado neste trabalho, os resultados de monitorações através do instrumento PDA-IV do sumário Qm (número de máxima amplitude) e através do relatório de indicadores de desempenhos TEIF e IP das cinco máquinas se verificará a comprovação dessa tendência da deterioração nos estatores das cinco máquinas e mostrará um resultado do estudo.

4.2 - COLETAS DE DADOS

Para realização do estudo foram coletadas informações nos ensaios de análise de diagnóstico:

- A temperatura em °C dos enrolamentos do estator e do núcleo;
- A potência gerada em MW;
- Os dados de magnitude dos pulsos PD de descargas parciais NQN e Qm em mV;
- A potência reativa em MVAr;
- A temperatura ambiente °C;

E também foram analisados os dados de desempenho para se saber o histórico de cada hidrogerador através das horas em que as máquinas ficaram paradas no período dos ensaios da análise de diagnóstico de falhas, para efeito de comparação com resultados dos ensaios e tirar uma conclusão plausível com a proposta de estudo desta dissertação.

4.3 - ANÁLISE DE DESCARGAS PARCIAIS

Os ensaios do analisador de descargas parciais (PDA) do estudo de caso requerem a instalação de capacitores de alta tensão nos enrolamentos do estator do hidrogerador. Os capacitores são tipicamente estimados em 80 pF em 13,8kV. Estes acopladores detectarão os pulsos de tensão de altas frequências, que estão permanentemente conectados no final do enrolamento do estator de alta tensão, conforme mostrado na Figura 4.1:

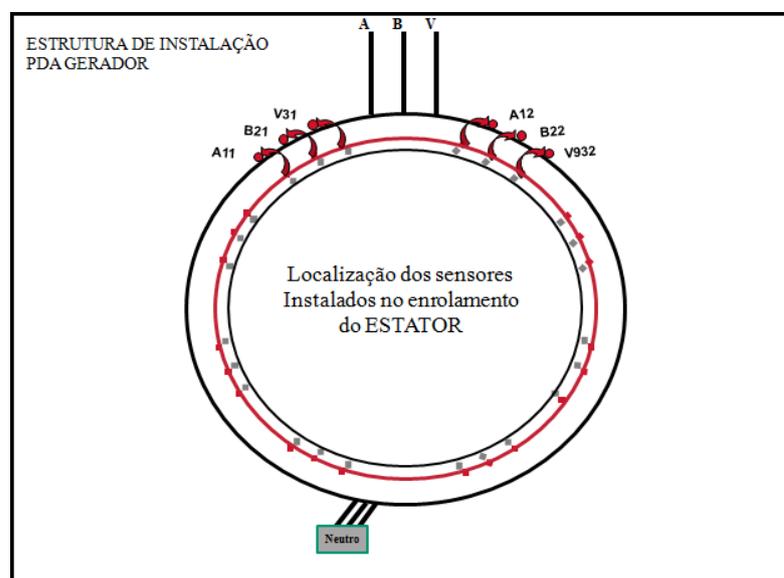


Figura 4.1 – Arquitetura da montagem dos sensores no final do enrolamento de cada máquina.

Conforme é mostrada na Figura 4.1, são instalados nos finais dos enrolamentos do estator de cada fase, pares de sensores acopladores para detectar o sinal oriundo dos pulsos PD (+/-), que será visto no instrumento de medição de descargas parciais a fim de avaliar o grau de deterioração do isolamento do barramento dos estator. A isolação do capacitor é através de material resistente chamado epoxy-mica. O dielétrico epoxy-mica tem um fator de dissipação que é estável com a temperatura e então não falhará se ocorrer um aumento da temperatura de operação.

Esses acopladores (capacitores) podem associar as descargas parciais (ou interferências). Com o projeto apropriado e colocação dos acopladores, os pulsos

dos ruídos externos podem ser significantes atenuados, como mostrados na Figura 4.2:

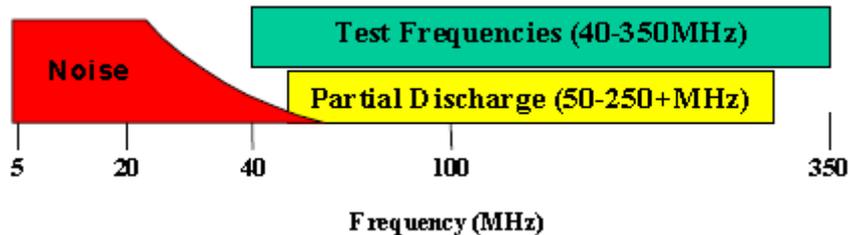


Figura 4.2 – Espectro de frequência típico para ruído e PD em motores e geradores
Fonte: STONE, (2006).

Nesta Figura 4.2 identifica que através da inspeção extensiva dos ambientes de ruídos em típicas usinas estavam predominantes em frequências abaixo de 10MHz. No mesmo tempo, quando medições são tomadas fisicamente próximas ao enrolamento do estator, PD nos enrolamentos tende a produzir frequências até várias centenas de megahertz. Então, o melhor sinal para a proporção ruído por pulsos PD ocorre em frequências acima de 40 MHz. Então, o instrumento PDA consegue separar os ruídos dos pulsos PD, através de um circuito passa altas frequências com uma impedância de entrada de 50 Ω , que não deixa passar as frequências abaixo de 50 MHz.

4.3.1 - Tipos de metodologias de ensaios utilizados

O PDA (Analisador de Descargas Parciais) é um sofisticado instrumento eletrônico na qual se mede o número e magnitude de pulsos dos acopladores permanentes. O instrumento é portátil, e pode deste modo ser usado para ensaios em número largo de hidrogenadores equipados com acopladores permanentes.

Para realização das análises foram utilizados dois instrumentos PDA, o PDA-IV e o PDA-H.

As primeiras análises foram realizadas pelo PDA-H, instrumento desenvolvido pela empresa da antiga FES (empresa canadense), que trabalha em uma plataforma do MS-DOS, no sistema operacional Windows 95, e o último instrumento o PDA-IV, desenvolvido pela empresa IRIS POWER (empresa canadense), o que é usado atualmente nos ensaios de análises de descargas parciais na usina hidrelétrica de

Balbina, adquirido no ano de 2010. O PDA-IV é um equipamento mais moderno em relação ao PDA-H, onde é possível fazer as análises no próprio sistema operacional Windows XP, gerando um relatório através do software PDlitePRO, na qual se pode fazer uma leitura completa do estado atual do isolamento, do tipo de causa de falha, e do lugar mais predominante das descargas parciais está acontecendo no pior ponto do estator, lendo as magnitudes das descargas através do sumário Qm, como mostrada na Figura 4.3.



Figura 4.3 – Foto do PDA-IV com os três pares de acopladores conectados

Como mostrada na foto acima, o PDA-IV conectado em cada par de acopladores de cada fase (A, B, V) na caixa dos sensores do gerador síncrono, realizando os ensaios das medições de descargas parciais.

4.3.2 – Metodologia dos testes do analisador de Descargas Parciais – PDA

Os testes PDA podem ser realizados nas seguintes etapas:

- FLH – Teste com carga a quente;
- NLH – Teste sem carga a quente;
- NLC – Teste sem carga a frio.
- FLC – Teste com carga a frio

1) Relação pulsos positivos, testes FLH e NLH – Para mesmas condições de potência (+/- 10%) e temperatura (Variação de 5°C):

A curva de pulsos positivos (FLH) se afasta da curva de pulsos positivos (NLH) no sentido crescente de magnitude de DP (mV) – significa indicação de estado inicial diminuição da firmeza das cunhas de fixação do enrolamento.

2) Relação pulsos positivos e negativos – Teste FLH

a) Curva pulsos negativos prevalecendo sobre a curva de pulsos positivos:

➤ Significa que a descarga parcial predominante está localizada na interface cobre-isolação;

b) Curva de pulsos positivos prevalecendo sobre a curva de pulsos negativos:

➤ Significa que a descarga parcial predominante está localizada no interior da ranhura, barra para núcleo (deterioração da tinta condutiva);

c) Curva de pulsos negativos sobrepondo-se sobre a curva de pulsos positivos, ou seja, não há predominância de nenhuma das curvas:

➤ Significa que a descarga parcial predominante está localizada no interior da isolação da barra (Bolhas);

Quando a curva toma a forma de um “joelho” sugere que a descarga parcial predominante se localiza na região aérea do enrolamento (cabeças de bobinas)

3) Teste Sem carga a frio – NLC (Variação de 5°C) – Teste para referência na análise da tendência de crescimento das DPs.

4) Teste Com Carga a frio – FLC – (Variação de 5°C) – Teste para referência na análise da tendência de crescimento das DPs.

Geralmente no antigo instrumento PDA-H, os testes obedecem a essas regras do FLH, NLH, mas no instrumento PDA IV, é possível fazer esse teste para verificação de indicação do estado inicial da diminuição da firmeza das cunhas de fixação do enrolamento em modo on-line, devido ser um instrumento mais sofisticado tecnologicamente. Atualmente na usina hidrelétrica de Balbina não são realizados os testes NLC e FLC, devidos estes apenas servir como parâmetros.

Para os ensaios do estudo de caso desta dissertação serão utilizados testes FLH, utilizados em ambos PDA (H e IV).

CAPÍTULO 5

ESTUDO DE CASO: UHE BALBINA – ELETROBRÁS

Neste capítulo será apresentado um estudo de caso sobre a influência do ciclo de partidas e paradas no estator de geradores síncronos na usina hidrelétrica de Balbina. O objetivo do trabalho é confirmar uma tendência de decaimento da vida útil do gerador síncrono que apresenta um histórico alto de horas da reserva de energia desligada por diversos motivos, como desligamento forçado, por condições externas, por manutenção corretiva e preventiva e que sofrem repetitivas partidas e paradas de suas máquinas com isso aumentando a frequência e magnitude das descargas parciais no estator da máquina.

Neste trabalho será apresentada mensalmente a quantidade de horas em que as máquinas ficaram paradas no horário de maior carga e de medidas da magnitude de tensão de descargas parciais dos seus enrolamentos obtidos através de ensaios e realizados comparações com esses resultados (quantidade de horas de indisponibilidade das máquinas e medidas dos ensaios).

5.1 - APRESENTAÇÃO DO CENÁRIO

A usina hidrelétrica de Balbina está localizada no município de Presidente Figueiredo, no estado do Amazonas, a 180 km da cidade de Manaus, no rio Uatumã, um dos afluentes do rio Amazonas. A Figura 5.1 apresenta uma vista aérea da referida usina.



Figura 5.1 - foto da usina hidrelétrica de Balbina

A usina possui capacidade de geração de 250 MW de energia elétrica, sendo que são 5 geradores 50MW cada. Os geradores são do tipo Umbrella de baixa rotação (105,88 rpm), capacidade nominal de 55,5 MVA e tensão nominal de 13,8 kV, e são numeradas de 1 a 5, como observado na Figura 5.2.



Figura 5.2 – Vista superior das 5 unidades geradoras

As unidades geradoras 1,3 e 5 são auto-alimentadas, ou seja, parte da energia gerada por elas é utilizada para fornecer a corrente de excitação do estator e alimentar as bombas e demais equipamentos elétricos necessários ao funcionamento da unidade, e os geradores 2 e 4 possuem alimentação externa. Portanto, em operação normal, pelo menos um dos geradores de número ímpar deve estar sempre em operação, por isso, há uma ocorrência maior de geradores pares terem freqüentes partidas e paradas e conseqüentemente, com grande número de horas com reserva de energia desligada.

5.2 MÉTODO DE ANÁLISE

Foram coletadas informações durante os anos de 2005 a 2008 e janeiro a setembro de 2010. Nos anos de 2005 a 2008 foram coletadas informações da quantidade de horas em que cada máquina ficou parada, e também extraída informações dos ensaios de análises de descargas parciais através de um instrumento chamado PDA (analisador de descargas parciais).

Nesse primeiro período (2005 a 2008) foi usado o PDA-H, tipo de instrumento citado no capítulo anterior.

No período de 2010, precisamente nos anos de janeiro a setembro, serão apresentadas informações do número de horas em que as máquinas ficaram paradas e da quantidade de partidas e paradas, e informações dos ensaios de análise de descargas parciais no PDA-IV, também citado no capítulo anterior.

5.3 ANÁLISES DOS RESULTADOS

Nesta seção serão apresentados os resultados. Serão feitas comparações com a quantidade de horas com reserva de energia desligada e outras informações extraídas do relatório do indicador de desempenho da usina em relação aos resultados das magnitudes de descargas parciais obtidas durante os ensaios para diagnosticar a situação do estator de cada máquina.

5.3.1 - Ensaio com PDA-H

Foram coletados os resultados obtidos dos ensaios semestrais de magnitudes de descargas parciais com o PDA-H durante o período de dezembro de 2005 a agosto de 2008. Nesse instrumento, a variável conhecida é chamada de NQN, que é o número de quantidade normalizada, e a unidade é dada em milivolts (mV). Uma vez que a condição de um estator em particular fosse conhecida, seria suficiente obter tendência (ou comportamento) das alterações dos valores NQN de modo a se detectar o aparecimento de novos problemas ou o incremento daqueles já existentes.

Os ensaios são extraídos em cada fase do estator, sendo que cada fase existem dois acopladores.

5.3.1.1 - Resultados da UGH-01 a UGH-5 com PDA-H

Tabela 5.1 – Resultados de ensaios do PDA-H – NQN dada em mV.

Acopl.	Dez/05		jul/06		dez/06		jul/07		jan/08		ago/08	
	P + (mV)	P - (mV)										
G1AC1	128	128	134	125	75	125	77	125	81	182	128	29
G1AC2	78	77	80	78	54	64	66	63	66	68	22	24
G1BC1	64	66	54	61	53	60	60	60	51	48	22	38
G1BC2	142	78	141	132	125	174	126	123	131	124	121	117
G1VC1	135	150	180	202	187	146	142	150	190	150	151	150
G1VC2	128	69	107	42	27	25	27	57	48	48	49	36
G2AC1	195	220	317	651	220	295	187	255	204	207	218	211
G2AC2	146	212	238	745	162	305	86	276	222	227	150	195
G2BC1	218	219	665	665	167	373	162	345	169	171	233	302
G2BC2	151	152	245	464	175	173	157	149	164	169	162	162
G2VC1	273	221	460	509	311	247	295	230	315	246	306	162
G2VC2	235	234	373	391	171	173	229	163	242	177	239	171
G3AC1	126	133	123	177	132	125	135	125	126	124	75	76
G3AC2	200	151	194	192	199	388	312	284	349	291	218	210
G3BC1	157	227	148	150	148	148	150	164	162	237	139	215
G3BC2	159	157	142	142	140	140	81	185	134	132	117	110
G3VC1	220	157	157	159	157	157	160	225	169	239	160	167
G3VC2	309	229	244	200	247	238	318	482	334	340	315	255
G4AC1	69	61	37	60	115	130	108	120	107	110	72	76
G4AC2	229	226	210	150	224	220	224	220	205	222	162	157
G4BC1	157	199	186	172	212	199	220	209	270	200	152	207
G4BC2	207	220	177	175	220	226	189	209	244	190	196	196
G4VC1	205	209	185	190	142	149	135	142	187	142	177	151
G4VC2	357	268	244	234	284	312	282	270	199	255	200	205
G5AC1	108	54	80	87	37	60	27	54	37	64	27	55
G5AC2	15	37	54	82	5	48	11	10	27	64	26	27
G5BC1	64	78	34	70	37	65	27	54	60	66	51	60
G5BC2	15	92	34	27	54	26	36	11	36	5	38	26
G5VC1	57	55	47	54	60	48	37	36	47	36	35	36
G5VC2	47	27	5	11	10	10	10	11	5	5	5	5

Nesta Tabela 5.1 mostra os resultados das medidas que foram encontradas durante os ensaios de descargas parciais indicadas por P+ (pulsos positivos) e P- (pulsos negativos), periodicamente de seis e seis meses, de dezembro de 2005 a agosto de 2008. A sigla dos acopladores de cada medida significa o número do gerador (**G1AC1**), a indicação da fase (**G1AC1**) e a indicação do número do acoplador (**G1AC1**).

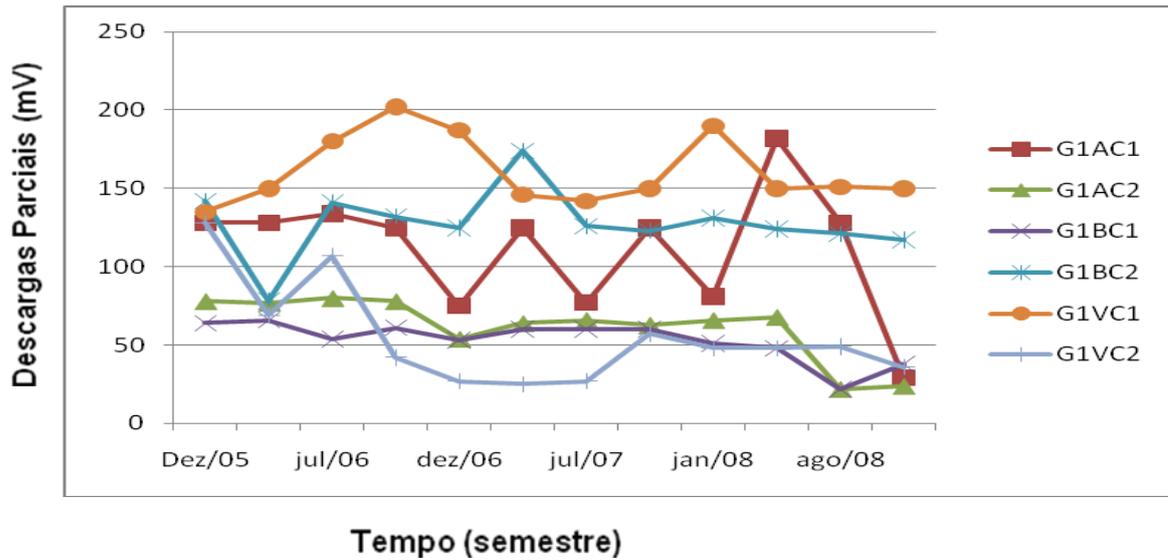


Figura 5.3 – Histórico dos ensaios de descargas parciais NQN da UGH-01

Esta Figura 5.3 mostra o histórico dos ensaios de descargas parciais das magnitudes NQN encontradas com o PDA-H da unidade geradora hidráulica número 1 extraído da Tabela 5.1. A seguir serão mostrados o comportamento do gerador nesse período mostrando a quantidade de horas paradas, a fim de fazer uma análise dos resultados.

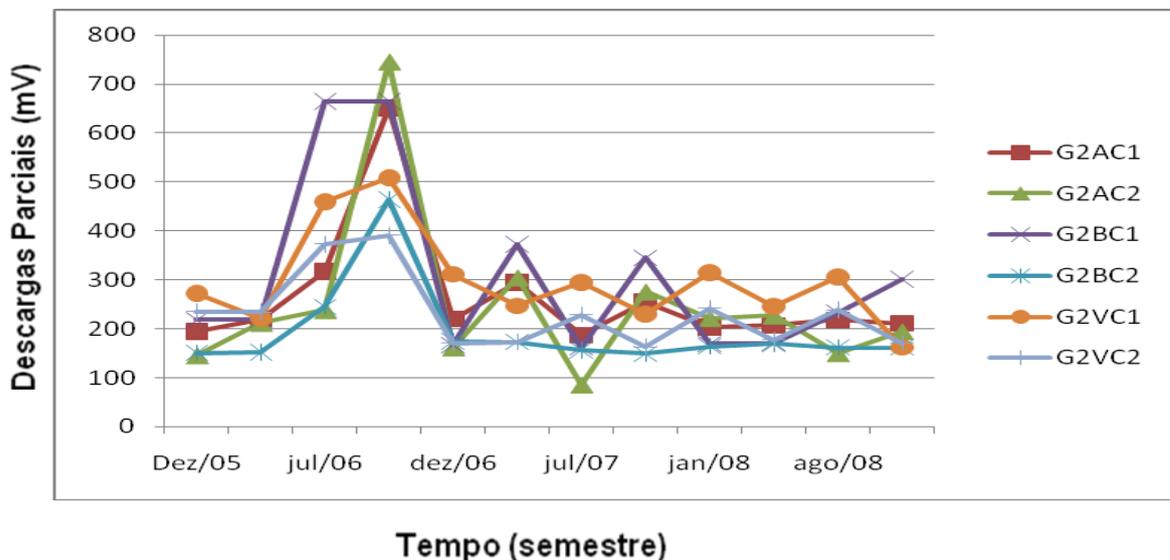


Figura 5.4 – Histórico dos ensaios de descargas parciais NQN da UGH-02

Esta Figura 5.4 mostra os resultados dos ensaios de descargas parciais NQN, de cada acoplador, extraído através da Tabela 5.1, obtido na unidade geradora hidráulica número 2. Verificou-se que nesta máquina apresentou magnitudes de

descargas parciais maiores em relação a máquina 1. Em seguida serão mostradas o histórico da quantidade de horas em que a máquina ficou parada para comprovar o resultado.

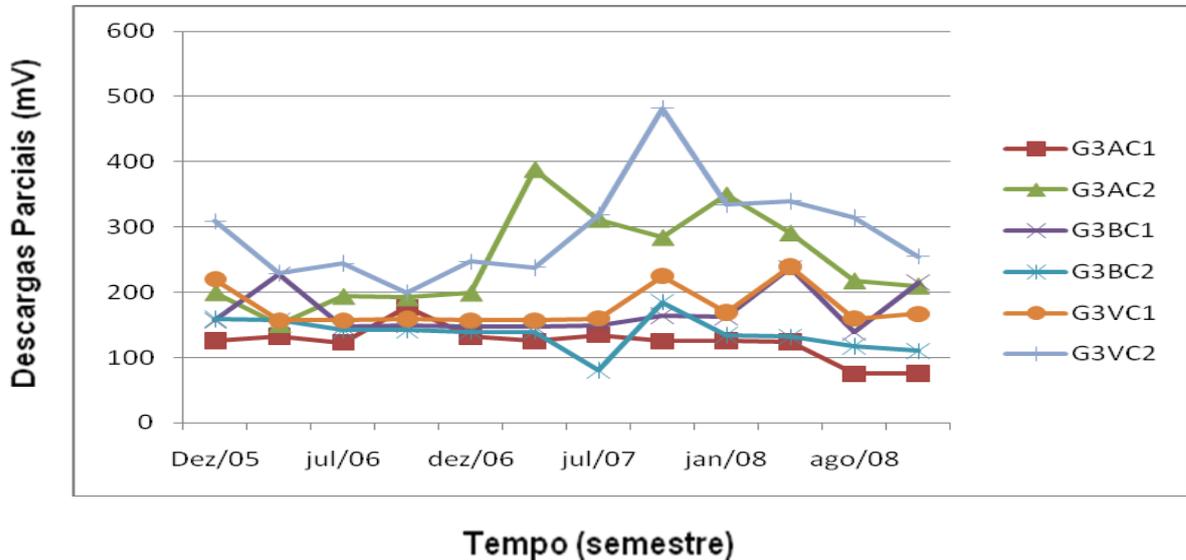


Figura 5.5 – Histórico dos ensaios de descargas parciais NQN da UGH-03

Esta Figura 5.5, mostra o histórico dos ensaios de descargas parciais da unidade geradora hidráulica número 03, extraído da Tabela 5.1. Assim como a unidade geradora hidráulica 01, esta máquina é essencial para alimentar os serviços auxiliares como as motobombas e demais equipamentos elétricos necessários ao funcionamento da unidade, por isso necessita ficar em operação contínua ou alternar o funcionamento com outras unidades ímpares.

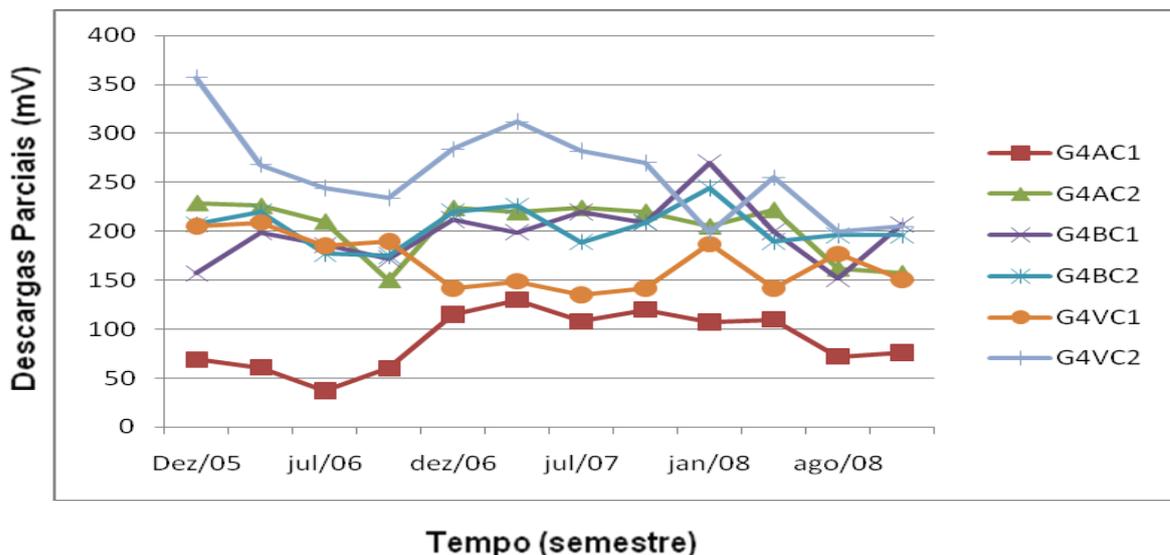


Figura 5.6 - Histórico dos ensaios de descargas parciais NQN da UGH-04

Nesta Figura 5.6 é apresentada o histórico dos ensaios de descargas parciais NQN da unidade geradora hidráulica número 04, extraído através da Tabela 5.1, obtidas no período de 2005 a 2008. Esta máquina tem uma característica semelhante à máquina 2, como não alimenta os serviços auxiliares como motobombas e outros equipamentos elétricos, de acordo a demanda de carga, é permitida a sua parada a qualquer hora, assim aumentando sua quantidade de partidas e paradas conforme será mostrada mais a frente.

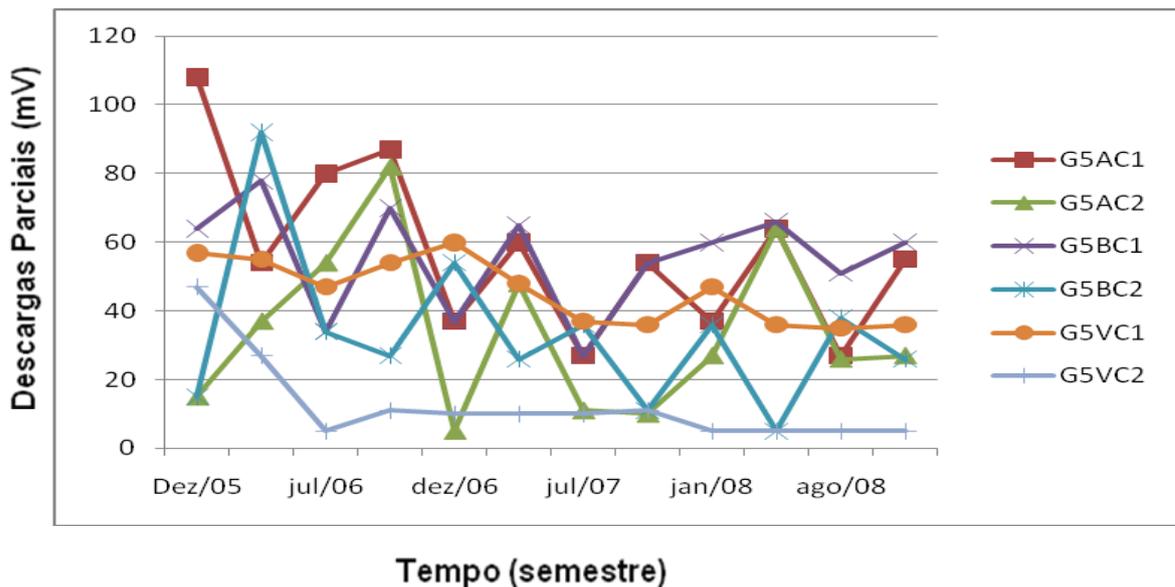


Figura 5.7 - Histórico dos ensaios de descargas parciais NQN da UGH-05

Nesta Figura 5.7 é apresentada o histórico das medidas dos ensaios de descargas parciais NQN da unidade geradora 05, extraído da Tabela 5.1. Esta unidade geradora tem as mesmas características da unidade geradora 01 e unidade geradora 03, geralmente esta máquina é a que tem uma operação mais constante em relação as outras unidades geradoras, por isso, que apresenta magnitudes menores de descargas parciais conforme será comprovado mais a frente.

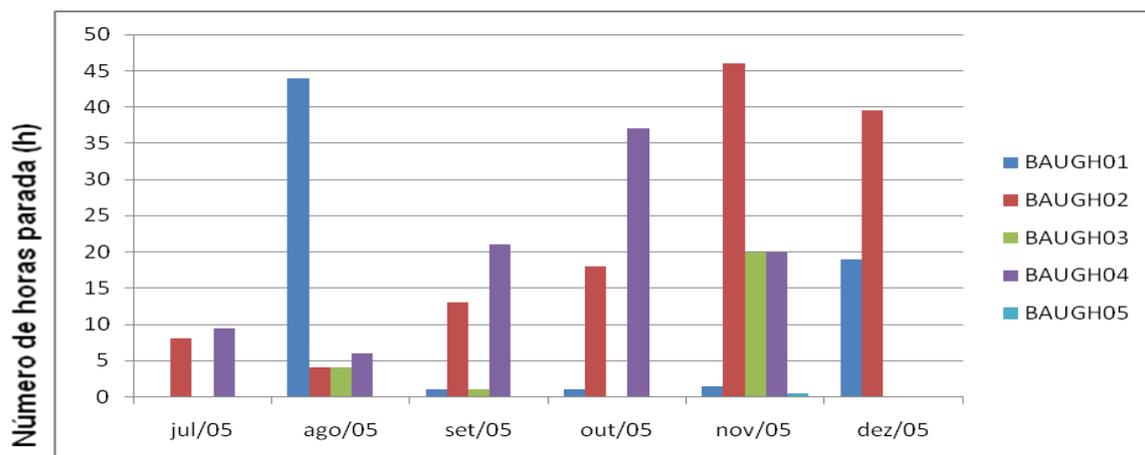
5.3.1.2 - Histórico de paradas das unidades geradoras 1 a 5

Neste tópico será mostrado o histórico das unidades geradoras hidráulicas em que ficaram paradas no horário de maior carga 13:00 às 16:00 e das 19:00 às 23:00, em que são coletados pelos operadores da usina hidrelétrica de Balbina a fim de se fazer comparações com os resultados anteriores.

Nas tabelas que serão apresentadas a seguir, se refere ao período de junho de 2005 a agosto de 2008:

Tabela 5.2 – Histórico de tempo em horas das unidades geradoras em que ficaram paradas no período de 2005

	BAUGH01	BAUGH02	BAUGH03	BAUGH04	BAUGH05
jul/05	0 h	8h	0h	9,5h	0h
ago/05	44h	4h	4h	6h	0h
set/05	1 h	13h	1h	21h	0h
out/05	1h	18h	0h	37h	0h
nov/05	1,5 h	46h	20h	20h	0,5h
dez/05	19 h	39,5h	0h	0h	0h



Tempo (mensal)

Figura 5.8 – Histórico da quantidade de horas paradas das UGH 1 a 5 no referido período de 2005

A Figura 5.8 mostra os dados coletados das horas em que as unidades geradoras hidráulicas 1 a 5 ficaram paradas no período de junho de 2005 a dezembro de 2005. Os dados do histórico de horas para parada de manutenção e a quantidade de partidas e paradas relacionados nesta Figura 5.8 não foram citados, percebe-se que as máquinas 2 e 4 tiveram uma frequência maior de incidências de horas paradas, seguido da máquina 1 e 3.

Tabela 5.3 – Histórico de tempo em horas das unidades geradoras em que ficaram paradas no período de 2006

	BAUGH01	BAUGH02	BAUGH03	BAUGH04	BAUGH05
jan/06	0 h	12 h	0 h	17 h	0 h
fev/06	0 h	29 h	0 h	22 h	0 h
mar/06	0 h	37 h	2 h	22 h	0 h
abr/06	8 h	126 h	19 h	70 h	0 h
mai/06	116 h	84 h	0 h	30 h	0 h
jun/06	0 h	4 h	0 h	6 h	3 h
jul/06	0 h	18 h	0 h	10 h	0 h
ago/06	0 h	2,5 h	0 h	0 h	0 h
set/06	0 h	7 h	0,5 h	4 h	0,5 h
out/06	0 h	4 h	1 h	0 h	11 h
nov/06	0 h	4,5 h	0,5 h	57 h	0 h
dez/06	0 h	0 h	0 h	47 h	0 h

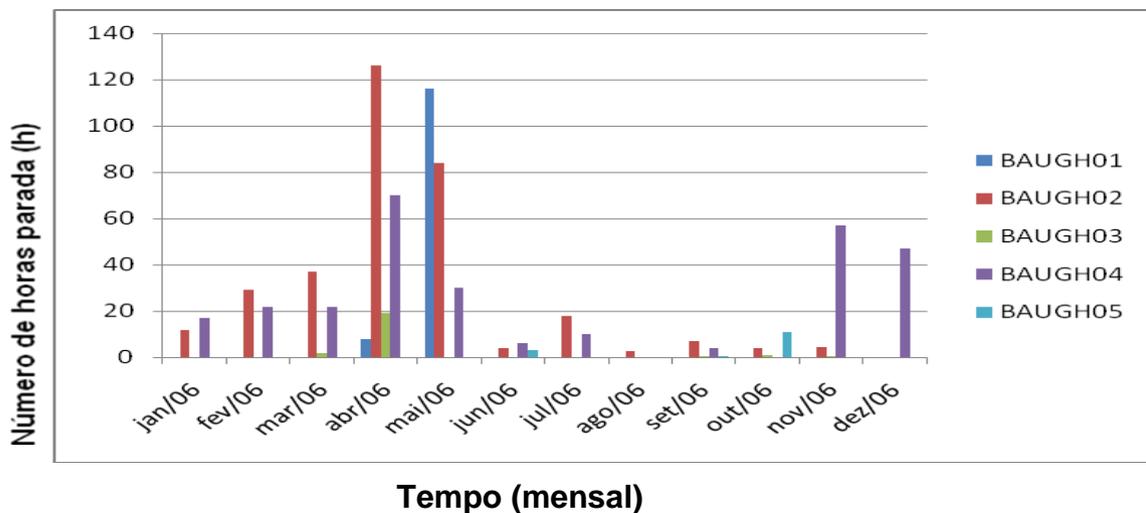


Figura 5.9 – Histórico da quantidade de horas paradas das UGH 1 a 5 no referido período no período de 2006

A Figura 5.9 refere-se ao período janeiro a dezembro de 2006 em que as unidades geradoras ficaram paradas no horário de maior carga 13:00 às 16:00 e 19:00 às 23:00, percebe-se que as unidades geradoras 2 e 4 e da unidade número 1 no mês de maio apresentaram maiores quantidades de horas com reserva de energia desligada. Como explanado anteriormente, existem alternância de operação

de unidades ímpares, geralmente acontecem com a unidade geradora 1 e 3, e a unidade geradora hidráulica número 5 praticamente trabalha em regime contínuo.

Tabela 5.4 – Histórico de tempo em horas das unidades geradoras em que ficaram paradas no período de 2007

	BAUGH01	BAUGH02	BAUGH03	BAUGH04	BAUGH05
jan/07	0 h	32 h	41 h	47 h	4 h
fev/07	0 h	25 h	11 h	35 h	0 h
mar/07	3 h	66 h	98 h	92 h	3 h
abr/07	3 h	98 h	58 h	95 h	0 h
mai/07	0 h	75 h	7 h	45 h	0 h
jun/07	1 h	85 h	0 h	46 h	0 h
jul/07	0 h	57 h	12 h	57 h	2 h
ago/07	0 h	15 h	4 h	83 h	0 h
set/07	0 h	50 h	7 h	35 h	0 h
out/07	0 h	29 h	4 h	39 h	0 h
nov/07	0 h	3 h	0 h	6 h	0 h
dez/07	0 h	42 h	0 h	35 h	0 h

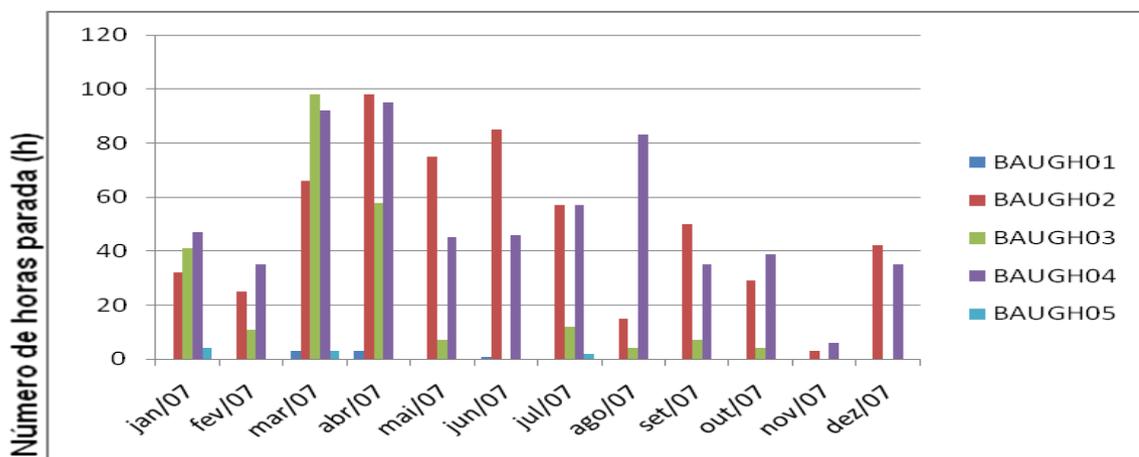


Figura 5.10 - Histórico da quantidade de horas paradas das UGH 1 a 5 no referido período de 2007.

Percebe-se que nesta Figura 5.10 as unidades geradoras hidráulicas 2 e 4 apresentam uma grande incidência de horas com reserva de energia desligada, seguidas da unidade geradora hidráulica 3.

Tabela 5.5 – Histórico de tempo em horas das unidades geradoras em que ficaram paradas no período de 2008

	BAUGH01	BAUGH02	BAUGH03	BAUGH04	BAUGH05
jan/08	2 h	49 h	0 h	65 h	0 h
fev/08	0 h	16 h	0 h	22 h	0 h
mar/08	0 h	0,5 h	0 h	0 h	0 h
abr/08	4 h	0 h	0 h	0 h	0 h
mai/08	0 h	0 h	0 h	0 h	0 h
jun/08	0 h	0 h	0 h	0 h	0 h
jul/08	0 h	0 h	0 h	0 h	0 h h
ago/08	0 h	0 h	0 h	0 h	0 h
set/08	0 h	0 h	0 h	7 h	2 h
out/08	0 h	6,5 h	0 h	5 h	0 h
nov/08	0 h	3 h	0 h	0 h	27 h
dez/08	0 h	0 h	0 h	0 h	0 h

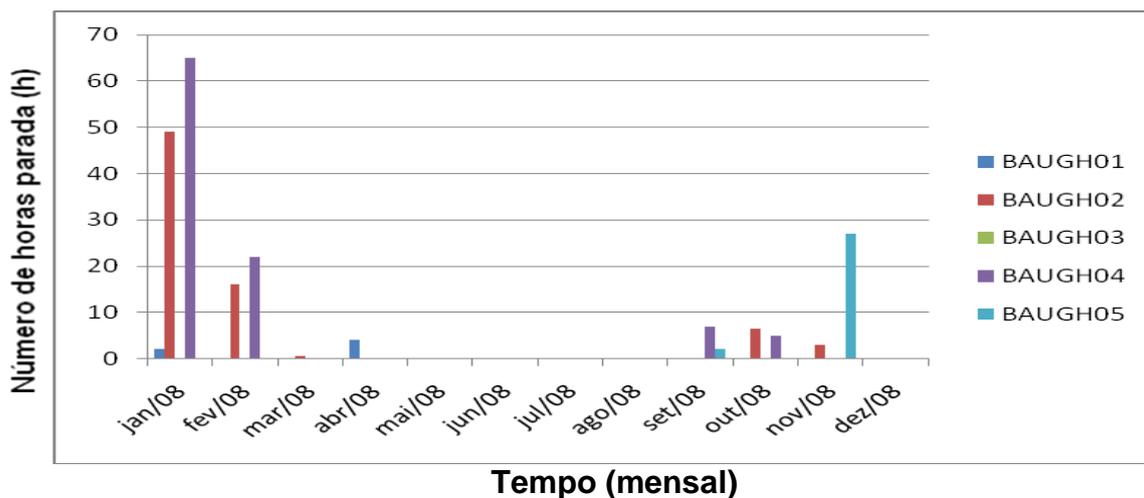


Figura 5.11 - Histórico da quantidade de horas paradas das UGH 1 a 5 no referido período de 2008

Esta Figura 5.11 mostra as informações do histórico das unidades geradoras no referido período de 2008, percebe-se que nos anos de março a agosto não houve incidências de paradas, por causa do nível da montante estar acima do nível desejado e os vertedouros foram obrigados abrirem as comportas para não haver rompimento da barragem e todas as máquinas tiveram que trabalhar para suportar o nível desejado da montante.

5.3.2 - Ensaio com PDA-IV

Foram coletados os resultados obtidos dos ensaios de magnitudes de descargas parciais com o PDA-IV. Nesse instrumento, a variável conhecida é chamada de Q_m , que é o número de máxima amplitude, e a unidade é dada em milivolts (mV).

5.3.2.1 - Resultados da UGH-01 a UGH-5 com PDA-IV

Tabela 5.6 – Magnitudes medidas de descargas parciais do PDA-IV - Q_m dada em mV

UGH'S	FASES	março/junho/2010	
		Pulsos + (mV)	Pulsos - (mV)
BAUGH-01	FASE A	40	74
	FASE B	43	82
	FASE V	41	78
BAUGH-02	FASE A	106	97
	FASE B	96	98
	FASE V	97	74
BAUGH-03	FASE A	113	98
	FASE B	82	87
	FASE V	136	123
BAUGH-04	FASE A	93	93
	FASE B	97	140
	FASE V	96	99
BAUGH-05	FASE A	76	92
	FASE B	59	86
	FASE V	53	84

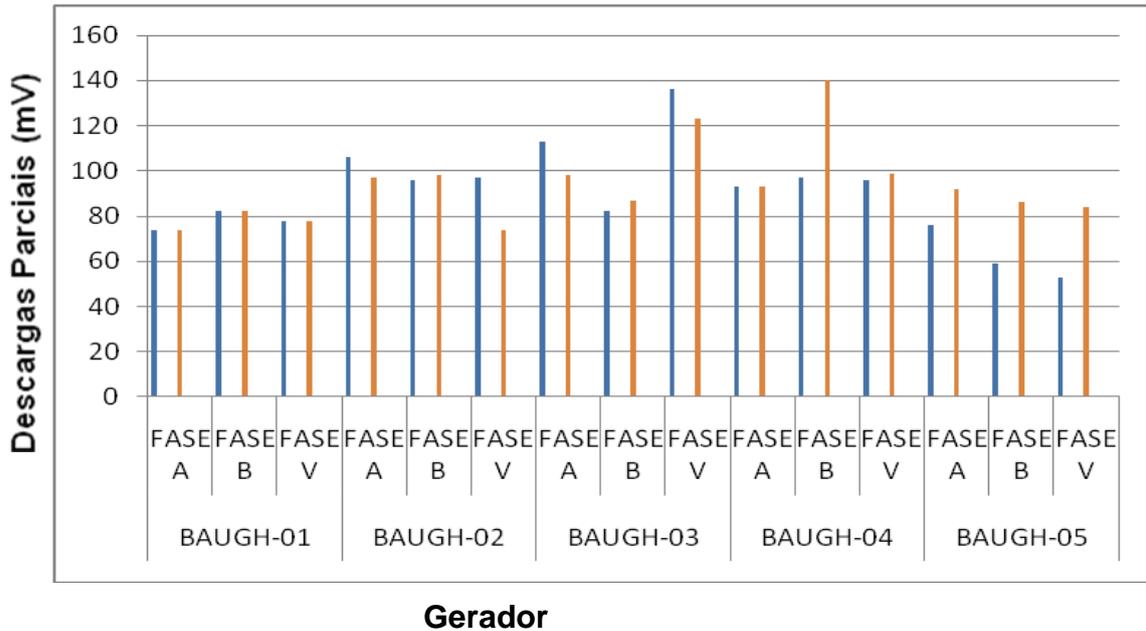


Figura 5.12 – Medidas das magnitudes de descargas parciais.

Na Figura 5.12 foi mostrado o resultado extraído da tabela 5.5 de medidas das maiores magnitudes dos dois acopladores C1 e C2 em cada fase, de cada máquina nos meses de março e junho de 2010. Percebe-se que a máquina 3 teve resultados semelhantes às das máquinas de números pares.

5.3.2.2 - Histórico das unidades geradoras 1 a 5

Neste tópico, serão mostrados dados de quantidade de partidas e paradas, e entre outras informações que são extraídos no relatório dos indicadores TEIF (Taxa Equivalente de Indisponibilidade Forçada Apurada) e TEIP (Taxa Equivalente de Indisponibilidade Programada) do ano de 2010 de janeiro a setembro, coletados pelos operadores da usina hidrelétrica de Balbina a fim de registrar um histórico do indicador de desempenho das unidades geradoras e fazer uma comparação com os resultados obtidos pelo PDA-IV.

Nas tabelas que serão apresentadas a seguir, se refere ao período de janeiro a setembro de 2010:

Tabela 5.7 – Quantidade distribuída do número de partidas e paradas

Meses	BAUGH-01		BAUGH-02		BAUGH-03		BAUGH- 04		BAUGH-05	
	NPt	NPd	NPt	NPd	NPt	NPd	NPt	NPd	NPt	NPd
Jan/10	1	1	34	33	29	29	39	39	0	0
fev/10	2	2	30	31	36	37	27	27	0	0
mar/10	0	0	34	34	36	37	29	29	2	2
abr/10	0	0	24	25	35	36	23	25	0	0
mai/10	1	1	26	25	41	40	23	23	0	0
jun/10	2	2	26	27	34	36	25	25	0	0
jul/10	2	2	21	21	24	25	30	31	4	4
ago/10	1	1	37	36	30	31	37	39	0	0
set/10	2	2	36	36	23	24	37	39	1	1

A Tabela 5.7 mostra a distribuição da quantidade do número de partidas caracterizada por NPt e da quantidades de paradas caracterizada por NPd. Percebe-se que as unidades geradoras com maiores incidências de partidas e paradas são BAUGH-02, BAUGH-03 e BAUGH-04.

Tabela 5.8 – Quantidade de horas em operação de cada unidade geradora hidráulica

Meses	BAUGH01	BAUGH02	BAUGH03	BAUGH04	BAUGH05
jan/10	739,1 h	305,38 h	473,05 h	287,8 h	744 h
fev/10	666,48 h	209,89 h	392,31 h	179,99 h	672 h
mar/10	744 h	249,46 h	368,39 h	136,66 h	716,08 h
abr/10	720 h	161,04 h	314,93 h	121,3 h	720 h
mai/10	741 h	123,72 h	277,75 h	142,53 h	744 h
jun/10	637,2 h	118,92 h	425,3 h	113,4 h	720 h
jul/10	738,73 h	86,08 h	473,62 h	203,7 h	521,53 h
ago/10	741,45 h	327,05 h	431,1 h	320,8 h	744 h
set/10	614,1 h	380,67 h	594,17 h	401,92 h	714,35 h

A Tabela 5.8 mostra a quantidade de horas em que cada unidade geradora hidráulica ficou em operação de cada mês no período de janeiro a setembro de 2010. Quanto mais horas em que ficou em operação, conseqüentemente menos horas a máquina ficou com reserva desligada, ou seja, em que ela ficou parada. Obviamente, pelo fato das unidades geradoras hidráulicas 2 e 4 não alimentarem os equipamentos de serviços auxiliares como motobombas e outros equipamentos elétricos, apresentaram menos horas de operação para produção de energia.

5.4 - DISCUSSÕES DOS RESULTADOS

Segundo resultados encontrados no período de 2005 a 2008, referentes ao histórico de horas paradas das unidades geradoras 1 a 5 e dos resultados das magnitudes dos ensaios de descargas parciais, NQN, verificou-se uma tendência já esperada. Os resultados das unidades geradoras 2 e 4 dos ensaios de descargas parciais tiveram resultados das magnitudes maiores em relação as outras unidades geradoras hidráulicas, devido apresentarem uma quantidade maior de horas com reserva de energia desligada.

Verificou-se como as unidades geradoras ímpares 1, 3 e 5, essenciais a alimentação dos serviços auxiliares, como motobombas e outros equipamentos elétricos, e que para poderem pararem essas unidades, é preciso haver alternância entre elas, como as unidades geradoras ímpares 1 e 3 geralmente foram escolhidas, na maioria das vezes, e a unidade geradora número 5 trabalhou em regime contínuo e somente parou em caráter emergencial, como para limpeza de radiadores, limpeza de anel coletor e outros, constatou-se semelhanças nos resultados das magnitudes nos ensaios de descargas parciais das máquinas 1 e 3 (ver Figura 5.3 e 5.5), sendo que os resultados da máquina 3 apresentou resultados um pouco mais acentuados em relação a unidade 1 e equivalentes a unidade geradora 4.

Como a unidade geradora número 5 apresentou uma incidência baixa em horas de máquina parada, constatou-se uma tendência defendida nesta dissertação, que para baixos valores de descargas parciais no estator, está relacionada ao maior regime de operação, devido menor número de quantidade de partidas e paradas e conseqüentemente baixa quantidade de horas de máquina parada. Uma observação a ser realizada, que no período de 2008, precisamente as medidas realizadas em

agosto (ver Figura 5.11), os resultados de todas as máquinas dos ensaios de descargas parciais constatou-se uma estabilização nas magnitudes das medidas dos pulsos dessas descargas, devido todas as máquinas trabalharem praticamente em regime contínuo, por causa da necessidade de equilibrar o nível da montante que estava muito acima na época da cheia.

Como já esperado, o estudo feito anteriormente no período de 2005 a 2008, as unidades geradoras hidráulicas que mais apresentaram número de partidas e paradas e menos horas de operação (ver Tabela 5.7 e 5.8), a unidade 2,3,4, obtiveram resultados mais acentuados em relação as medidas de descargas parciais.

Como foi descrito no capítulo III (item 3.2.5.9), nos ciclos de partidas e paradas, os materiais que compõe as barras do estator possuem diferentes coeficientes lineares de expansão térmica, isto é, quando o cobre expande linearmente, mas a isolação a ele colada, devido ao seu baixo coeficiente e temperatura a que está sujeita não se expande do mesmo modo, por isso, em máquinas do tipo geradores síncronos e turbogeradores principalmente, quando sofrem essas repetitivas paradas, há uma tendência de enfraquecimento da cola entre a isolação e o cobre, assim, conseqüentemente criando maiores magnitudes de descargas parciais.

Portanto, essas comparações com medidas desses dois instrumentos (PDA-H e PDA-IV) confirmam a teoria de tendência estudada nesta dissertação, que grandes máquinas rotativas devem ser programadas para operarem em regime contínuo, e somente pararem para uma manutenção de preferência programada, a fim de evitar que a máquina tenha um desgaste na sua parte elétrica e evitando manutenções desnecessárias e aumentando sua vida útil.

CAPÍTULO 6

CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1 - CONCLUSÕES

Esta dissertação conseguiu identificar na usina hidrelétrica de Balbina (mas que pode ser estendida a outras usinas hidrelétricas) uma tendência de comportamento das máquinas que já era esperado, segundo dados coletados, realizados ao longo dos anos de 2005 a 2010.

Sabe-se que um bom mantenedor tem o conhecimento de que uma máquina que tem um bom rendimento é porque não sofre muitos desligamentos forçados ou repetitivos desligamentos para manutenção corretiva, mas, no entanto, existem máquinas ora ou outra, apresentam defeitos que precisam ser corrigidos. Como no caso, esse fato se pode constatar nas unidades geradoras de números pares (unidade geradora síncrona número 2 e 4) e unidade geradora número 3, que apresentaram uma alta incidência de partidas e paradas. Máquinas que tem esse comportamento prevêem-se que sofrerão manutenções futuras para inspeções gerais, tanto mecanicamente ou eletricamente.

Problemas que ocorrem nas máquinas que acarretam em desligamentos forçados, não afetam somente a parte estatórica, mas também em outras partes do gerador, como por exemplo, em partes mecânicas, e nos equipamentos auxiliares (motobombas), entre outros.

Mas diante de todas as essas diversas circunstâncias, é possível fazer diagnósticos através de instrumentos sofisticados para evitar futuras anomalias, a fim de não acarretar paradas não previstas e conseqüentemente não resultar em desligamentos forçados.

As descargas parciais como foram muito discutidas nos capítulos anteriores, é possível ser realizado o diagnóstico através de instrumentos sofisticados a fim de evitar grandes transtornos nos geradores síncronos. O estudo realizado nesta dissertação teve o propósito de discutir esse sintoma da máquina, que é ocasionado por muitos fatores, principalmente, o ciclo de carga e que pode ser comprovado nesta pesquisa, através dos resultados das medições de descargas parciais no

estator dos geradores síncronos. Deve ser feito por parte da operação e manutenção, um bom planejamento para evitar constantes partidas e paradas dos geradores.

Enfim, o que se pode comprovar neste trabalho, que os resultados como os verificados nas unidades geradoras número 1 e 5, que apresentaram melhores desempenhos e conseqüentemente se prevê uma vida útil maior, devem ser repetidos para as outras máquinas. Então, se pode concluir, que o ideal, é que geradores síncronos não devem apresentar contínuas partidas e paradas para que não afete a isolação dos seus enrolamentos estatóricos e assim não comprometam sua vida útil.

6.2 - SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Algumas sugestões para trabalhos futuros podem ser listados a fim de se dar continuidade a este estudo:

Percebeu-se que após registrar um banco de dados através das medições de descargas parciais referente ao estator dos geradores síncronos, foi constatado alguma progressão devido a causas já comentadas no capítulo 3, então, seria interessante desenvolver um trabalho a fim de realizar uma previsão para detectar as possíveis falhas criando um sistema especialista inteligente através de uma linguagem artificial do tipo lógica fuzzy ou um sistema híbrido *neuro-fuzzy*, e assim adquirindo um sistema de diagnóstico confiável.

Neste trabalho não foi realizado experimentos para verificação da fixação do sistema de cunhagem, para complemento seria interessante fazer experimentos em geradores síncronos para verificação da influência do ciclo de partidas e paradas nos diferentes variações de carga e temperatura, como por exemplo, o gerador síncrono trabalhando sem carga e temperatura quente, com carga e temperatura quente, e assim através de medições de descargas parciais, verificar o sistema de cunhagem nos diferentes estágios e ter uma conclusão a respeito.

Outra proposta de estudo seria o uso das informações das descargas parciais, devidamente parametrizadas para servir como coordenadas no despacho das máquinas no sentido de manter o equilíbrio entre a carga e a geração.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMAYA, E. J. (2008). *Aplicação de Técnicas de Inteligência Artificial no Desenvolvimento de um Sistema de Manutenção Baseada em Condição*. Dissertação de Mestrado em Sistemas Mecatrônicos, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, DF.

ARCE E. , A. S. (1999). *Um modelo de otimização de despacho de máquinas em usinas hidrelétricas*. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Brasil.

BARTNIKAS, R.; McMAHON, E. J. *Engineering Dielectrics: Corona Measurement and Interpretation*, ASTM STP669, v. 1, chapters 1-2, Philadelphia, 1979.

BENGTSSON, M. (2004a), *Condition based maintenance system technology - where is development heading?* Proceedings from the 17th Conference of Euromaintenance, Barcelona, Spain, Puntex – Publicaciones.

BILL MOORE, P.E., *Stator Winding Failure Due to Spark Erosion*. Presented at the 5th EPRI Turbine Generator Technology Transfer Workshop, August, Concord, NC, 2008.

BOGGS, S. A. Partial Discharge – Part III: Cavity-Induced PD in Solid Dielectrics. IEEE EIM, v. 6, n. 6, p. 11-20, Nov./Dec. 1990.

DUARTE, JOÃO LUIZ BOTELHO (2007). *Utilização de Técnicas Inteligentes nas Metodologias de Manutenção de Geradores Síncronos*, Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.

EDIN, H. *Partial Discharges Studied with Variable Frequency of the Applied Voltage*. Stockholm-Sweden, 2001. PhD Thesis in Electrical Engineering, Kungl Tekniska Hogskolan.

EPE. (2008). Empresa de Pesquisa Energética,(2008). NOTA TÉCNICA DEN 03/08: *Considerações sobre Repotenciação e Modernização e Usinas Hidrelétricas*, Rio De Janeiro, Brasil.

FITZGERALD, A., KINGSLEY JR, C., UMANS, S., *BElectric Machinery*, 6th ed., McGraw-Hill, New York (2003).

FREITAS, F. L., FERREIRA, M. P., RIBEIRO, I. M. Monitoração permanente de geradores: abordagem para o diagnóstico preditivo. Seminário do estado da arte em sistemas de monitoramento aplicados a máquinas rotativas, Brasília, Brasil, Novembro de 2008.

G.C.STONE et al. *Problems with Modern Air-Cooled Generation Station Winding Insulation*. IEEE Electrical Insulation Magazine. Dezembro 2000.

G.C. STONE, E.A. BOULTER, I. CULBERT, AND H. DHIRANI, "*Electrical Insulation for Rotating Machines*", Wiley Interscience/IEEE Press, 2004.

G.C. STONE, (2006) .Analysis of stator winding partial discharge activity And the correlation with insulation condition.Canada.

G.C. STONE, M. SASIC, D. DUNN, I. CULBERT, "*Recent Problems Experienced with Motor and Generator Windings*", IEEE Paper PCIC-2009-6, 2009.

G.C. STONE, V. WARREN, “*Deterioration of Stator Winding Insulation by Vibration Sparking*”, Iris Rotating Machine Conference, May 2010.

HALLIDAY, D., RESNICK, R., *Física III*, 4° Ed., Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., Rio de Janeiro, Brasil, 1994.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. IEEE Std 1129-1992 Recommended Practice for Monitoring and Instrumentation of Turbine Generators. Junho de 1998.

IRIS POWER LP, “Iris Seminar – Levels 1 and 2 – Student Handbook”, version 1.0, January, 2007.

KREUGER, F. H. *Partial Discharge Detection in High-Voltage Equipment*. 1.ed. London: Butterworths, 1989.

MASON, H. M. *Enhancing the Significance of PD Measurements*. IEEE TDEI, v. 2, n. 5, p.876-888, Oct. 1995.

MORSHUIS, P. H. F. *Partial Discharge Mechanisms*. Netherlands, 1993. PhD Thesis in Electrical Engineering. Delft University.

MORSHUIS, P. H. F. *Assessment of Dielectric Degradation by Ultrawide-band PD Detection*. IEEE TDEI, v. 2, n. 5, p. 744-760, Oct. 1995.

NILSSON, O. & SJELVGREN, D. *Variable splitting applied to modeling of start-up costs in short term hydro generation scheduling*, IEEE Transactions on Power Systems, vol. 12, no. 2, pp.38-43, May 1997(b).

POLUX Tecnologia em Equipamentos S.A., 2010. Apostila do Curso Monitoramento em Descargas Parciais V. 3.0.

PROVENÇANO, F. (2003). *Despacho Econômico em Usinas Hidrelétricas*. Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Brasil.

SALMAZO, C. T., Modelo de Otimização Eletro-Energético de Curto Prazo (Pré-Despacho) Aplicado ao Sistema Copel. Dissertação de Mestrado. UNICAMP. 1997.

SANTOS, E. F. (2001). *Um Modelo de Pré-Despacho em Usinas Hidrelétricas usando Algoritmos Genéticos*. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação. Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Brasil.

SANTOS, R. S. (2010). *Metodologia de diagnóstico de manutenção baseada em condição de enrolamentos estáticos em Hidrogeradores*. Artigo publicado no 1º Congresso de Engenharia de Produção do Sul, CONEPRO, Joinville, Brasil.

SILVA, G. C. (2005). *Descargas Parciais Estimuladas Por Raios-X Contínuo E Pulsado Em Materiais Dielétricos: Similaridades E Diferenças*. Tese de doutorado, Programa de Pós-graduação em Engenharia, Universidade Federal do Paraná.

SILVA, J. J, Gennari, M. C., “*Diagnóstico Elétrico de Máquinas Elétricas Rotativas*”, In: *II ENAM – Encontro Nacional de Máquinas Rotativas*, Foz do Iguaçu, Brasil, Nov 2004.

SOUZA R. Q. (2008). *Metodologia e desenvolvimento de manutenção preditiva visando à melhoria da confiabilidade de ativos de usinas hidrelétricas*. Dissertação de mestrado em sistemas mecatrônicos, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, DF.

TWERDOCHLIB, M. et al. *Two recent developments in monitors for large turbine generators*. IEEE Transaction on Energy Conversion. Volume 3, 3a edição, Setembro de 1988. Páginas: 653 – 659.

VIEIRA, D. P. Modelo Econômico de Programação diária da Geração considerando os Custos de parada e partida e operação como compensador síncrono. Dissertação de Mestrado. Universidade Tecnológica Federal Do Paraná, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, Curitiba, Brasil..2007.

WILLIAM G. MOORE, P.E. *Conditioning pulp and paper mill generators for reliable service*. Pulp and Paper Industry Conference in Jacksonville Florida. 2005.

ZHU, H., and GERDOLD, WESTERMAN. *Timing for Generator Rewinds: Bridging the Gap between Statistical Methods and Condition-Based Monitoring*. Canada. 2003.

ZHU H., et. Al. *Quality Evaluation of Generator and Motor Stator Windings*. 2004.