

**Universidade de Brasília - UnB
Faculdade de Tecnologia - FT
Engenharia Elétrica**

**MEDIÇÃO DE DESCARGAS PARCIAIS EM
HIDROGERADORES**

Eduardo Cruz de Mello Franco

Brasília, Junho de 2018

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

MEDIÇÃO DE DESCARGAS PARCIAIS EM HIDROGERADORES

Trabalho de conclusão de curso de graduação em Engenharia Elétrica submetido ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Engenheiro Eletricista.
Orientador: Prof. Dr. Alcides Leandro da Silva

Brasília, Junho 2018

FICHA CATALOGRÁFICA

Mello Franco, Eduardo Cruz de.

Medição de descargas parciais em hidrogeradores [Distrito Federal]

2018.

XI 79p., 210X295 mm. (ENE/FT/UnB, Engenheiro eletricista, Engenharia Elétrica, 2018).

Trabalho de conclusão de curso – Universidade de Brasília

Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Elétrica. Brasília, 2018.

Orientação: Dr. Prof. Alcides Leandro da Silva.

1. Hidrogerador
3. Descargas Parciais

2. Isolação
4. Medição

I. ENE/FT/UnB

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

Mello Franco, Eduardo Cruz de.

Medição de descargas parciais em hidrogeradores [Distrito Federal] 2018.

Trabalho de conclusão de curso, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, p. 67.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Eduardo Cruz de Mello Franco.

TÍTULO DA MONOGRAFIA: Medição de descargas parciais em hidrogeradores.

GRAU/ANO: Engenheiro Eletricista/2018.

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias deste trabalho de conclusão de curso e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte deste Trabalho de conclusão de curso pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

Eduardo Cruz de Mello Franco

CLN 406 Bloco C apartamento 210, Asa Norte - Brasília, DF – Brasil

70847-530 Asa Norte - Brasília, DF - Brasil

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

MEDIÇÃO DE DESCARGAS PARCIAIS EM HIDROGERADORES

Eduardo Cruz de Mello Franco

Banca examinadora

Prof. Dr. Alcides Leandro da Silva, UnB/ENE

Orientador

Prof. Dr. Gerson Henrique Pfitscher, UnB/ENE

Examinador interno

**Prof. Dr. Francis Arody Moreno Vásquez,
UnB/ENE**

Examinador interno

Brasília, Junho 2018

DEDICATÓRIA

“Dedico este trabalho ao meu pai por ter me ensinado o caminho do conhecimento e a minha mãe por me ensinar a ter garra na vida.”

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais por me prover a motivação e perseverança de nunca desistir dos meus objetivos.

Ao meu orientador Alcides, pelos conselhos, pelo suporte prestado, pela paciência e principalmente por sempre acreditar no meu potencial.

À faculdade de tecnologia e aos professores da Universidade de Brasília, que contribuíram para minha formação acadêmica.

Ao teabag's group por compartilhar as mesmas dificuldades durante o curso e pelos momentos de descontração, união e alegria, os quais foram muito importantes para mim durante a graduação.

À minha namorada Gabriela por ser a minha companheira em todos os momentos, ensinando-me a amar e ser amado, e pela reciprocidade dos nossos sentimentos.

Aos técnicos da Eletronorte Eulálio e Bruno por me apresentar o trabalho concluído nesta monografia.

RESUMO

O atual sistema elétrico nacional de potência utiliza como principal matriz energética a energia potencial dos rios, gerada pelas centrais hidrelétricas. Dada a sua importância neste cenário, as unidades geradoras não devem sofrer paradas não programadas, pois acarretam multas pela ANEEL, além de afetar os índices de desempenhos operativos. Embora utilizando-se de rígidos critérios técnicos, constata-se que cerca de 50% das necessidades de paralisação da máquina para fazer intervenção, teve como sintoma o surgimento de descargas parciais. Para corrigir esses problemas, as hidrelétricas têm investido em manutenção preditiva com o objetivo de monitorar o funcionamento e a saúde da máquina geradora, angariando maior confiabilidade e aumento no tempo de vida útil. As descargas parciais são centelhamentos em pequenas cavidades na isolação elétrica, que acarretam degradação do material isolante e conseqüentemente menor vida útil. A partir da análise do comportamento destas descargas parciais, pode-se determinar o local dessas falhas gerando um diagnóstico preciso sobre quando fazer uma intervenção na máquina e onde fazer.

Este trabalho constata a aplicabilidade dos estudos sobre descargas parciais e sua introdução e discussão nos cursos de engenharia elétrica.

Palavras-chaves: Descargas Parciais, Hidrogeradores, Manutenção preditiva.

ABSTRACT

The current national power system uses as its main energy matrix the potential energy of the rivers, generated by hydroelectric plants. Given their importance in this scenario, generating units should not suffer unscheduled outages, as they result in fines by ANEEL, in addition to affecting operating performance indices. Although using strict technical criteria, it is observed that about 50% of the machine's need to stop the intervention was symptomatic of partial discharges. To correct these problems, the hydroelectric plants have invested in predictive maintenance in order to monitor the operation and health of the generating machine, increasing reliability and increase in the life time. The partial discharges are sparks in small cavities in the electrical insulation, which cause degradation of the insulating material and consequently lower life. From the analysis of the behavior of these partial discharges, one can determine the location of these faults by generating an accurate diagnosis about when to make an intervention in the machine and where to do it.

This work shows the applicability of the studies on partial discharges and their introduction and discussion in the electrical engineering courses.

Keywords: Partial Discharges, Hydrogenerators, Predictive Maintenance.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
1.1 MOTIVAÇÃO.....	1
1.2 OBJETIVO	3
1.3 ESTRUTURAÇÃO DO TRABALHO	5
2 DESCARGAS PARCIAIS	6
2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	6
2.2 NATUREZA DAS DESCARGAS PARCIAIS	7
2.3 IMPORTÂNCIA DO MONITORAMENTO DE DP _s	9
2.4 FALHAS DIELÉTRICAS CAUSADAS	12
3 TIPOS DE DESCARGAS PARCIAIS E FALHAS CAUSADAS POR ELAS	14
3.1 TIPOS DE DESCARGAS PARCIAIS DE ACORDO COM A NORMA 60034-27-2 IEC 2012.....	14
3.2 PROBLEMAS NOS ENROLAMENTOS DO ESTATOR	18
3.3 EXEMPLOS DE AVARIAS	21
4 ESTRUTURA DE HIDROGERADORES E SISTEMAS DE MEDIÇÃO	25
4.1 ESTRUTURA DAS UNIDADES GERADORAS	25
4.2 ACOPLAMENTO CAPACITIVO E MICROFITA SSC	27
4.3 CONEXÃO DO ACOPLAMENTO CAPACITIVO	29
5 MEDIÇÃO DAS DESCARGAS PARCIAIS E OS INSTRUMENTOS UTILIZADOS	31
5.1 IMA-DP.....	31
5.2 CARACTERÍSTICAS DAS MEDIÇÕES DE DESCARGAS PARCIAIS.....	37
5.3 PADRÕES E COMPORTAMENTOS DE ACORDO COM A NORMA	39
6 A IMPORTÂNCIA DA MANUTENÇÃO PREDITIVA NO SETOR ELÉTRICO	41
6.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	41
6.2 TIPOS DE MANUTENÇÃO	42
6.3 DEFEITO, FALHA E PANE.....	44
7 ESTUDO DE CAMPO E RESULTADOS OBTIDOS	49
7.1 USINA HIDRELÉTRICA DE SAMUEL	49
7.2 TESTES REALIZADOS E EQUIPAMENTOS UTILIZADOS	52
8 CONCLUSÃO	61
8.1 PERSPECTIVAS.....	62
9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	63

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1.1 – Causas raízes de falhas no sistema em hidrogeradores.....	2
FIGURA 1.2 – Causas raízes de falhas no sistema de isolamento elétrica	3
FIGURA 2.1 – Modelo elétrico de uma descarga parcial em um isolante sólido	6
FIGURA 2.2 – Modelo elétrico equivalente de uma descarga entre dois eletrodos	7
FIGURA 2.3 – Modelo elétrico de um tipo de descarga parcial.....	8
FIGURA 2.4 – Circuito equivalente da capacitância das descargas parciais	12
FIGURA 2.5 – Tensões e correntes no circuito equivalente das descargas parciais	13
FIGURA 3.1 – Tipos de falhas nos enrolamentos do estator	18
FIGURA 3.2 – Seção transversal de uma barra de máquina	19
FIGURA 3.3 – Fontes de descargas parciais no isolamento do estator.....	20
FIGURA 3.4 (a) – Danos causados pela presença do parafuso.....	21
FIGURA 3.4 (b) – Parafuso alocado.....	21
FIGURA 3.5 – Bobinas (Ranhuras 173, 174, 175, 177 e 187) as quais tiveram a tinta anti-corona removida.....	22
FIGURA 4.1(a) – Estator completo: enrolamentos fixados no núcleo.....	25
FIGURA 4.1(b) – Rotor completo.....	25
FIGURA 4.1(c) – Máquina completa: Estator + Rotor	25
FIGURA 4.2 – Exemplo de um estator bobinado	26
FIGURA 4.3 – Acoplador capacitivo de 80pF.....	27
FIGURA 4.4 – Acoplador no slot do estator.....	28
FIGURA 4.5 – Instalação do acoplador na UHCN, no barramento de saída do gerador....	29
FIGURA 4.6 – Capacitores em paralelo com o barramento de saída do gerador.....	30
FIGURA 5.1 – Software utilizado para aquisição das descargas parciais (IMA-DP).	31
FIGURA 5.2 – Circuito equivalente da conexão do acoplador capacitivo	32
FIGURA 5.3 – Relação das medições com o banco de dados adquiridos pelo software ...	33
FIGURA 5.4 – Resposta em frequência de um pulso de DP na fonte e nos terminais da máquina para diferentes sistemas de medição	34
FIGURA 5.5 – Relatório tecnico da Eletronorte 2018.....	35
FIGURA 5.6 (a) – Padrão de reconhecimento de descargas parciais adotado pela Eletronorte.....	39
FIGURA 5.6 (b) – Padrão de reconhecimento de descargas parciais adotado internacionalmente.....	39
FIGURA 5.7 – Padrão disponibilizado pela IEC.....	40

FIGURA 6.1 – Classificações das manutenções	42
FIGURA 6.2 – Definição do estado do equipamento devido a gravidade da anomalia	46
FIGURA 6.3 – Elaboração de uma plano de manutenção.....	47
FIGURA 7.1 – Vista da usina hidrelétrica de Samuel.....	49
FIGURA 7.2 – Potencial total instalado na UHE de Samuel.....	50
FIGURA 7.3 – Monitoramento de descargas parciais	51
FIGURA 7.4 – Cabo coaxial instalado na caixa terminal	52
FIGURA 7.5 – Caixa terminal para medição de descargas parciais	53
FIGURA 7.6 – Osciloscópio da National Instruments.....	54
FIGURA 7.7 – Medição de descargas parciais da UGH 5 fase B.....	55
FIGURA 7.8 – Medição de descargas parciais da UGH 5 fase C	56
FIGURA 7.9 – Mapa estatístico de acordo com cada tipo de descarga.....	57
FIGURA 7.10 – Medição de descargas parciais da UGH 5 fase A.....	58
FIGURA 7.11 – Computador industrial PXI da National Instruments.	59
FIGURA 7.12 – Painel de controle da usina hidrelétrica de Samuel	60

1 - INTRODUÇÃO

Esse Trabalho de Conclusão de Curso versa sobre descargas parciais em máquinas geradoras de hidrelétricas. Utilizado para avaliar a saúde da isolação elétrica das barras dos estatores de hidrogeradores. A partir de diversas instrumentações, consegue-se fazer uma avaliação do comportamento dessas descargas dando um resultado mais preciso para um diagnóstico operativo.

1.1 MOTIVAÇÃO

As Descargas Parciais (DPs) são fenômenos ocasionados pelo rompimento da rigidez dielétrica do material isolante e são originadas pelo processo de ionização do meio gasoso submetido a um elevado campo elétrico. Elas são tidas como fontes de defeitos nos isolamentos elétricos e indica a possibilidade de ocorrer uma futura falha no isolamento, pois, inicialmente, o fenômeno ocorre no isolamento elétrico de forma parcial e com o tempo existe a tendência de se tornar total, o que causaria um curto-circuito entre as partes energizadas e o núcleo aterrado, danificando o equipamento elétrico. Portanto, os níveis de ocorrência de DP devem ser avaliados ao longo de toda a vida útil do equipamento.

As instalações das usinas hidroelétricas sofrem o desgaste da isolação elétrica devido ao envelhecimento, o qual ocasiona a maior parcela das falhas, e esse problema contribui para acelerar o processo de erosão no isolamento devido ao alto estresse elétrico criado pelo campo magnético do hidrogerador. Levando em consideração que o setor de geração elétrica no país tem uma idade um pouco avançada, este tópico tem sido recorrentemente discutido e estudado por pesquisadores nos simpósios nacionais e internacionais.

De acordo com um estudo internacional feito pela CIGRE, foram examinados 69 incidentes de falhas em hidrogeradores e foi constatado que 56% das falhas foram resultantes de problemas na isolação elétrica, como mostra a figura 1.1.

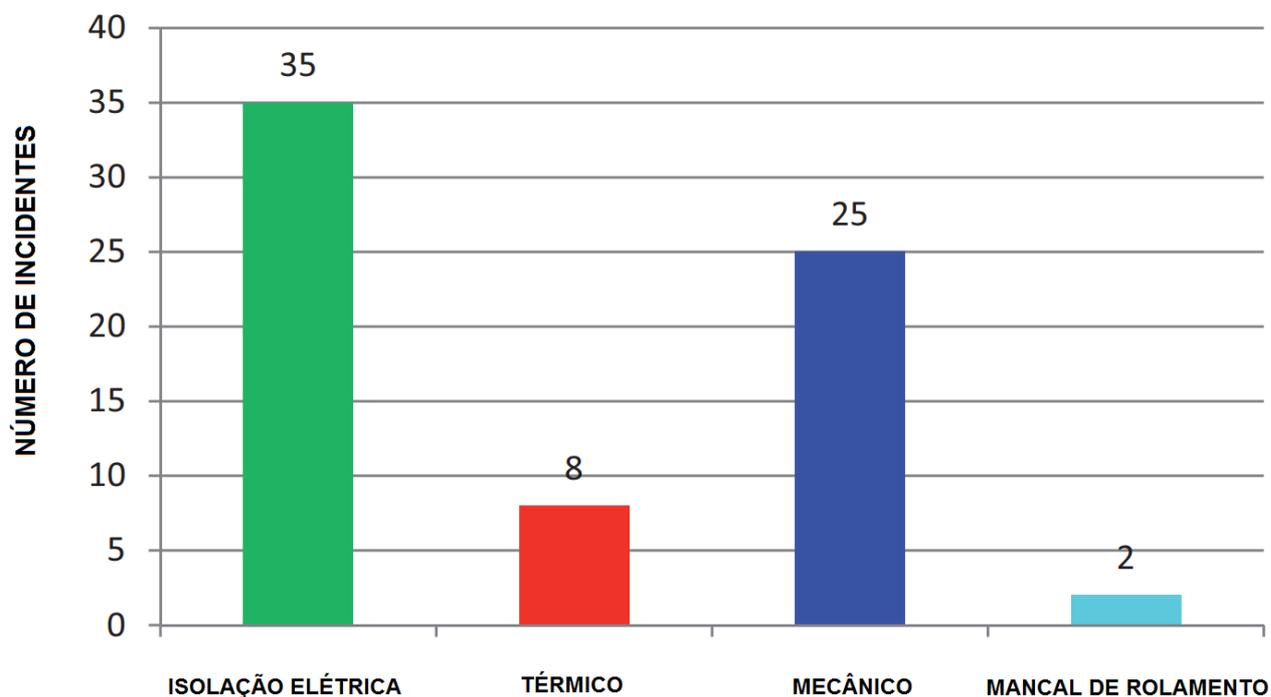


Figura 1.1 – Causas raízes de falhas em hidrogeradores.

Fonte: Adaptado de [1].

Foram investigadas essas falhas na isolação elétrica e constatou-se que 90% delas foram descobertas como sintoma variação nos índices de descargas parciais internas, como mostra a figura 1.2 na página a seguir. Ou seja, cerca de 50% do total das falhas em hidrogeradores tem como consequência o surgimento de descargas parciais. Este é um problema real que é pesquisado altamente, principalmente devido aos elevados preços dos geradores, e também pelas muitas geradas por paralisações não programadas e as perdas de manutenção e da compra de novos equipamentos.

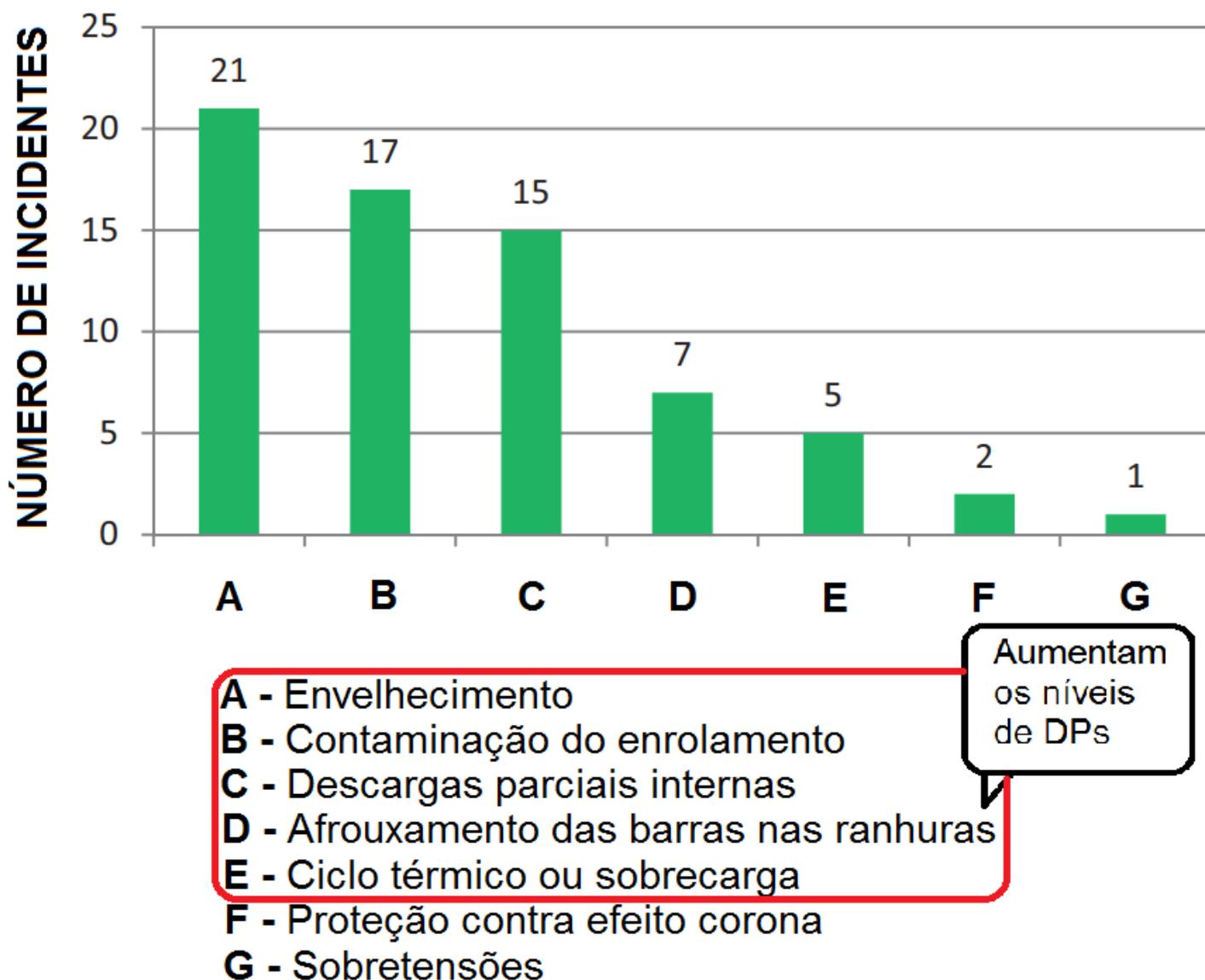


Figura 1.2 - Causas raízes de falhas no sistema de isolamento elétrica.

Fonte: Adaptado de [1].

1.2 OBJETIVO

Paradas de máquinas não planejadas acarretam em uma decaída nos índices de confiabilidade e possíveis falhas nos equipamentos futuramente. O surgimento de descargas parciais nos enrolamentos estatóricos de hidrogeradores, é um sintoma de fragilidade na suportabilidade dielétrica do equipamento. Por isso as hidrelétricas no Brasil têm investido cada vez mais em manutenção preditiva com o objetivo de solucionar essas intervenções não programadas.

Durante o funcionamento do hidrogerador de alta tensão, ele sofre vários tipos de estresses na máquina rotativa, o que causa uma perda de vida útil dos equipamentos caso não sejam controlados. Entre os tipos de estresses estão: estresses elétricos, estresses mecânicos, estresses térmicos e estresses ambientais.

Estes estresses acarretam em uma aceleração do processo de erosão na isolação elétrica da máquina, representando uma fragilidade na sua suportabilidade dielétrica devido ao grande campo elétrico presente em geradores de alta tensão.

Os relatórios técnicos padrões da ELETROBRAS utilizam normas técnicas e desenvolvidas pela IEC (Comissão Eletrotécnica Internacional) e pela IEEE (Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos). Estas normas são IEC STANDARD 60270:2000 (High-Voltage Test Techniques - Partial Discharge Measurements)[3] e IEEE 1434-2000 (Guide to the Measurement of Partial Discharges in Rotating Machinery)[4] para as práticas recomendadas para os testes na resistência da isolação elétrica em seus hidrogeradores. A qual define as normas de segurança, e os métodos de medição e como interpretar esses dados obtidos.

Entre os sistemas de monitoramento existentes, a medição de Descargas Parciais é a única capaz de dar algum indicativo sobre o isolamento elétrico das barras estatóricas e enrolamentos de motores de alta tensão sem a necessidade de intervir na máquina quando esta estiver em operação, ou seja, uma medição on-line. A favor da medição de Descargas Parciais está a sua característica de fornecer informações sobre estado de deterioração elétrica em condições muito iniciais propiciando o planejamento de intervenções bem antes de chegar a uma condição de falha operacional das máquinas. Pretende-se assim, de certa maneira, estimular o debate sobre o tema e descrever os mecanismos envolvidos na execução deste monitoramento.

O objetivo deste Trabalho de conclusão de curso é demonstrar como é feito esse tipo de manutenção preditivo nas hidrelétricas, pois é o melhor método para se determinar a condição da isolação elétrica do equipamento que está sendo utilizado atualmente.

1.3 ESTRUTURAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho é composto por 8 capítulos assim distribuídos.

O capítulo 1 traz dados introdutórios e o motivo para a pesquisa, apresentando conceitos iniciais

No capítulo 2, a conceituação da monografia é abordada apresentando uma visão geral sobre os fenômenos físicos que acontecem nos hidrogeradores. Falhas dielétricas consequentes também são avaliadas.

No capítulo 3, apresenta-se os tipos de descargas parciais de acordo com a norma IEC STANDARD 60270:2000 e as falhas por elas causadas.

No capítulo 4, trata-se da apresentação das estruturas das unidades geradoras e também discorre sobre os métodos e os equipamentos necessários para as medições das descargas parciais.

No capítulo 5, demonstra-se o sistema de monitoramento IMA-DP, as características das medições monitoradas por esse sistema e o comportamento das descargas parciais de acordo com a norma.

No capítulo 6, descreve sobre a manutenção de forma geral e os tipos que existem, indicando índices de periculosidade e como é feita manutenção corretiva em hidrogeradores.

No capítulo 7, apresenta-se um estudo de campo, no qual foi utilizado e verificado a aplicabilidade desse sistema de monitoramento.

No capítulo 8, por fim, há a conclusão do trabalho e as perspectivas por ele trazido.

2 - CONCEITO DE DESCARGAS PARCIAIS

2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

As descargas parciais são, em geral, uma consequência das concentrações locais de tensão elétrica no isolamento ou na superfície do condutor. Geralmente, tais descargas aparecem como pulsos com uma duração inferior a $1 \mu\text{s}$ (microsegundo). Esse fenômeno pode acontecer em pequenas cavidades na isolação elétrica. Quando submetido a um elevado campo elétrico, submete-se essa cavidade a um gradiente de tensão (dV/dt) superior ao que seria suportável pela mesma. Isso acarreta em uma progressiva deterioração do material isolante, e como consequência disso haverá uma alteração nas propriedades dielétricas do mesmo, assim como representado na figura 2.1.

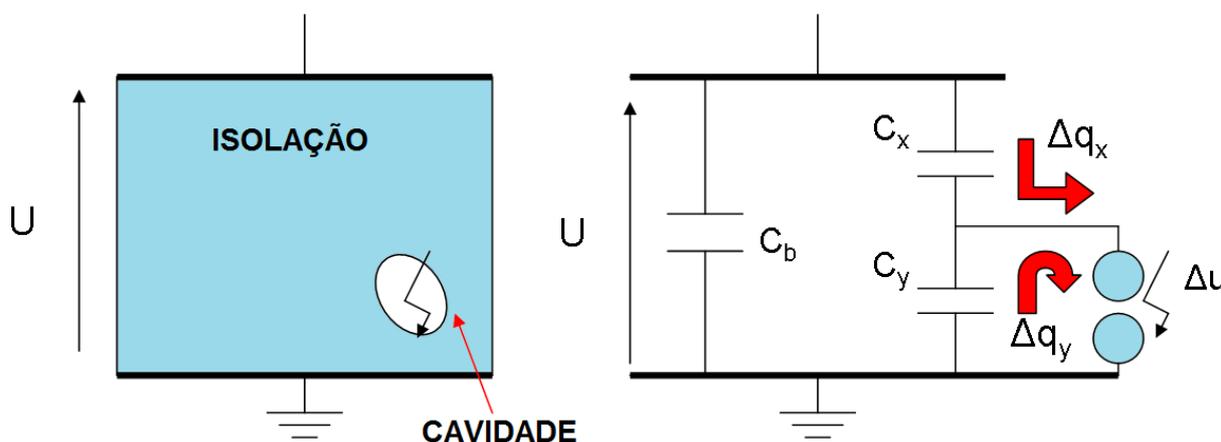


Figura 2.1 - Modelo elétrico de uma descarga parcial em um isolante sólido.

Fonte: Adaptado de [6].

2.2 NATUREZA DAS DESCARGAS PARCIAIS

Quando dois condutores apresentam uma grande diferença de potencial, há uma geração de um campo elétrico de atração entre esses 2 condutores. Esse campo elétrico exerce uma força na camada de valência dos átomos do material isolante, fazendo com que haja atração nos átomos das camadas de valência mais distantes.

Numa situação de um elevado campo elétrico essa força de atração dos condutores, haverá a polarização dos átomos do material isolante. Isto irá ocasionar na deformação neste material, facilitando um caminho para que haja uma ruptura dielétrica através deste caminho de baixa impedância.

Este caminho de baixa impedância se deve porque os átomos dos gases presentes na atmosfera, como: Oxigênio, Nitrogênio e entre outros gases presentes no ar. Esses gases através do processo de ionização dos átomos próximos aos condutores geram uma reação em cadeia de elétrons, possibilitando a condução de carga elétrica, esse fenômeno é chamado de avalanche de Townsend, como evidencia a figura 2.2.

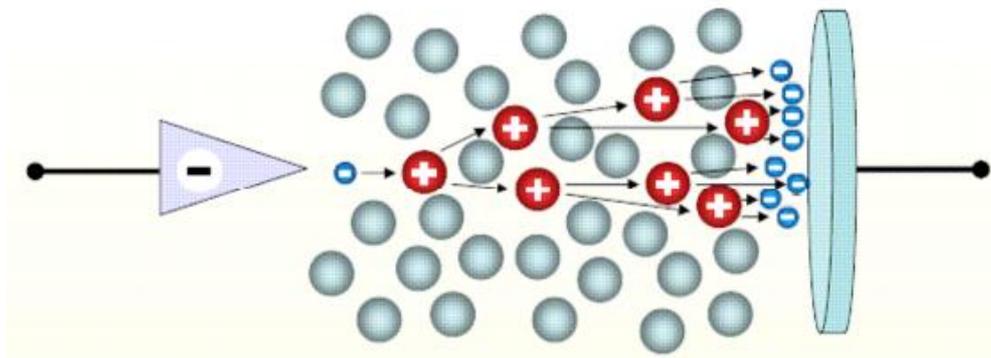


Figura 2.2 - Modelo elétrico equivalente de uma descarga entre dois eletrodos.

Fonte: Adaptado de [7].

A partir do processo de ionização do ar é possível que haja uma diferença de potencial suficiente para que haja a condução de corrente elétrica entre os eletrodos. Essa corrente elétrica pode ser muito grande, ocasionando uma perda de potência da fonte, fazendo com que surjam descargas parciais dentro do material dielétrico.

Como demonstração, observa-se a imagem da figura 2.3, onde pode-se analisar uma cavidade no interior do material dielétrico através da representação gráfica. E também o fenômeno de expansão da arborescência elétrica no interior do material.

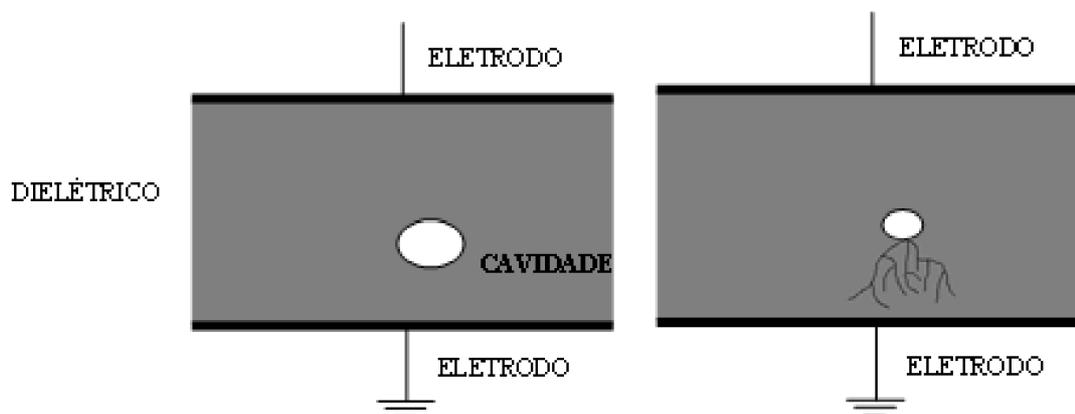


Figura 2.3 - Modelo elétrico de um tipo de descarga parcial.

Fonte: Adaptado de [8].

Quando ocorre o aparecimento deste centelhamento ele normalmente não atravessa completamente o material dielétrico entre os eletrodos, por isso esse processo é chamado de descarga parcial. Caso aconteça do centelhamento atravessar o material isolante, essa descarga é chamada de ruptura total.

Uma ruptura total pode ocasionar severos danos ao equipamento como uma falta fase-terra no estator, o que aconteceu na usina hidrelétrica de Governador Bento Munhoz(GBM), na cidade de Foz do Areia. A unidade geradora 1 desta usina saiu de operação em 19/12/2015. E em 19/01/2016 e 10/02/2016 ocorreram novas falta fase-terra no gerador. Após sofrer três defeitos simultâneos no estator, em 24/03/2016, a quantidade de polos e barras danificados impediu o reparo, sendo necessária a substituição de todo o enrolamento estatórico da unidade 1 da UHE GBM. Tal evento foi apresentado pela COPEL[9].

2.3 IMPORTÂNCIA DO MONITORAMENTO DE DPs

É muito importante para se analisar a saúde da isolação elétrica através do monitoramento das DPs, pois caso a descarga esteja localizada apenas em um determinado ponto ele vai originar um acelerado processo de erosão no material dielétrico, gerando falhas indesejadas na isolação elétrica da unidade geradora, fazendo com que diminua o tempo de vida útil não só do isolamento como também das barras estatóricas.

A medição das descargas parciais nos hidrogeradores tem uma série de importâncias, como:

- Permite acompanhar o estado operativo quanto ao isolamento estátorico dos enrolamentos dos geradores.
- Auxilia nas prioridades para a realização da manutenção programada nesses equipamentos.
- Faz um levantamento estatístico sobre as causas raízes das falhas nos hidrogeradores.

Entre os sistemas de monitoramento existentes, a medição de Descargas Parciais é a única capaz de dar algum indicativo sobre o isolamento elétrico das barras estatóricas e enrolamentos de motores de alta tensão sem a necessidade de intervir na máquina quando esta estiver em operação, ou seja, uma medição on-line.

A continuidade da exposição do material isolante pode vir a ocasionar uma erosão completa, surgindo uma fissura que com o tempo poderá levar o isolamento à falha total do equipamento, gerando a necessidade de paralisação do funcionamento para que haja intervenção na unidade geradora.

As consequências das descargas parciais são:

- Elevam o nível de estresse elétrico, térmico e mecânico do hidrogerador;
- Perda de vida útil do equipamento devido ao alto nível de degradação;
- Perda financeira devido à paralisação da unidade geradora, devido ao custo da manutenção a ser realizada e também pelos novos equipamentos que serão trocados;
- Oxidação da tinta anti-corona e possível deterioração das barras estatóricas;
- Erosão no material isolante.

A monitoração de descargas parciais permite acompanhar a condição do isolamento da máquina e em função da tendência no nível de descargas parciais é possível prever se o isolamento da máquina está próximo a falhar. Por meio dessa predição é possível realizar uma manutenção programada antes que a máquina falhe e evitar, assim, prejuízos maiores devido a uma eventual falha inesperada.

Com o surgimento das descargas parciais ela acarreta no surgimento de várias grandezas físicas, como: pulsos eletromagnéticos conduzidos e radiados, luminosidade, ruído acústico, acréscimo de temperatura e reações químicas localizadas.

Durante o funcionamento do gerador de alta tensão, ele sofre vários tipos de estresse na máquina rotativa, o que causam uma perda de vida útil dos equipamentos, caso não sejam controlados.

Entre os tipos de estresses estão:

- Estresses elétricos
 - Devido ao grande campo elétrico presente em geradores de alta tensão.
 - Isso acarreta em uma aceleração do processo de erosão na isolação elétrica da máquina, representando uma fragilidade na sua suportabilidade dielétrica.
- Estresses mecânicos
 - Excesso de vibração dentro da unidade geradora.
- Estresses térmicos
 - Sobreaquecimento do equipamento utilizado.
- Estresses ambientais
 - Alta umidade e possibilidade de contaminação.

Pelo fato de cada descarga ser acompanhada pelas emissões acústicas e de rádio frequência, assim como emissão de luz, segue-se que cada evento de DP absorve certa quantidade de energia. A energia dissipada no pulso de DP deve, então, ser suprida por alguma fonte de potência. Isto pode ser considerado como um aumento na perda dielétrica no enrolamento do estator. Portanto, um meio indireto de medição da atividade total da descarga em uma bobina ou enrolamento é medir o fator de dissipação ou fator de potência da isolação em baixa tensão (abaixo da tensão de iniciação da DP) e em alta tensão (quando a presença de qualquer DP irá aumentar as perdas dielétricas). Uma grande inclinação do fator de potência ou fator de dissipação (o fator de potência em alta tensão menos o fator de potência em baixa tensão) pode ser um indicativo da severa atividade de DP no enrolamento[10].

2.4 FALHAS DIELÉTRICAS CAUSADAS

O Circuito elétrico demonstrado na figura 2.4 é a representação de uma descarga parcial interna, na qual a tensão V_t é uma tensão de corrente alternada.

A cavidade possui uma capacitância C_c , que representa a capacitância referente a cavidade. A capacitância C_b representa a parte do dielétrico que não está sujeita a algum tipo de descarga parcial. Já a capacitância representa a capacitância da parte boa do dielétrico.

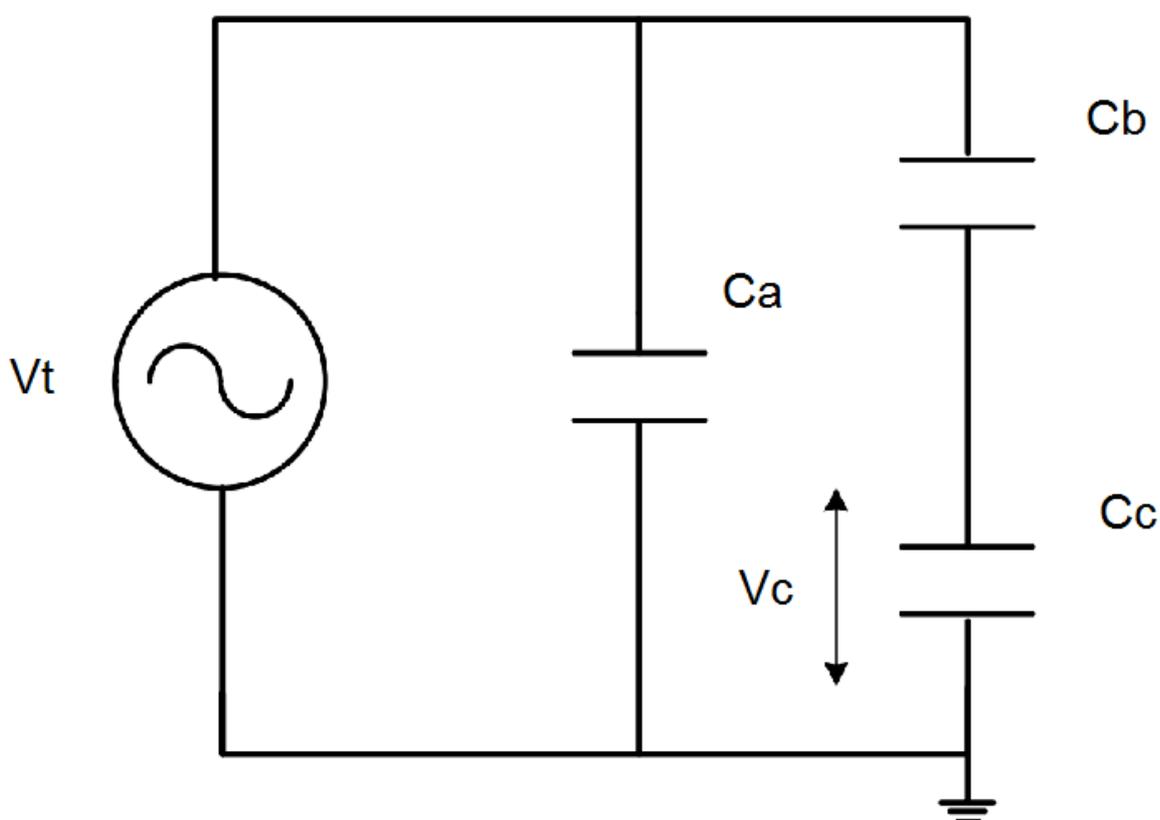


Figura 2.4 – Circuito equivalente da capacitância das descargas parciais.

Fonte: Adaptado de [14], por [2].

Fórmula do circuito equivalente:

$$V_c = \frac{V_t \times C_b}{C_b + C_c}$$

A cavidade representada pela capacitância C_c é submetida a uma tensão V_c , que é proporcional a alta tensão de entrada representada por V_t . C_c está em série com a capacitância C_b , que representa a capacitância do material dielétrico.

Quando ocorre uma descarga parcial, originado através do curto-circuito da capacitância C_c , isso se deve a esta tensão atingir a tensão de ruptura da rigidez dielétrica da cavidade em U_+ ou U_- , como é representado na figura 2.5. Isso ocorre durante todo ciclo, representando uma queda de tensão dos terminais dielétricos podendo interferir no fator de potência da máquina.

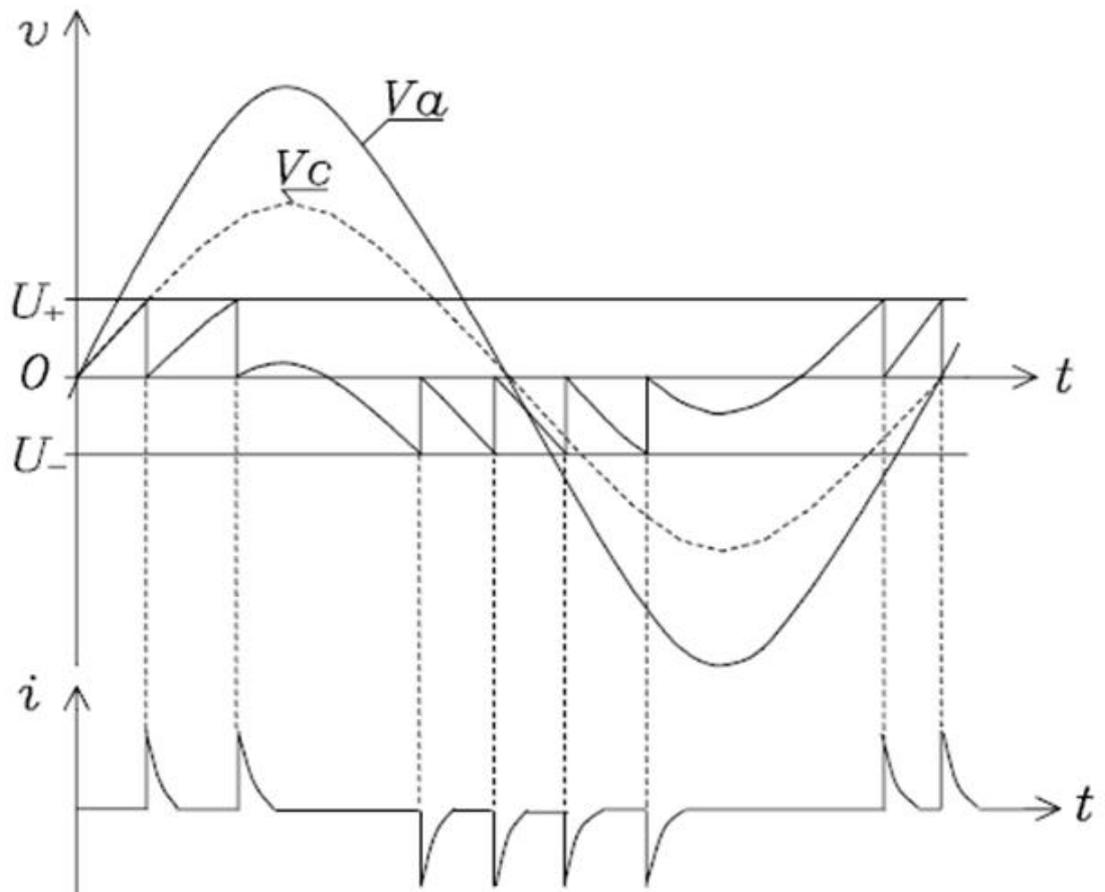


Figura 2.5 – Tensões e correntes no circuito equivalente das descargas parciais.

Fonte: Adaptado de [24], por [2].

3 - TIPOS DE DESCARGAS PARCIAIS E FALHAS CAUSADAS POR ELAS

3.1 TIPOS DE DP_s DE ACORDO COM A NORMA 60034-27-2 IEC 2012[20]

3.1.1 Geral

Descargas parciais podem se desenvolver em toda parte do sistema de isolamento do enrolamento do estator devido às tecnologias específicas de fabricação, deficiências na fabricação, envelhecimento normal em serviço, ou envelhecimento anormal. Design da máquina, a natureza dos materiais usados, métodos de fabricação, condições de operação, etc. podem afetar profundamente a quantidade, localização, características, evolução e o significado de DP. Para uma dada máquina, as fontes existentes de DP podem ser identificadas e distinguidas em muitos casos por seus comportamentos característicos de DP.

3.1.2 Descargas internas

3.1.2.1 Vazios internos

Embora os processos de fabricação sejam desenvolvidos para minimizar vazios internos, inevitavelmente há alguma quantidade de vazio. Por exemplo, em um sistema de isolamento de fita de mica impregnada de resina, que é comumente usada em máquinas rotativas de alta-tensão, a mica em sistemas de isolamento previne as descargas parciais se desenvolverem em um completo colapso. Tanto quanto os vazios internos sejam pequenos e não alarguem significativamente, a confiabilidade operacional não é reduzida.

3.1.2.2 Delaminação interna

Delaminação interna no interior do isolamento principal pode ser causada por um tratamento imperfeito do sistema de isolamento durante a fabricação ou por sobre-estresse mecânico ou térmico durante operação. Grandes vazios podem se

desenvolver sobre uma superfície larga resultando em descargas de grande energia relativa, que podem atacar o isolamento significativamente. Em particular, delaminação reduzirá a condutividade térmica do isolamento, que pode levar ao envelhecimento acelerado ou também uma fuga térmica. Então, delaminação necessita de cuidadosa consideração quando a atividade de DP está sendo avaliada.

3.1.2.3 Delaminação entre condutores e isolamento

Ciclo térmico pode causar delaminação na interface do condutor e do isolamento principal. Esta delaminação pode resultar em descargas parciais as quais podem resultar rapidamente em falhas, especialmente em bobinas multi-espiras.

3.1.2.4 Arborescência elétrica

Arborescência elétrica no isolamento da máquina é um processo de envelhecimento no qual finos canais de erosão propagam-se através do epóxi envolta das barreiras de mica e podem finalmente levar ao colapso elétrico do isolamento principal. Arborescência elétrica pode começar de qualquer ponto de aumento local do campo elétrico no interior do isolamento, como por exemplo, estruturas irregulares do condutor interno, impurezas no isolamento, vazios preenchidos por gases ou delaminações no isolamento. Este processo é associado com a atividade interna de descargas parciais.

3.1.3 Descargas na ranhura

Descargas na ranhura em máquinas de alta-tensão se desenvolverão quando a porção de revestimento condutivo da ranhura está danificada devido ao movimento da barra/bobina na ranhura ou na área de saída da ranhura, por exemplo, pela perda de pressão de cunha devido à fixação, erosão do material, abrasão, ataque químico ou deficiências de fabricação. Descargas mais elevadas se desenvolverão quando sérios danos mecânicos já estão presentes, o que pode resultar em dano adicional para o isolamento principal e eventualmente em uma falha no isolamento. Descargas na ranhura são geralmente causadas pelo aumento de campos elétricos locais, e também esses processos ocorrem somente no maior valor de alta-tensão de cada fase. O tempo absoluto entre detecção deste fenômeno e o colapso final do

isolamento é normalmente desconhecido. Entretanto, comparado a outros efeitos típicos de deteriorização este tempo pode ser relativamente curto, especial na presença de vibrações de barra/bobina. Portanto, a detecção confiável em um estágio inicial é necessária para decidir se as ações corretivas apropriadas são requeridas.

3.1.2 Descargas nos terminais de saída do enrolamento (end-winding)

3.1.2.1 Geral

Descargas parciais nos terminais de saída do enrolamento podem ocorrer em diversas localizações com alta intensidade do campo elétrico local. Tais descargas usualmente ocorrem nas interfaces entre os diferentes elementos da beirada do enrolamento do estator.

3.1.2.2 Descargas superficiais

Descargas superficiais geralmente ocorrem quando o campo elétrico ao longo da superfície excede o campo de colapso do gás circundante. Isto pode ocorrer se o revestimento de controle de estresse não é aplicado ou o revestimento de controle de estresse da beirada se torna ineficiente por causa das interfaces desenhadas de forma pobre, contaminação, porosidade, efeitos térmicos, etc. Quando a classificação confiável de campo não é mais assegurada descargas parciais se desenvolverão, o que pode gradualmente erodir os materiais. Este é normalmente um mecanismo de falha muito lento, até mesmo o comportamento de DP pode estar sujeito a relativas mudanças rápidas devido aos efeitos de superfície. Descargas superficiais normalmente resultam em uma falta fase-terra.

3.1.2.3 Descargas entre fases

DP pode ocorrer entre fases, por exemplo, devido à folgas inadequadas entre fases ou à elementos do sistema de suporte da beirada como espaçadores ou cabos. Dependendo dos detalhes específicos do design estas descargas podem ter grandes magnitudes e podem também ocorrer como descargas de superfície ou descargas internas e também o tempo entre a detecção deste fenômeno e o colapso final do isolamento é incerto. Descargas entre fases podem resultar em uma falta entre fases.

3.1.2.4 Partículas condutoras

Partículas condutoras, especialmente partículas pequenas, por exemplo, devido à contaminação do enrolamento, podem resultar em fortes concentrações locais de descargas parciais. Isto pode resultar em um(a) 'pin-hole' no isolamento.

3.1.3 Arco e centelhamento

3.1.3.1 Geral

Em contraste com os tipos de DPs que são causados pela elevação local de campos elétricos, arco e centelhamento ocorre devido à interrupção de correntes resultando de fluxo magnético dentro do núcleo do estator. Estes processos envolvem altos valores de energia e temperaturas, que levam para uma rápida degradação dos materiais do isolamento. Arco e centelhamento levam a pulsos transitórios, os quais também podem ser detectados por sistemas de medição de DP.

3.1.3.2 Arco em condutores quebrados

Condutores quebrados, resultantes de vibrações mecânicas, podem levar a contatos intermitentes e conseqüentemente a formação de arco.

3.1.3.3 Descargas de vibração

Devido ao campo magnético no núcleo do estator correntes superficiais parasitas fluirão axialmente ao longo da ranhura do revestimento condutivo de uma barra. Em caso da barra vibrar, estas correntes podem ser interrompidas em um ponto de contato com o núcleo de ferro, e a interrupção desta corrente formará um arco com o núcleo. Se a resistência do revestimento condutivo é muito baixa, a corrente será de significativa magnitude e o arco resultante pode danificar o núcleo aterrado por um processo de erosão. Este fenômeno, chamado de descarga de vibração, que é uma relativamente rápida deteriorização do mecanismo, pode ocorrer em qualquer ponto do enrolamento e também em pontos de baixo potencial, por exemplo, a porção de neutro do enrolamento[20].

3.2 FALHAS NOS ENROLAMENTOS DO ESTATOR

Durante o funcionamento do gerador de alta tensão, ele sofre vários tipos de estresse na máquina rotativa, o que causam uma perda de vida útil dos equipamentos, caso não sejam controlados. Entre os tipos de estresses estão: estresses elétricos, estresses mecânicos, estresses térmicos e estresses ambientais.

Na figura 3.1 é apresentado os mecanismos de falha, sintomas, teste de detecção e o tipo da máquina.

Mecanismo de Falha	Sintomas	Teste de Detecção	Tipo de Máquina
Impregnação Inadequada	DPs	Medição de DPs, $\tan \delta$, fator de Potência	Impregnação a vácuo e fita com resina
Falhas na camada semicondutora	DPs, descarga na ranhura, ozônio	Medição de DPs, inspeção visual e monitorar ozônio	Refrigeradas a ar
Enrolamento frouxo	DPs, ozônio, cunhas soltas	Medição de DPs, inspeção visual, monitorar ozônio e testes da cunhagem	Sistemas com isolamento termorrígida (epóxi e poliéster)
Centelhamento por Vibração	DPs, ozônio, cunhas soltas	Medição de DPs, inspeção visual, monitorar ozônio e testes da cunhagem	Com isolações à base de fita com resina ou Impregnação a vácuo
Interface de alívio de Tensão	DPs, pó branco (ácido nítrico), ozônio	Medição de DPs, $\tan \delta$, fator de potência, inspeção visual e monitorar ozônio	Refrigeradas a ar e com pintura na interface de alívio de tensão
Espaçamento Inadequado	DPs, pó branco, descoloração da isolamento e ozônio	Medição de DPs, inspeção visual, monitorar ozônio	Refrigeradas a ar, seccionadoras e conexões de motores
Vibração das cabeças de bobina	Perda do sistema de bloqueio e amarração, pó branco disperso ou graxa	Inspeção visual, acelerômetro de fibra ótica	Alta tensão, alta velocidade com grandes cabeças de bobinas
Má conexão elétrica	DPs, pó branco e descoloração das conexões	Medição de DPs, inspeção visual, temperatura com infravermelho	Qualquer conexão
Deterioração térmica	DPs, descoloração da isolamento	Medição de DPs, $\tan \delta$, fator de potência, inspeção visual	Todos os tipos de máquina
Ciclos de carga	DPs, ruptura da isolamento na saída da barra	Medição de DPs, $\tan \delta$, fator de potência, inspeção visual, Surge Test, Hipot	Todos os tipos de máquina (com barras longas)

Figura 3.1 – Tipos de falhas nos enrolamentos do estator.

Fonte: Adaptado de [21].

As localizações das atividades de DPs tem determinadas configurações relacionando-se com diferentes materiais. Pela figura apresentada a seguir, pode-se observar um corte de caráter transversal de uma barra de estator com os locais que apresentam defeitos típicos, assim como apresenta a figura 3.2 e 3.3.

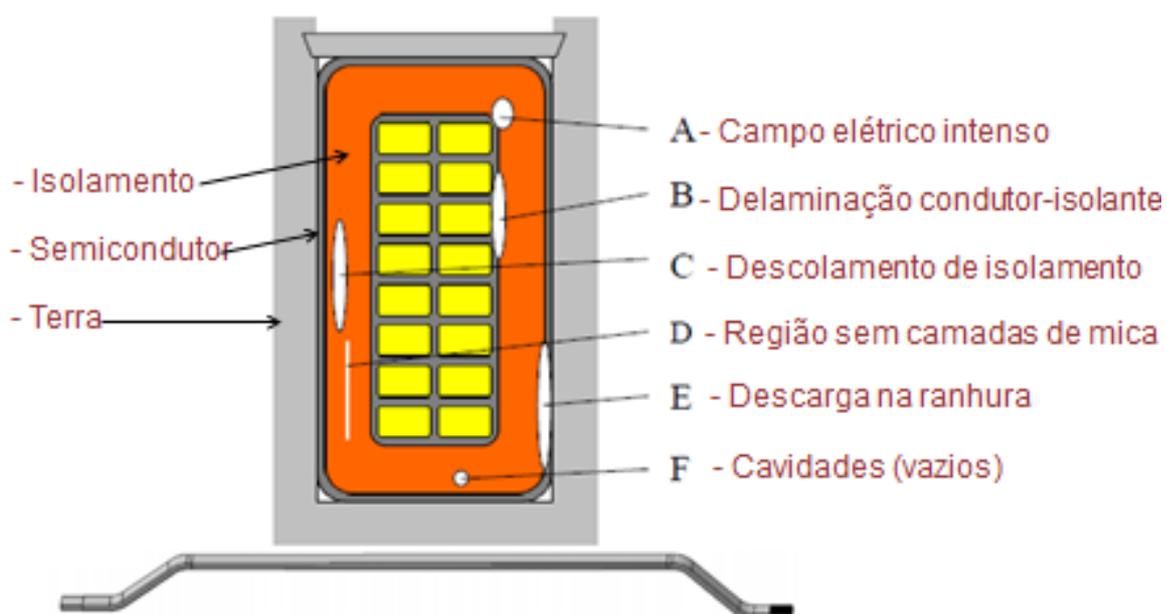


Figura 3.2 – Seção transversal de uma barra de máquina.

Fonte: Adaptado de [22], por [13].

A - A presença de campo elétrico intenso se dá no canto do condutor (corona das bobinas). Pelo processo de fabricação, pode haver uma DP de caráter antecipado em caso de uma borda parcialmente afiada.

B - A delaminação condutor-isolante é o desgaste de isolação principal do condutor. A maior frequência de delaminação encontra-se associada ao sobre carregamento da máquina.

C - O deslocamento de isolamento pode ser definido como delimitação interior da isolação com função principal. Envolve o processo de envelhecimento térmico de isolação de Mica-epóxi.

D - Apontamentos de região sem camada de mica.

E - Descarga vista na ranhura devido a vibração da barra interna da ranhura. A cunha inadequada ou vibração parcial do núcleo podem ser fatores causadores.

F - Cavidades.

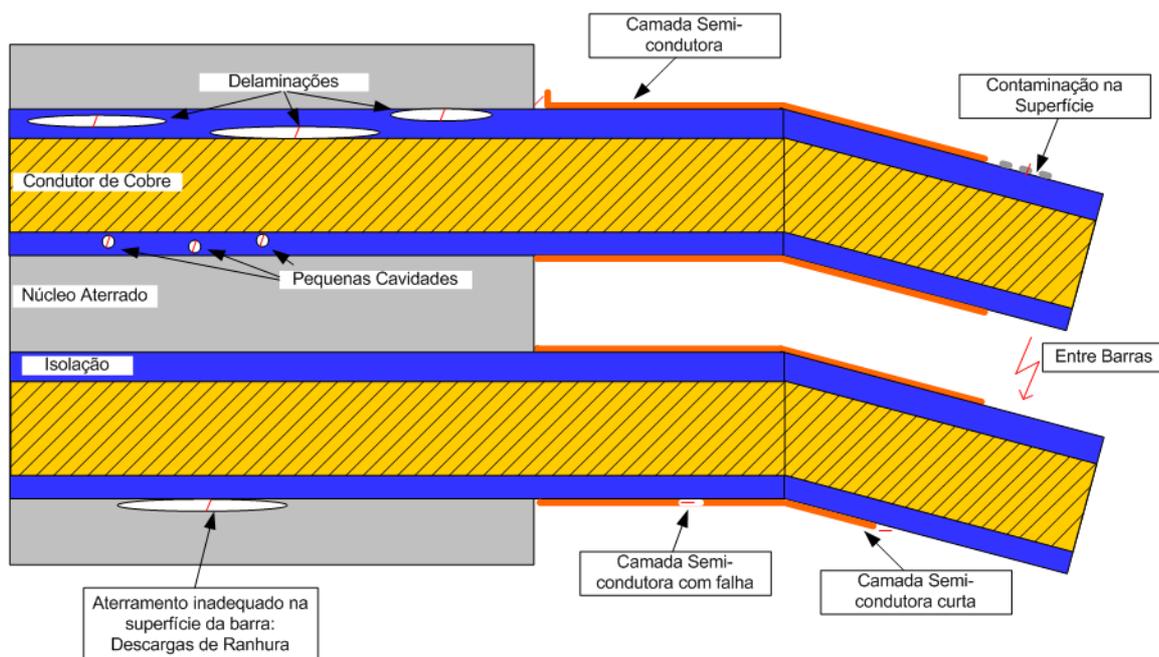


Figura 3.3 – Fontes de descargas parciais no isolamento do estator.

Fonte: Adaptado de [23], por [23].

3.3 EXEMPLOS DE AVARIAS

3.3.1 AVARIAS NOS ENROLAMENTOS ESTÁTORICOS

Um dos defeitos que ocorrem com bastante frequência e um dos mais perigosos são as partículas móveis livres que podem ficar dentro do gerador, como cita a figura 3.4 e 3.5 de [13]. Uma partícula condutora livre que fica em contato com um eletrodo de um sistema energizado é uma perturbação constante, que adquire carga e distorce o campo elétrico. Dependendo da carga acumulada da partícula e do campo elétrico aplicado, uma força eletrostática atua na partícula. A partícula carregada assim levantará com uma força eletrostática que irá exceder a força gravitacional. Sob a influência do campo elétrico, as partículas estão se movendo dentro do recinto e isso é perigoso, pois pode causar muito dano físico às estruturas do hidrogerador. Além disso, todos estes fenômenos são considerados aleatórios, que podem resultar em falhas diversas.

Além disso, as partículas livres podem ser facilmente detectadas por métodos de diagnóstico elétrico ou acústico durante o teste ou em operação de serviço, devido à sua alta emissão de sinal. Essas partículas devem ser removidas durante o reparo ou nos procedimentos de manutenção obrigatórios para tais dispositivos. Uma vez que ocorre essa falha, devem ser avaliadas as consequências do defeito.



Figura 3.4 – (a) Danos causados pela presença do parafuso; (b) Parafuso alocado.

Fonte: Avaria no estator de CHNC [Arquivo Técnico Eletronorte, 2007], retirado de [13].

Percebe-se pela figura 3.5, que houve uma grande remoção da tinta anti-corona, danificando significativamente as barras estatóricas, necessitando que haja manutenção corretiva.

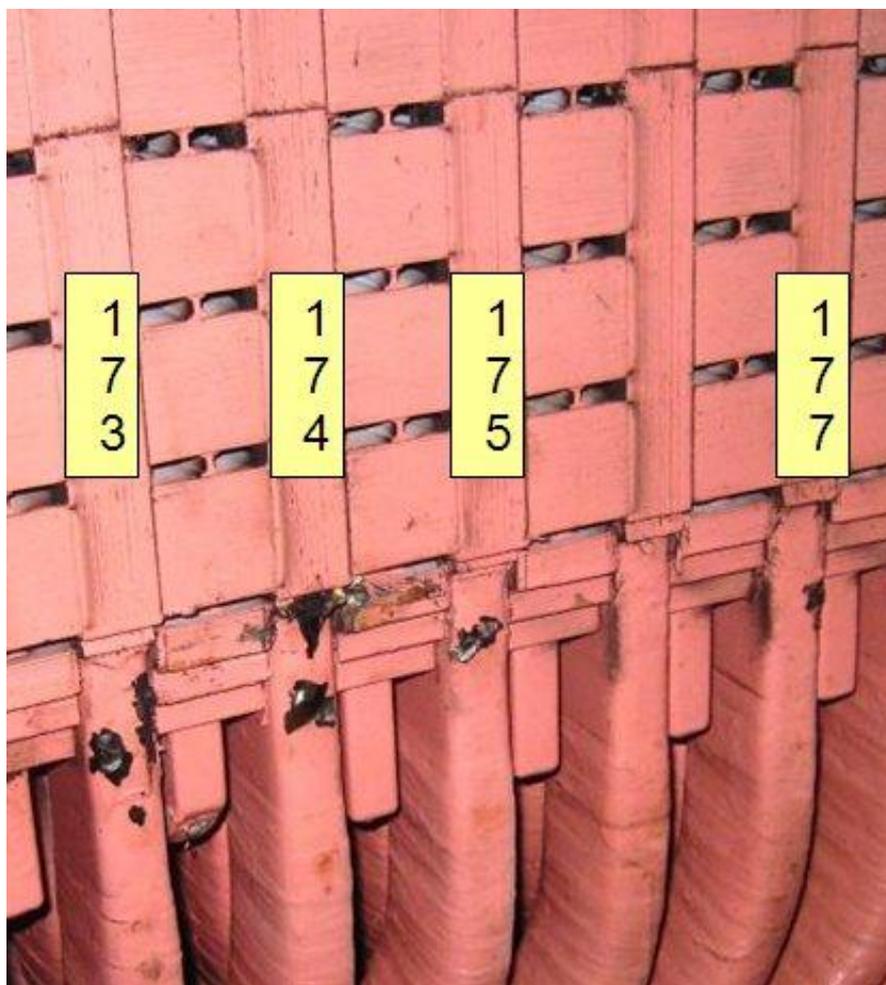


Figura 3.5 – Bobinas (Ranhuras 173, 174, 175, 177 e 187) as quais tiveram a tinta anti-corona removida.

Fonte: Avaria no estator de CHNC [Arquivo Técnico Eletronorte, 2007], retirado de [13].

3.3.2 PANE SOFRIDA PELA USINA HIDRELÉTRICA DE GBM

Após 35 anos de operação, a unidade 1 Da usina Gov. Bento Munhoz da Rocha Netto (UHE GBM) foi comprometida sofrendo 4 curto-circuitos em um período de aproximadamente um mês, exigindo a substituição do enrolamento estatórico. A substituição desse enrolamento exigiu a aplicação de novas tecnologias e melhorias de projeto, materiais e estratégias.

Composta por quatro unidades geradoras de 465MVA / 418,5 MW, 16,5 kV, 56 polos, e em funcionamento por aproximadamente 35 anos, a UHE GBM apresenta índice de disponibilidade anual em torno de 93%. As máquinas da usina são determinantes em qualidade de operação do Sul, bem como na operação da interligação Sul/Sudeste 500/700 kV, em regime permanente ou dinâmico. Essas máquinas têm sido muito utilizadas na geração de potência ativa e reativa, no controle de tensão e como auxiliares na recuperação e controle da frequência do Sistema Interligado Nacional (SIN) devido às suas características geo-elétricas. Tais máquinas foram submetidas à diversas perturbações eletromecânicas e, por requisitos do SIN, também foram expostas à reversões diárias, submetendo o enrolamento estatórico à um importante degrau de temperatura, gerando, assim, esforço entre a isolação das barras estatóricas e o cobre dessas barras.

O risco de falha foi identificado com base no acompanhamento feito pela COPEL geT, responsável pelo monitoramento e análise dos níveis de descargas. Todos esses fatores foram considerados durante o trabalho realizado pela COPEL para identificar causa dos defeitos nas barras estatóricas, sobretudo na decisão final a respeito das medidas a serem tomadas. Porém, devido a uma falta fase-terra no estator, a unidade geradora 1 da UHE GBM saiu de operação em 19/12/2015. Em 19/01/2016 e 10/02/2016 ocorreram novas flata fase-terra no gerador. Após sofrer três defeitos simultâneos no estator, em 24/03/2016, a quantidade de polos e barras danificados impediram o reparo, sendo necessária a substituição de todo o enrolamento estatórico da unidade 1 da UHE GBM. Tal evento foi apresentado pela COPEL.

Questões de planejamento, logística e montagem em campo também foram levadas em consideração no modelamento eletromagnético e na estratégia de reforma, uma vez que tempo e facilidades na realização do trabalho eram aspectos fundamentais para cumprir com a emergência da situação. Assim, foram aproveitadas as conexões do estator e dos suportes, sendo necessária a configuração da nova barra estatórica com a mesma geometria da original a fim de aproveitar os componentes de interface existentes. Foram solicitadas também amostras das barras originais, enviadas para a fábrica da GE, onde foi realizada a engenharia reversa da geometria das barras originais e achando-se todos os valores relevantes para o projeto e fabricação de barras compatíveis. A COPEL avaliou a produção e testes na fábrica de barras, além de acompanhar o processo. Após a montagem das novas barras, a unidade geradora 1 voltou a atuar e outros parâmetros operacionais foram avaliados, como a temperatura do núcleo estatórico nos pontos reparados e a temperatura do enrolamento do estator.

O caráter emergencial da reforma da unidade 1 da UHE GBM torna o projeto tão importante. Os resultados positivos conquistados no âmbito técnico e gerencial são consequência do foco e trabalho interativo e colaborativo da GE e da COPEL, que possibilitaram a tomada de decisões adequadas em momentos críticos, com a devida diligência técnica. Assim, foi possível a execução das atividades que, mesmo sendo concluídas em um curto período, não comprometeram nenhum requisito de saúde, segurança ou meio ambiente, não envolvendo acidentes ou danos materiais. Também não foram demonstradas necessidades de ajustes em relação a operação da unidade e ao seu desempenho após o retorno da unidade geradora. A operação em um nível mais baixo de temperatura inclusive resulta na maior longevidade do enrolamento, assegurando a credibilidade das medidas tomadas, das práticas e das montagens[9].

4 - ESTRUTURA DE HIDROGERADORES E SISTEMAS DE MEDIÇÃO

4.1 ESTRUTURA DAS UNIDADES GERADORAS

Uma máquina geradora é usualmente composta por dois componentes, sendo um deles o estator e o outro o rotor. O rotor tem o objetivo de desenvolver o campo magnético, enquanto que o estator é conjunto de condutores, ou enrolamentos, fixos por um núcleo. Os enrolamentos do estator funcionam como um condutor proporcionando um caminho à eletricidade, enquanto que o núcleo concentra o campo magnético, fixa os enrolamentos e dissipa calor.



Figura 4.1 – (a) Estator completo: enrolamentos fixados no núcleo; (b) rotor completo; (c) Máquina completa: Estator + Rotor.

Fonte: Adaptado de [11], por [2].

Uma vez que a diferença de potencial entre os enrolamentos e o núcleo aterrado do estator pode chegar a alguns milhares de volts, faz-se necessário separar essas duas superfícies com um material isolante. Embora extremamente necessário na isolação elétrica, suporte e transferência de calor, não tem nenhuma função na produção de eletricidade ou torque em si. A isolação é a parte mais fraca e a que envelhece mais rápido, por ação dos mais diversos tipos de estresses (elétricos, mecânicos, químicos e ambientais) que estão presentes em uma máquina em condições operacionais, conforme explica [2].

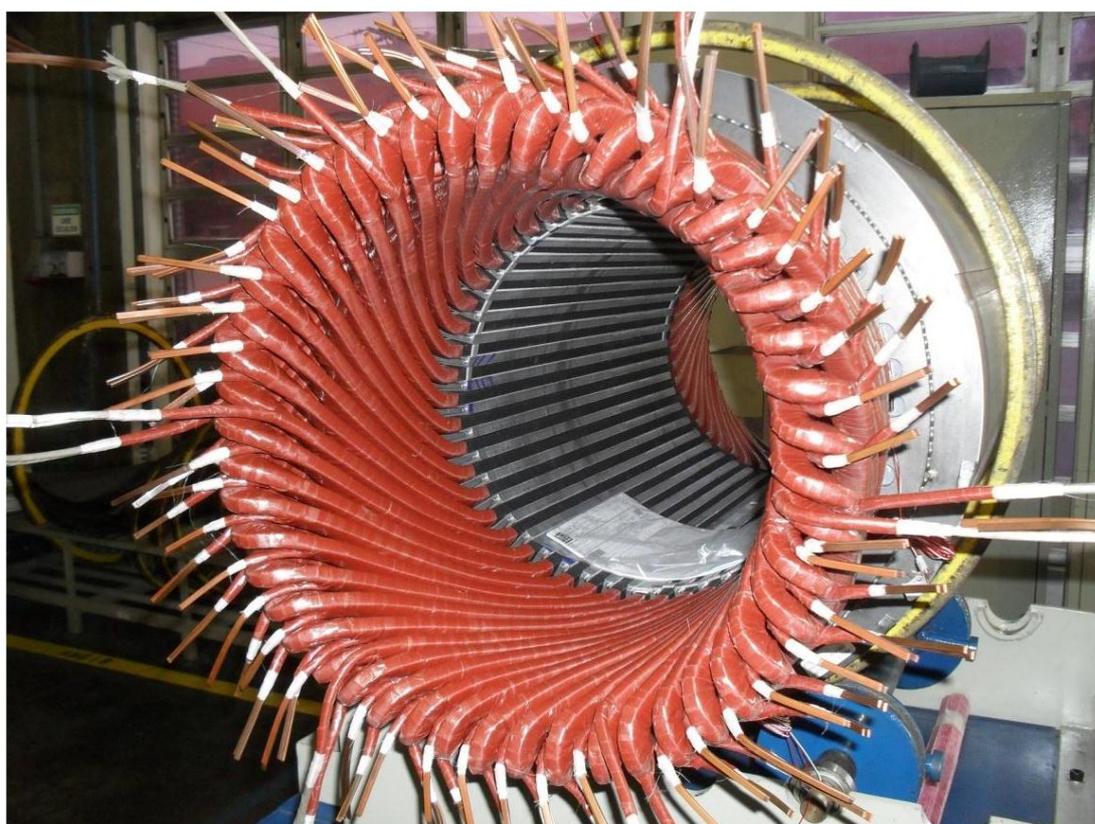


Figura 4.2 – Exemplo de um estator bobinado.

Fonte: Retirado de [12].

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 nas extremidades de forma a constituir um enrolamento estático.

4.2 ACOPLAMENTO CAPACITIVO E MICROFITA SSC

As descargas parciais são acompanhadas por várias manifestações físicas, entre elas: pulsos elétricos e pulsos de rádio frequência, pulsos acústicos, luz, assim como reações químicas em gases de resfriamento, que pode ser o ar ou hidrogênio. As seguintes classificações são um resumo de como algumas dessas manifestações podem ser mensuradas, servindo como meios de quantificar a atividade de descargas nas barras que formam o enrolamento do estator.

4.2.1.1 MEDIÇÃO DE PULSO ELÉTRICO

Pelo fato da descarga parcial envolver um fluxo de elétrons e íons ao longo de uma distância pequena e em um curto período de tempo, uma pequena corrente elétrica flui ao longo do enrolamento da máquina toda vez que ela ocorre. Esse fluxo de corrente elétrica cria uma tensão elétrica detectável. Um dos meios de detectar essa descarga é medindo o pulso de pequena tensão que a acompanha ou o pulso de corrente resultante. O pulso de tensão pode ser detectado por meio de capacitores de alta-tensão, que são conectados ao terminal fase ou no enrolamento.. A saída dos capacitores são pulsos de tensão que são medidos com um osciloscópio[10].



Figura 4.3 – Acoplador capacitivo de 80pF.

Fonte: Adaptado de [16].

4.2.1.2 ACOPLADORES CAPACITIVOS

Os capacitores são usados como dispositivos acopladores para permitir a passagem de sinais de descargas parciais (pulsos de alta frequência) do ponto de detecção à entrada do equipamento de medição e filtrar a tensão de saída do gerador. A resposta em frequência real é função do capacitor e seu circuito associado. Os acopladores capacitivos são capacitores de alta tensão com possibilidade de funcionamento acima da tensão nominal dos geradores. Comercialmente, existem acopladores com capacitância de 80pF, 145pF ou 500pF[10].

4.2.2.1 MEDIÇÃO DE RADIAÇÃO DE RADIO FREQUENCIA

A faísca originada da descarga parcial cria ondas eletromagnéticas de rádio frequência que se propaga por causa do pulso de tensão originado no enrolamento do estator. Utilizando um antena apropriada é possível captar essas ondas eletromagnéticas.

As características do gerador e a atividade da descarga podem definir o tipo de sensor e a localização da sua instalação. A seguir é apresentados o SSC, um dos principais sensores e sistema de medição de descargas parciais[10].

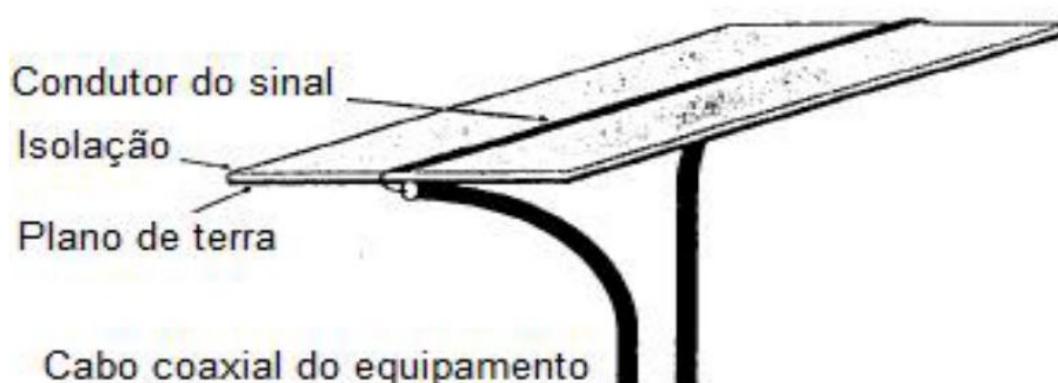


Figura 4.4 – Acoplador no slot do estator (SSC – STATOR SLOT COUPLER).

Fonte: Adaptado de [36].

4.2.2.2 ACOPLADOR NO SLOT DO ESTATOR (SSC)

O SSC (Stator Slot Coupler) é, essencialmente, um acoplador eletromagnético direcional, uma tecnologia bem conhecida no campo de micro-ondas. O acoplador é localizado no slot do estator do gerador. Essa posição oferece uma localização para detecção de DP em máquinas, pois o detector está o mais próximo possível das fontes de DP. O SSC consiste de um plano de terra e uma linha sensora com cabos coaxiais em cada extremidade da saída. Assim, toda vez que uma onda eletromagnética (por exemplo, um pulso de DP) se propagar ao longo do SSC, próximo à linha sensora, ele produz um pulso de saída em cada extremidade.

4.3 CONEXÃO DO ACOPLAMENTO CAPACITIVO

A medição elétrica pode ser realizada utilizando sensores de DPs que detecte as componentes dos sinais dos pulsos que se deslocam através dos enrolamentos do estator de máquinas rotativas. É utilizar o acoplador capacitivo como ferramenta para medir os pulsos elétricos.

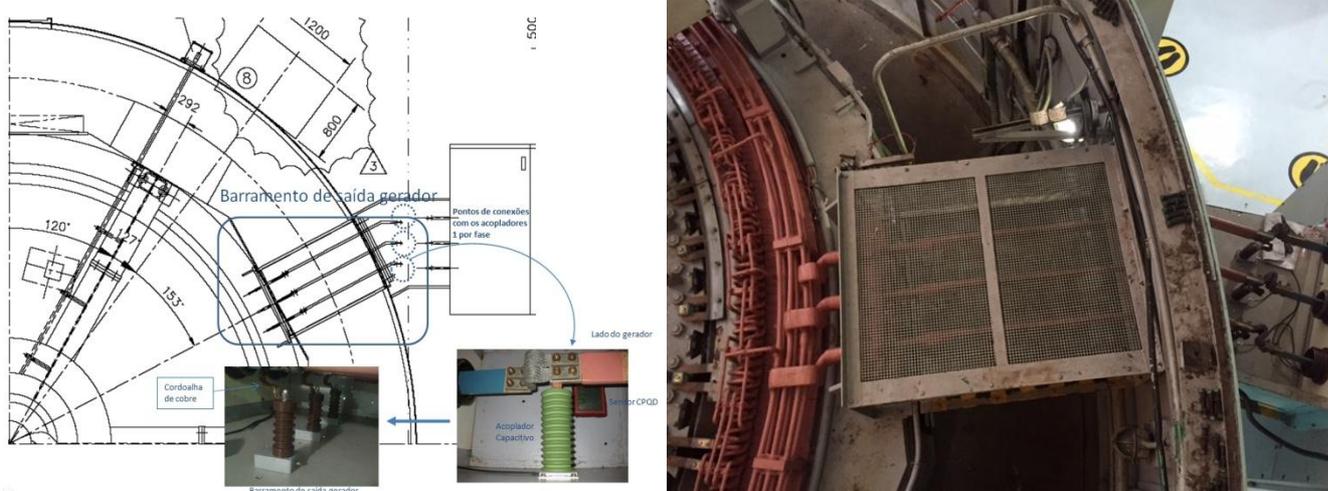


Figura 4.5 – Instalação do acoplador na UHCN, no barramento de saída do gerador.

Fonte: retirado de [13].

O capacitor de acoplamento tem a função de transferir o espectro de alta frequência dos sinais de DPs do enrolamento até o dispositivo de acoplamento, o qual simultaneamente, atenua a tensão do sistema para baixas magnitudes.

O acoplador deverá ser montado de um modo geral o mais próximo possível do terminal de máquina. A alta tensão, bem como a ligação à terra do acoplador deve ser ligada mais próximo da máquina e distante do cabo, se possível. A instalação dos acopladores capacitivos exigem as seguintes conexões, as quais foram retiradas de [13]:

- a) Ligação de alta tensão entre o barramento de fase e terminal do acoplador;
- b) Ligação de terra entre a caixa de alumínio do acoplador e o terra;
- c) Ligação entre cada acoplador e impedância de acoplamento;
- d) Ligação da caixa da impedância de acoplamento e o terra.

A próxima imagem demonstra um exemplos des conexões feitas pela instalação dos acoplamentos capacitivos nos barramentos de saída do gerador.

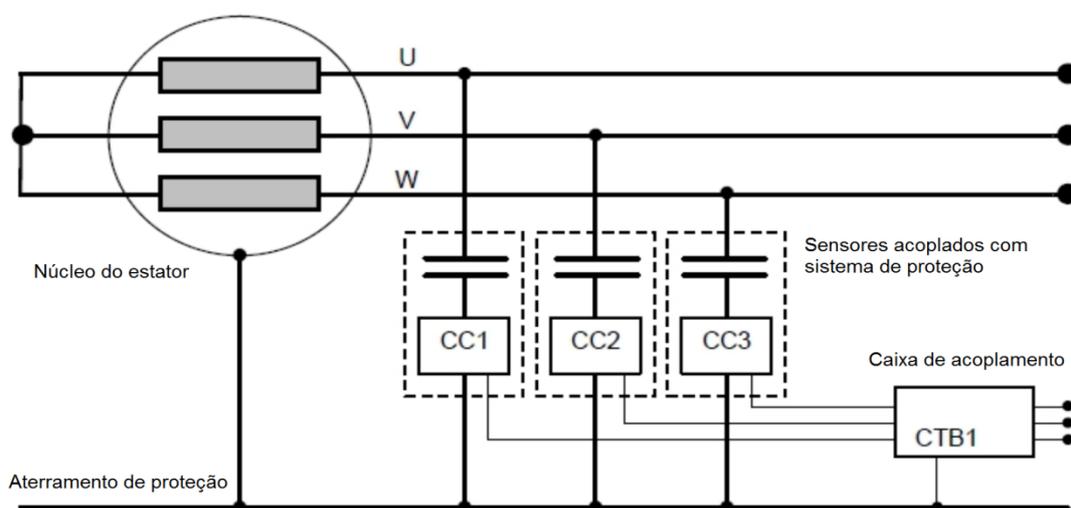


Figura 4.6 – Capacitores em paralelo com o barramento de saída do gerador.

Fonte: Adaptado de [18].

Acopladores capacitivos foram instalados nas barras de saída do gerador foram usados para monitorar descargas parciais através de um osciloscópio usado para registrar sinais provenientes de descargas parciais.

5 - MEDIÇÃO DAS DESCARGAS PARCIAIS E OS INSTRUMENTOS UTILIZADOS

5.1 IMA-DP

O sistema IMA-DP (Instrumentação para Monitoramento e Análise de Descargas Parciais), projetado e desenvolvido pelo CEPEL, em um dos projetos financiados pela Eletrobrás, com intensa participação da Eletronorte, vem sendo utilizado para o monitoramento dos geradores de suas usinas hidrelétricas.



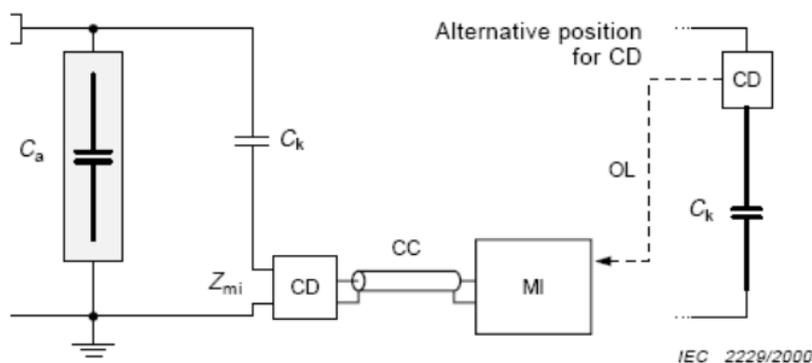
Figura 5.1 – Software utilizado para aquisição das descargas parciais (IMA-DP).

Fonte: Mello Franco, Eduardo C. de. Arquivo pessoal, 2018.

O IMA-DP possui uma plataforma completamente diferente. Ele utiliza conceitos pertinentes à instrumentação virtual e aloca todas as informações em um banco de dados corporativo da empresa, podendo ser visualizado em qualquer ponto da empresa que esteja conectado à rede. Esta facilidade permite, entre outras

coisas, que o monitoramento seja feito à distância, isto é, sem a necessidade de aproximação física com o objeto monitorado, como uma medição on-line, o que pode representar bem estar e maior rendimento ao profissional que acompanha o processo[5].

O sistema IMA-DP baseia-se na norma internacional IEC 60270 que rege a maioria dos ensaios em DP. Em especial, quando possível, a medição é realizada pelo método convencional, denominado método eletromagnético. Nele, um acoplador capacitivo é inserido paralelamente ao enrolamento e, através de uma impedância de medição é possível mensurar as grandezas relacionadas aos sinais de descargas parciais.



Ca...Objeto de ensaio
 Ck...Capacitor de Acoplamento
 CD Impedância de Medição
 CC .. Cabo Coaxial
 MI .. Instrumento de Medição

Figura 5.2 – Circuito equivalente da conexão do acoplador capacitivo.

Fonte: Adaptado de [3].

As máquinas da UHE Samuel possuem acopladores capacitivos de 80pF instalados aos pares por fase. A sua concepção de medição foi baseada no método diferencial, sendo que os ruídos são eliminados através do tempo de chegada aos acopladores. Os acopladores capacitivos instalados permanentemente nas máquinas, tanto na saída de fase do gerador quanto no interior dos enrolamentos, possuem conectados em série impedâncias que tem como função capturar os sinais de descargas acopladas pelo circuito[5].

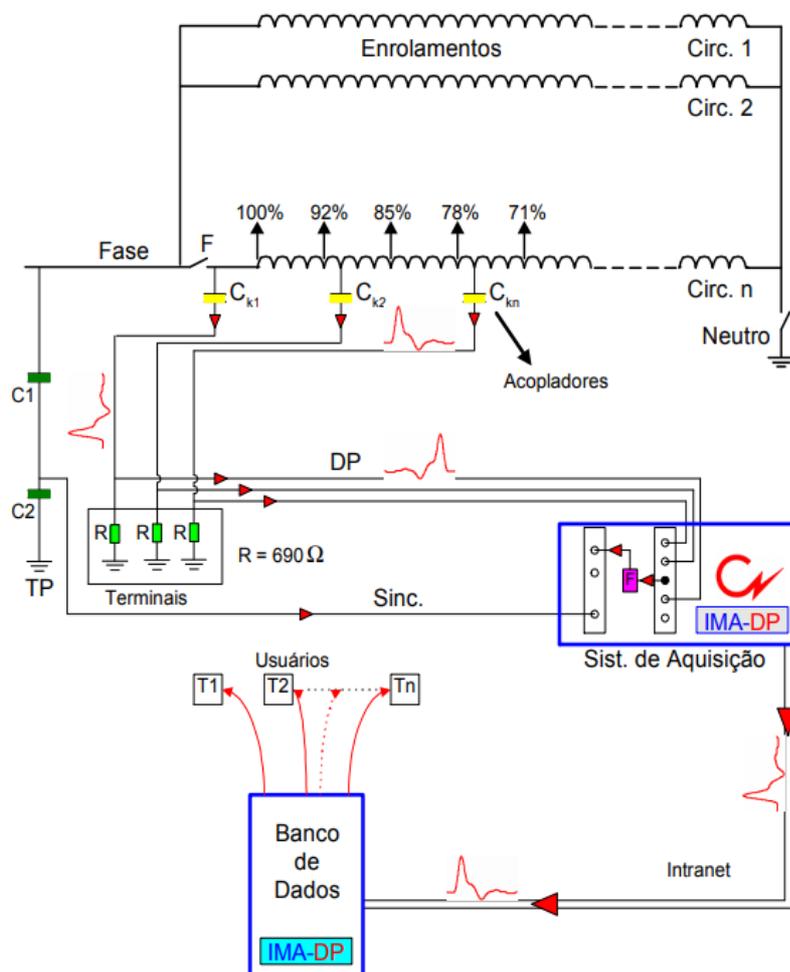


Figura 5.3 – Relação das medições com o banco de dados adquiridos pelo software.

Fonte: Retirado de [5].

Este arranjo elétrico contendo um capacitor e um resistor forma um filtro passa-alta com frequência de corte em torno de 3MHz. Desta forma, os sinais registrados por qualquer que seja o sistema de medição, deverão ser de alta frequência, acima dos 3MHz. Por esta razão outras concepções de instalação são possíveis, quer variando o capacitor quer variando a impedância de medição, mas com o objetivo de obter maior sensibilidade em frequências mais baixas, com menores atenuações em amplitude[5].

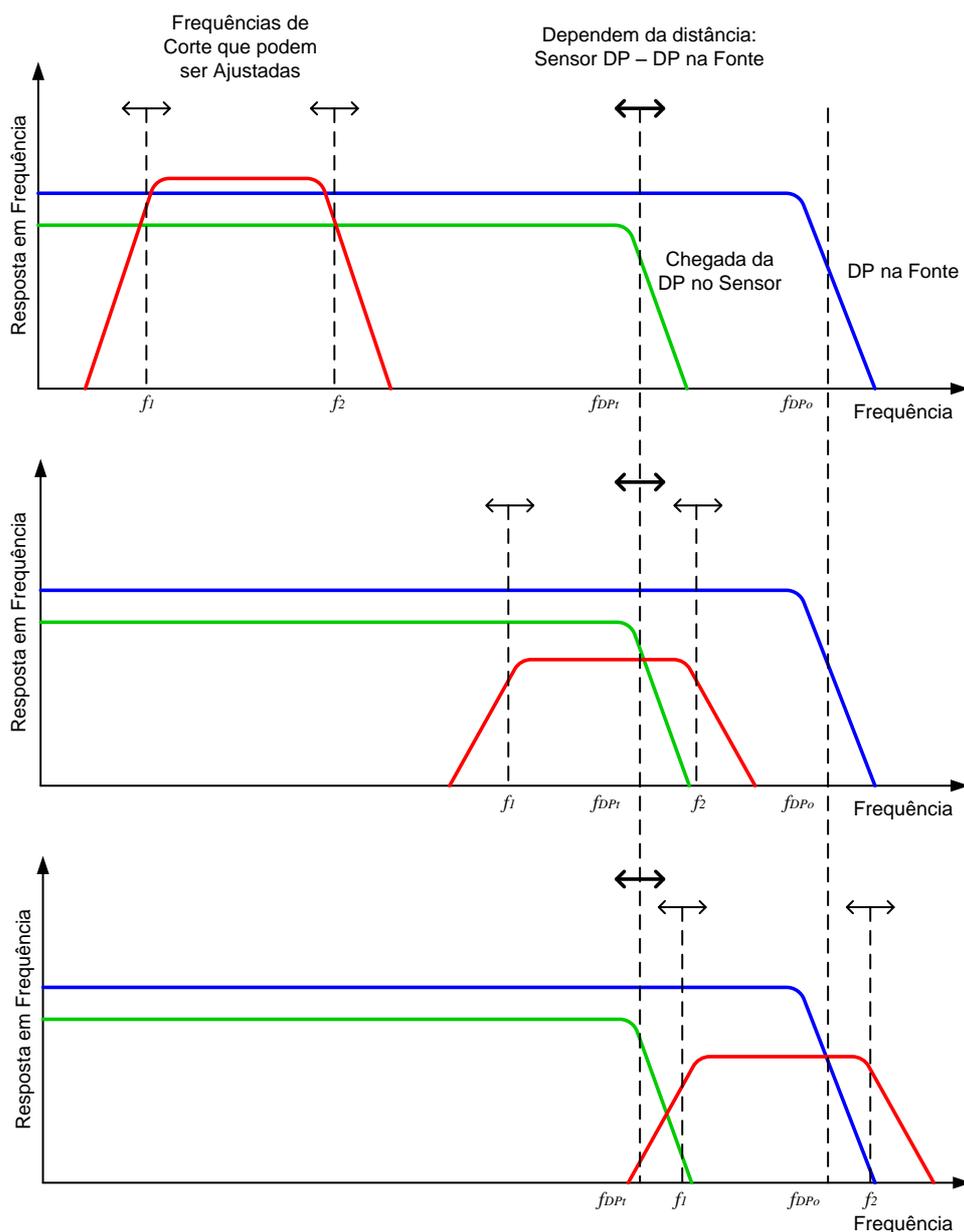


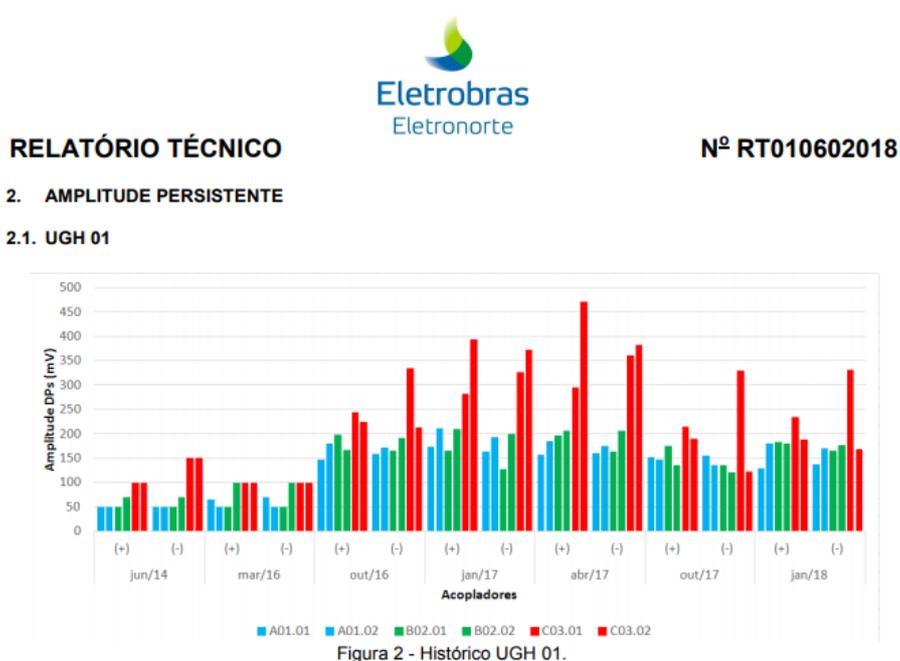
Figura 5.4 – Resposta em frequência de um pulso de DP na fonte e nos terminais da máquina para diferentes sistemas de medição.

Fonte: Retirado de [20].

- São utilizados os seguintes equipamentos para medição de descargas:
 - Osciloscópio para medição dos sinais no domínio do tempo;
 - Analisador de Espectro para medição dos sinais no domínio da frequência;

- IMA-DP para medir os sinais ao longo de 60s criando um mapa estatístico específico dos sinais, formalizando um mapa estatístico característico dos sinais obtidos.
- O sistema IMA-DP baseia-se na norma internacional IEC 60270 que rege a maioria dos ensaios

Com estes instrumentos utilizados, pode-se chegar em um resultado satisfatório, sendo assim, permite-se fazer relatórios técnicos precisos sobre o comportamento e evolução das descargas parciais como mostra a figura a seguir:



2.2. UGH 05

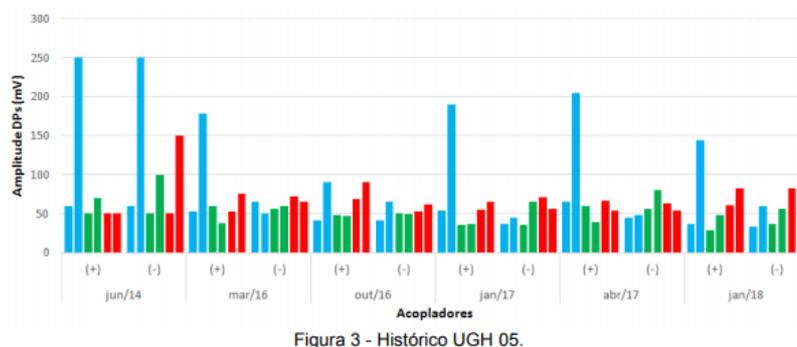


Figura 5.5 – Relatório técnico da Eletronorte 2018

O desenvolvimento do IMA-DP em suas três configurações teve por motivação, desde a sua concepção e ao longo do amadurecimento de suas funcionalidades, os seguintes aspectos:

- Propiciar uma análise mais detalhada do comportamento das descargas parciais em cada instalação de tal modo e se ajustar o sistema de medição para a sensibilidade melhor possível;
- Reduzir os custos dos sistemas de monitoramento de tal forma que seja viável sua instalação em um grande número de unidades geradoras e pontos de acopladores;
- Flexibilizar o custo total do sistema em função do interesse específico em se monitorar mais intensamente algumas unidades em detrimento de outras. A filosofia de sistemas modulares permite que se façam arranjos dinâmicos ao longo do tempo sem alterações do software que gerencia os instrumentos e daquele que analisa os dados armazenados. Isso possibilita reorganizar os módulos de aquisição entre os diferentes geradores de uma determinada usina;
- Reduzir os custos envolvidos na atualização de software e hardware e os custos com a manutenção dos sistemas;
- Facilitar a introdução contínua de ferramentas de análise e diagnóstico aproveitando-se de toda estrutura do banco de dados que é obtido ao longo do tempo;
- Nacionalizar os estágios de monitoramento, formatação da informação, análise das DP e diagnóstico das máquinas criando assim conhecimento e potencial de análise em cada empresa que seja suficiente para decisões de manutenção desse tipo de instalação;
- Facilitar e agilizar os processos de medição de DP nas usinas pelo pessoal da manutenção e, conseqüentemente, tornar mais dinâmico e rápido o diagnóstico do isolamento estatístico;

5.2 CARACTERÍSTICA DAS MEDIÇÕES DE DESCARGAS PARCIAIS

Testes de descargas parciais de enrolamentos de estatores podem ser divididos em dois grandes grupos:

- medições off-line, nas quais o enrolamento do estator está isolado do sistema de potência e uma fonte de energia auxiliar é empregada para energizar o enrolamento;
- medições on-line, nas quais a máquina rotativa está operando normalmente e conectada ao sistema de potência.

Ambas as abordagens tem vantagens e desvantagens em relação uma a outra. Uma discussão detalhada sobre teste off-line de DP é obtida em IEC/TS 60034-27, onde essa especificação técnica está restrita a técnicas on-line. A abordagem para tratar de técnicas de medição on-line e off-line em duas especificações técnicas diferentes é considerada necessária para tornar cada especificação suficientemente concisa para serem usadas por não-especialistas no campo de medições de DP.

As principais diferenças entre medições on-line e off-line são devido à diferença na distribuição de tensão ao longo do enrolamento e diversos efeitos térmicos e mecânicos relacionados com a operação, como vibração, contact arcing ou gradientes de temperatura entre estatores de núcleo de cobre e estatores de núcleo de ferro. Além disso, especialmente para máquinas resfriadas por hidrogênio o gás e a pressão do gás é diferente para medições de DP on-line e off-line.

Devido ao impacto estressante real no enrolamento durante a medição e devido ao fato de que a medição é realizada durante operação normal, o teste on-line de DP tem se tornado muito popular. Desde que a interrupção de serviço não é requerida, uma vez que os sensores de DP são instalados durante uma interrupção programada da unidade, e nenhuma fonte de energia auxiliar é necessária, o teste on-line é usualmente rentável comparado a medição off-line de DP. Mudanças de condições do sistema de isolamento do enrolamento do estator podem ser identificadas e avaliadas em um estágio inicial baseado em avaliações de condições

em tempo real e também baseada nas condições e, estratégias de manutenção preditiva podem ser melhoradas.

Ruído e distúrbio devem ter um grande impacto nos sinais detectados, especialmente para medições on-line de DP. Acoplamento cruzado de DP e ruído em uma fase podem esconder DP em outra fase. Como alguns sistemas de medição, isso pode fazer com que uma interpretação objetiva dos resultados dos testes seja difícil.

Usuários de medições de descargas parciais que as utilizam como instrumento de manutenção preditiva devem estar atentos aos princípios dos métodos, pois nem todos problemas relacionados ao isolamento do enrolamento do estator podem ser detectados pela medição de descargas parciais, por exemplo, falhas de isolamento envolvendo correntes de fuga contínuas devido a passagens condutivas entre diferentes elementos do isolamento ou fenômeno de descargas sem pulso.

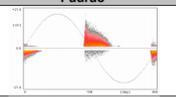
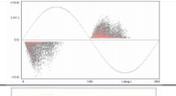
5.3 – PADRÕES E COMPORTAMENTOS DE ACORDO COM A NORMA

Discriminação de pulsos de acordo com a fase (phase resolved PD), a figura a seguir mostra alguns exemplos de padrões de DP resolvidos em uma forma estilizada, que normalmente podem ser encontrados para defeitos em sistemas de isolamento do enrolamento do estator. A medição de descargas parciais segundo os relatórios técnicos seguem a norma IEC:2012 TS 60034-27-2[25].



RELATÓRIO TÉCNICO **Nº RT010602018**

Tabela 1 – Classificação das descargas quanto ao tipo e grau de risco.

Tipo de Descarga	Padrão	Risco
Descargas de Ranhura		Alto
Delaminações Internas		Alto
Delaminações entre Condutor e Isolação		Alto
Descargas Tipo Gap		Médio
Contaminação		Médio
Descargas Internas devido a pequenas cavidades		Baixo

IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 12, No. 2, April 2005

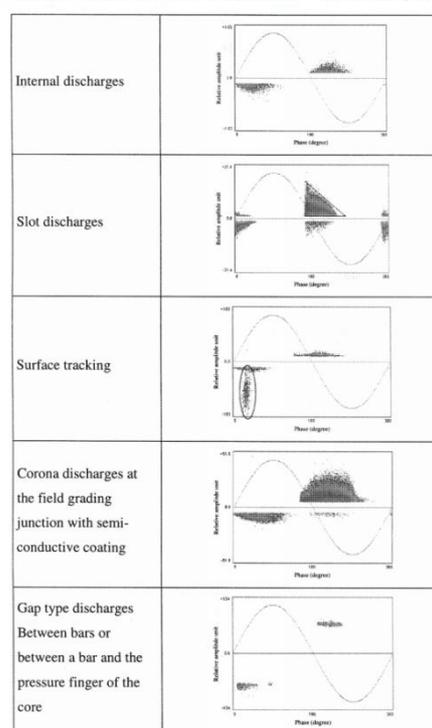


Figure 32. Current database developed by Hydro-Quebec for PRPD shape recognition.

Figura 5.6 – (a) Padrão de reconhecimento de descargas parciais adotado pela Eletronorte; (b) Padrão de reconhecimento de descargas parciais adotado internacionalmente.

Fonte: Adaptado de [25].

A figura 25 apresenta os principais tipos de descargas parciais encontrado em máquinas rotativas e sua classificação de risco seguindo a norma internacional IEC 60034-27- 2 (2012).

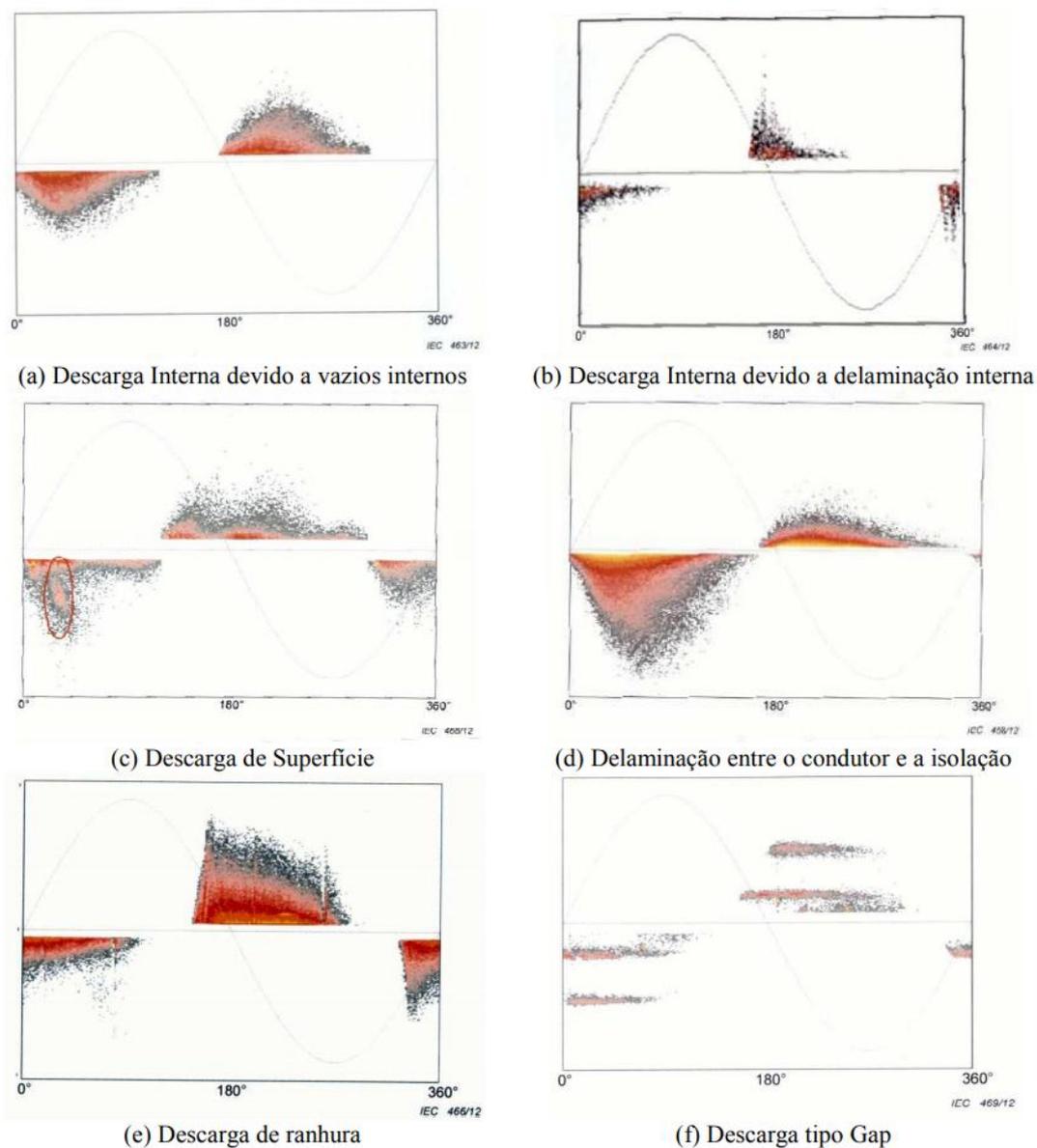


Figura 5.7 – Padrão disponibilizado pela IEC.

Fonte: Adaptado de [25].

6 - A IMPORTÂNCIA DA MANUTENÇÃO PREDITIVA

6.1 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A manutenção é conceituada pela Associação de Normas técnicas (ABNT – NBR 5462 1994) da seguinte forma:

“A combinação de todas as ações técnicas e administrativas, incluindo as de supervisão, destinadas a “manter” ou “recolocar” um item em um estado no qual possa desempenhar uma função requerida”.

E o principal papel que a manutenção preditiva é “manter” um item que possa desempenhar sua função sem que haja uma necessidade de paralisação de determinado item, e com várias consequências que são evitadas por sistemas que as usam. E isso garante a disponibilidade da função dos equipamentos e das instalações, trazendo confiabilidade às máquinas e garantindo a segurança dos trabalhadores.

Nas definições de manutenção pelas normas brasileiras como a ABNT – NBR 5462 1994, “Confiabilidade e manutenibilidade”.

- Confiabilidade: Capacidade de um item desempenhar uma função requerida sobre condições especificadas, durante um intervalo de tempo. O termo confiabilidade é usado como uma medida de desempenho (NBR 5462-1994).
- Manutenibilidade: Capacidade de um item ser mantido ou recolocado em condições de executar as suas funções requeridas, sob condições de uso especificadas, quando a manutenção é executada sob condições determinadas e mediante procedimentos e meios prescritos. O termo “manutenibilidade” é usado como uma medida do desempenho de manutenibilidade (NBR 5462-1994).

6.2 – TIPOS DE MANUTENÇÃO

A manutenção preditiva é conceituada pela Associação de Normas técnicas (ABNT – NBR 5462 1994) da seguinte forma:

“Manutenção que permite garantir uma qualidade de serviço desejada, com base na aplicação sistemática de técnicas de análise, utilizando-se de meios de supervisão centralizados ou de amostragem, para reduzir ao mínimo a manutenção preventiva e diminuir a manutenção corretiva.”

A manutenção preditiva diferentemente da manutenção corretiva e da manutenção preventiva, ela tenta prever uma possível falha antes delas acontecerem. A manutenção preditiva atua como uma inspeção constante e sistemática para relatar as condições dos equipamentos. Tarefas realizadas para eliminação de probabilidades de defeitos e falhas evitam manutenções corretivas, através da monitoração das condições dos equipamentos. Garantindo que o sistema que está sendo utilizado pelo cliente seja efetivamente e eficientemente mantido em seu ciclo de vida programado.



Figura 6.1 – Classificações das manutenções.

Fonte: Adaptado de [26].

Manutenção Preventiva: Manutenção efetuada em intervalos predeterminados, ou de acordo com critérios prescritos, destinada a reduzir a probabilidade de falha ou a degradação do funcionamento de um item (NBR 5462-1994).

Manutenção Corretiva: Manutenção Corretiva é a manutenção efetuada após a ocorrência de uma pane, destinada a recolocar um item em condições de executar uma função requerida (NBR 5462-1994).

No Brasil a manutenção preditiva aumentou a pressão competitiva pelas empresas, e abriu o mercado brasileiro para esse tipo de investimento. Esse investimento se faz necessário, pois melhora a eficiência e a confiabilidade, assegurando o funcionamento ininterrupto das máquinas, eliminando perdas e otimizando os custos de manutenção. Isto resulta em uma forma estratégica com ações dos integrantes da empresa na busca e um desenvolvimento contínuo de melhoria de processos e produtos, se adaptando ao ambiente de competição global atual.

A necessidade de paralisação de uma máquina como um gerador de grande porte, pode acarretar em uma paralisação de toda uma cadeia produtiva. Isso causa uma preocupação generalizada pela empresa e pelos trabalhadores. Gerando prejuízos monetários como:

- Perda de energia que deixou de ser gerada;
- Multas geradas pelos órgãos regulamentadores;
- Equipe e itens necessários para realização da manutenção.

O foco no controle e prevenção de falhas passou a fazer parte do cotidiano da equipe de manutenção e trouxe bons resultados em termos de aumento da confiabilidade e disponibilidade de máquinas e equipamentos, diminuição dos riscos de segurança e saúde do trabalhador, entre outros. Ainda assim, as interrupções frequentes e os custos gerados pela manutenção preventiva tiveram repercussões negativas na produtividade, afetando o custo dos produtos. Aliado a tal fato, o avanço tecnológico, com difusão dos computadores a partir de meados da década de 60, trouxe inovações para controle, medição e análise de falhas, tanto em termos

de tratamento de dados quanto em termos de disponibilidade de novos instrumentos e equipamentos. Assim, foram desenvolvidos critérios de previsão de falhas, com equipes focadas no melhor aproveitamento dos recursos disponíveis, através de controles estatísticos, estudos das avarias e uso de sistemas informatizados. Neste contexto, surge a Manutenção Preditiva e a área de Planejamento e Controle da Manutenção – PCM[26].

Em muitos casos, a necessidade de inovação e otimização demandava criação de equipes multidisciplinares para interações nas fases de projeto, fabricação e manutenção de equipamentos e máquinas, proporcionando resultados ainda melhores em termos de produtividade e eficiência em custos. Além disso, com a crescente exigência de qualidade dos produtos por parte dos consumidores, a manutenção foi obrigada a responder por suas intervenções com maior rigor e confiabilidade, diminuindo retrabalhos e falhas na produção. Neste contexto, a Manutenção assumiu papel não apenas importante, mas estratégico dentro das empresas.

6.3 – DEFEITO, FALHA E PANE

É definido através de indicadores o que é considerado defeito, falha ou pane.

1. Defeito

- Qualquer desvio de uma característica de um item em relação aos seus requisitos.
 - A) Os requisitos podem, ou não, ser expressos na forma de uma especificação;
 - B) Um defeito pode, ou não, afetar a capacidade de um item em desempenhar uma função requerida.
- Defeitos são ocorrências nos equipamentos que não impedem seu funcionamento instantaneamente, mas a curto ou longo prazo, pelo acarretamento do problema, acarretam sua indisponibilidade.

2. Falha

- Término da capacidade de um item em desempenha a função requerida.
 - A) Depois da falha, o item tem uma pane;
 - B) A “falha” é um evento: diferente de “pane” que é um estado;
 - C) Este conceito, como definido, não se aplica a itens compostos por software.
- Falha são ocorrências nos equipamentos que impedem seu funcionamento ou acarretam perdas graves de desempenho ou ainda prejuízos à qualidade do produto final ou de serviço prestado.

3. Pane

- Estado de um item caracterizado pela incapacidade de desempenhar uma função requerida, excluindo a incapacidade durante a manutenção preventiva ou outras ações planejadas, ou pela falta de recursos externos.
 - Uma pane é geralmente o resultado de uma falha de um item, mas pode existir sem uma falha anterior.
- Quando ocorre uma falha completa em um equipamento, cessando o seu funcionamento, em consequência, ele entra em estado de pane.

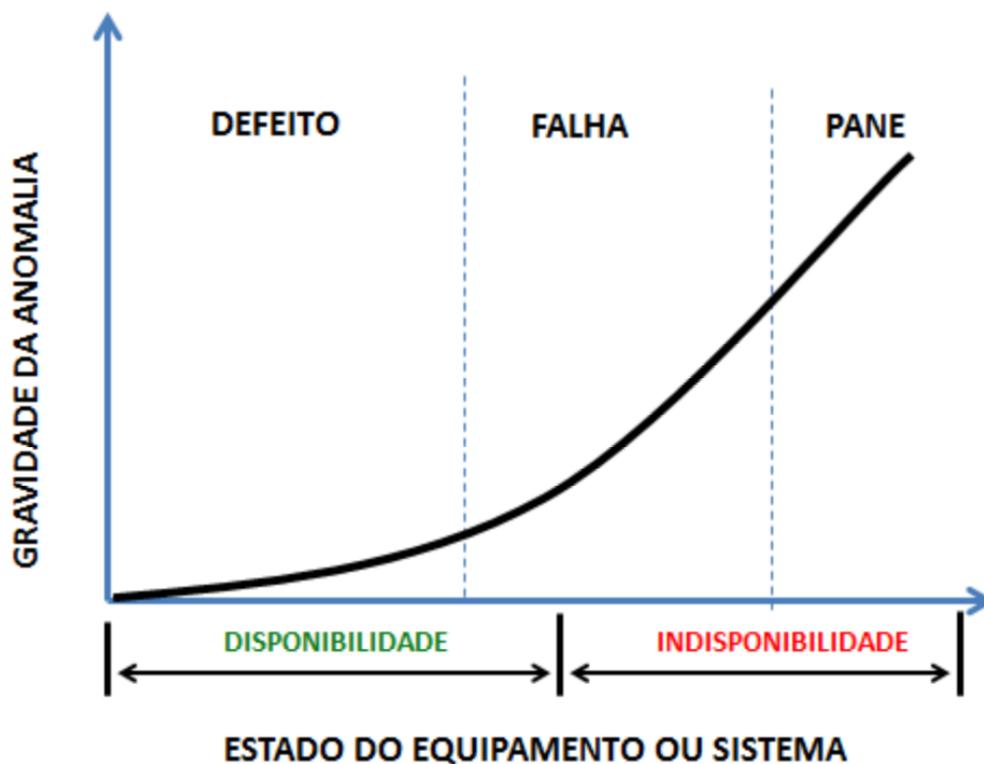


Figura 6.2 – Definição do estado do equipamento devido a gravidade da anomalia.

Fonte: Adaptado de [26].

As falhas atraem a atenção porque têm conseqüências para as organizações

- Custos de reparos;
- Afetam a segurança das pessoas e da sociedade;
- Afetam a integridade dos equipamentos;
- Prejudicam a quantidade de produção;
- Prejudicam a qualidade do produto;
- Provocam perda de produção;
- Aumentam os custos operacionais.



Figura 6.3 – Elaboração de uma plano de manutenção.

Fonte: Adaptado de [26].

Cabe destacar que o processo de manutenção e o tratamento das interfaces existentes são os fatores para o sucesso do sistema de gestão e das pessoas e dos relacionamentos humanos. A gestão somente é bem sucedida se realizada por pessoas e equipes engajadas. As lideranças promovam o claro entendimento dos processos, mantenham a motivação e forneçam orientação permanente aos participantes, num clima de confiança e cooperação. A compreensão e o gerenciamento dos fundamentos e suas múltiplas relações na organização, dos diretamente envolvidos, são cruciais para o alcance pleno do sucesso.

Nesse enfoque, constata-se que manutenção é um processo e não um fim por si só. Deve ser vista como consequência e não causa. Como processo ela nunca acaba, somente se adapta às condições do meio e dos processos necessários.

Como benefícios obtidos de uma gestão estratégica podemos citar:

- Maior utilização do dinheiro ativo;
- Redução de custos de operação (redução das perdas devidas às partidas e paralisações causadas por problemas de confiabilidade);
- Redução de modificações caras depois da construção e do startup;
- Redução dos custos de manutenção;
- Potencial de redução nos custos de capital;
- Operação mais segura.

7 - ESTUDOS DE CAMPO E RESULTADOS OBTIDOS

7.1 USINA HIDRELÉTRICA DE SAMUEL

A usina hidrelétrica de Samuel abastece energia elétrica para todo estado de Rondônia e também para o estado do Acre, sendo muito importante na integração energética do país, abastecendo a energia de residências e indústrias da região Norte.



Figura 7.1 – Vista da usina hidrelétrica de Samuel.

Fonte: Mello Franco, Eduardo C. de. Arquivo pessoal, 2018.

O rio Jamari é um rio da Bacia amazônica, afluente do rio Madeira. Na sua margem direita e no município de Candeias do Jamari onde existia uma cachoeira chamada Samuel, foi construído a barragem da Hidrelétrica de Samuel. Por não possuir bacia acentuada, o rio Jamari recebeu em seu leito um dique de 45 km de extensão de cada margem para formar o lago da hidrelétrica. A usina começou a ser construída no ano de 1982 e concluída catorze anos depois.

A energia elétrica consumida em Rondônia é gerada pela Usina Hidrelétrica Samuel e por um parque termelétrico operado pela Eletrobras Eletronorte e por produtores independentes de energia. Samuel tem potência instalada de 216 MW, com cinco máquinas de 43,2MW, sendo considerada um marco na história local. Sua construção possibilitou que uma antiga colônia de pescadores desse lugar ao município de Candeias do Jamari.

GERAÇÃO	POTÊNCIA TOTAL (MW)		POTÊNCIA (MW)			TOTAL UNIDADES USINA
	ANEEL (*)	EFETIVA	UNIDADE	NOMINAL	EFETIVA	
GERAÇÃO HIDRÁULICA	216,0	216,0	SUUGH-01	43,2	43,2	5 x 43,2
			SUUGH-02	43,2	43,2	
			SUUGH-03	43,2	43,2	
			SUUGH-04	43,2	43,2	
			SUUGH-05	43,2	43,2	
TOTAIS				216,0	216,0	

Figura 7.2 – Potencial total instalado na UHE de Samuel.

Fonte: <http://www.eletronorte.gov.br/opencms/opencms/pilares/geracao/parqueGerador/UHE/samuel.html>

A hidrelétrica foi concebida inicialmente para suprir as cidades rondonienses de Guajará-Mirim, Ariquemes, Ji-Paraná, Pimenta Bueno, Vilhena, Abunã e a capital, Porto Velho. Atualmente, 90% dos 52 municípios do Estado são beneficiados com energia firme e segura desse sistema isolado da Eletronorte. Em 20 de novembro de

2002, a capital do Acre, Rio Branco, passou a ser abastecida também com a energia de Samuel. Em maio de 2006, esse sistema foi ampliado, permitindo que a geração térmica do Acre fosse substituída pela hidráulica, proporcionando a substituição da geração a derivados de petróleo. Além de Samuel, a Eletrobras Eletronorte opera a Usina Termelétrica Rio Madeira, que produz 90 MW. Somada à geração dos produtores independentes de energia, a potência instalada da Eletrobras Eletronorte em Rondônia é de 403 MW [5].

O autor deste Trabalho de Conclusão de curso foi convidado pelos engenheiros da Eletronorte para acompanhar estudos de campo e visitou 8 vezes a usina hidrelétrica de Samuel, onde foi apresentado o tópico de medição de descargas parciais em seus geradores, sendo possível a realização desse ensaio nas unidades geradoras.



Figura 7.3 – Monitoramento de descargas parciais.

Fonte: Mello Franco, Eduardo C. de. Arquivo pessoal, 2018.

7.2 – TESTES REALIZADOS E EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

Cada unidade geradora possui um quadro geral de seus acopladores, conforme figura a seguir, e nela pode ser visualizada, de maneira rápida e intuitiva as condições de cada acoplador em especial.

Desta forma, pretende-se neste documento, apresentar os resultados obtidos com a experiência na UHE Samuel, no estado de Rondônia, mostrando especialmente a medição e as formas encontradas para solucioná-las.



Figura 7.4 – Cabo coaxial instalado na caixa terminal.

Fonte: Mello Franco, Eduardo C. de. Arquivo pessoal, 2018.

Nesta direção estabeleceu-se o que denominamos de IMA-DP. Ele baseia-se na utilização de uma placa de osciloscópio de conexão USB conectado ao notebook através de cabos coaxiais interligando os terminais da caixa de conexão ao osciloscópio, pode-se registrar de maneira rápida e eficiente os sinais oriundos de cada terminal.

Cada máquina da Usina Hidrelétrica de Samuel conta com 6 acopladores, sendo duas unidades por fase: C1 e C2, em uma caixa terminal onde é possível conectar e registrar sinais de DP internos à Unidade Hidrogeradora. Como é demonstrado na figura 7.5. Os sinais de descargas acopladas pelo circuito tem como função capturar o comportamento das impedâncias conectadas em série com o circuito.



Figura 7.5 – Caixa terminal para medição de descargas parciais.

Fonte: Mello Franco, Eduardo C. de. Arquivo pessoal, 2018.

A caixa terminal, geralmente instalada na parede externa do gerador, possui o formato mostrado na anterior. Nela é possível observar a identificação das fases (A, B e C) e os respectivos pontos (C1 e C2) que representam os acopladores capacitivos instalados no enrolamento estático da máquina.

Foi utilizado um osciloscópio da National Instruments para fazer a conexão à caixa terminal, como mostra a figura 7.6, modulando e demonstrando os dados recebidos dos acopladores capacitivos. A atividade prévia para começar a monitorar o sistema é calibrar a frequência de ocorrência das descargas parciais.



Figura 7.6 – Osciloscópio da National Instruments.

Fonte: Mello Franco, Eduardo C. de. Arquivo pessoal, 2018.

Na figura 7.7 foi identificada uma tendência de atividade de descarga parcial em pontos específicos da forma de onda. A concentração de pulsos negativos entre 180 e 360 graus, coletado especialmente pelo acoplador C3, nas três fases indicam ocorrência de defeitos fase-neutro localizados na porção da barra no interior da ranhura do gerador.

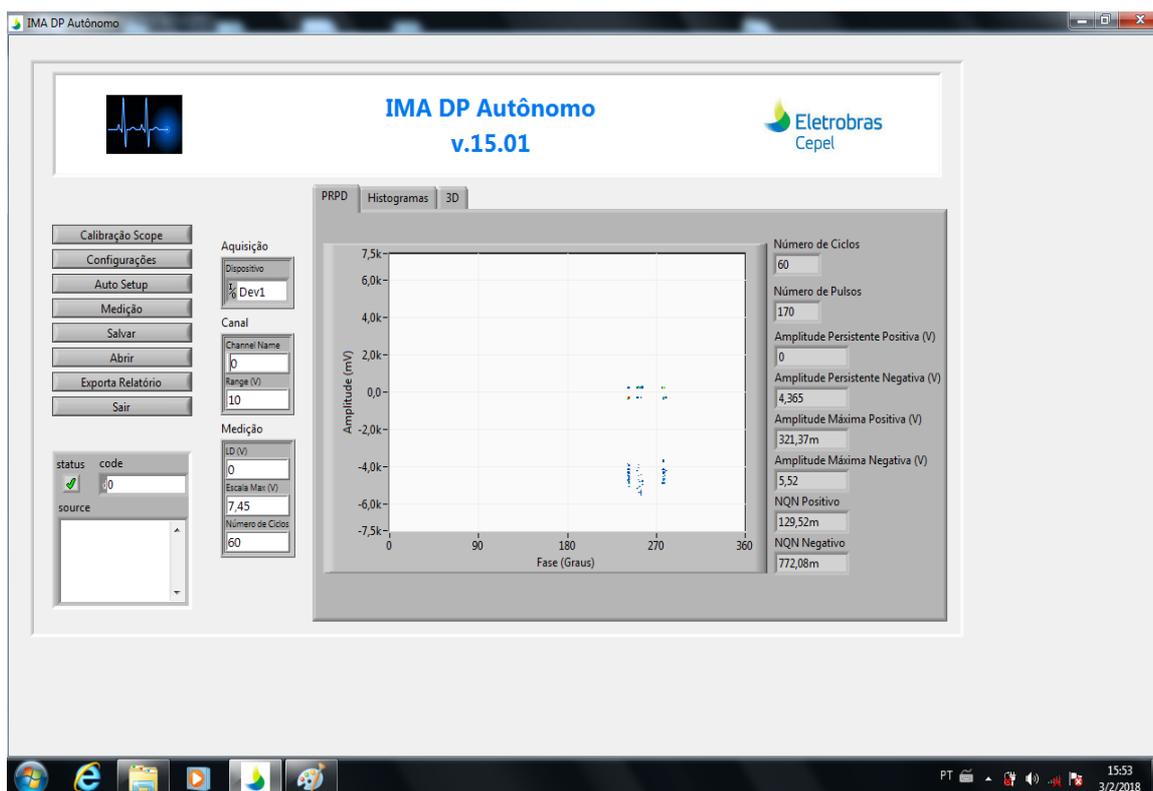


Figura 7.7 – Medição de descargas parciais da UGH 5 fase B.

Fonte: Mello Franco, Eduardo C. de. Arquivo pessoal, 2018.

Na figura 7.8 foi identificada uma tendência de atividade de descarga parcial em pontos específicos da forma de onda. A concentração de pulsos negativos entre 90 e 180 graus, coletado especialmente pelo acoplador C2, nas três fases indicam ocorrência de defeitos fase-neutro localizados na porção da barra no interior da ranhura do gerador.

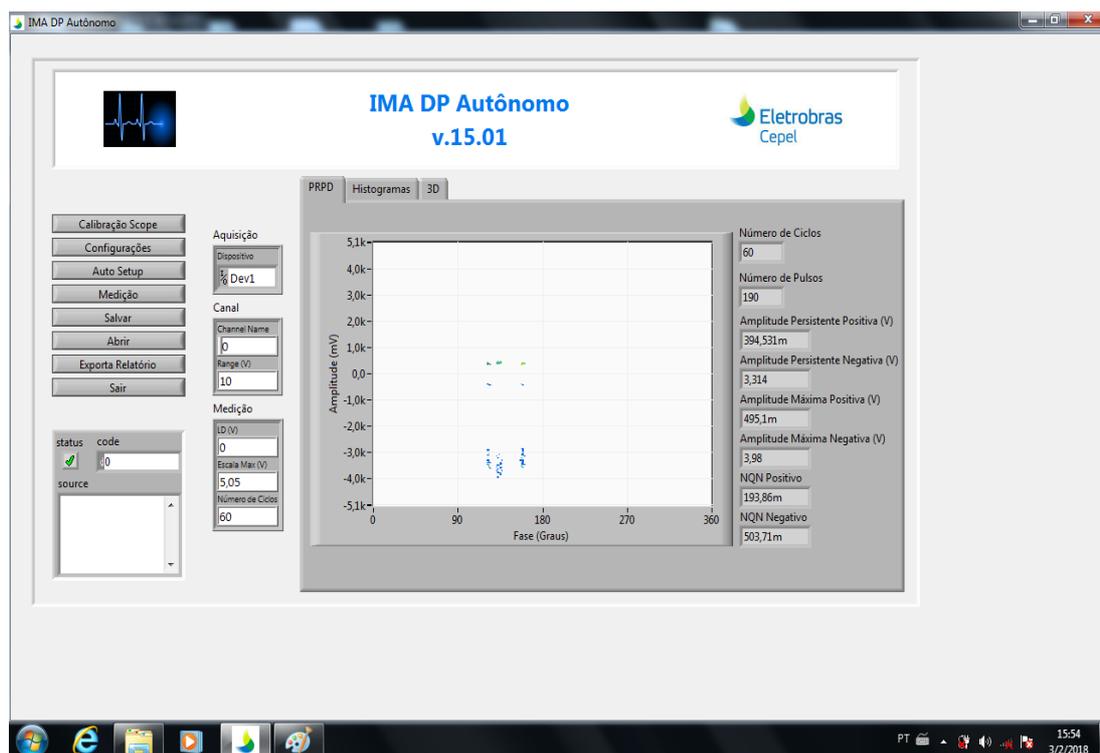


Figura 7.8 – Medição de descargas parciais da UGH 5 fase A.

Fonte: Mello Franco, Eduardo C. de. Arquivo pessoal, 2018.

Pode-se abstrair dos gráfico medidos, e juntamente com a norma da IEC pode-se determinar, que este é um comportamento de uma descarga de superfície através da figura 7.9.

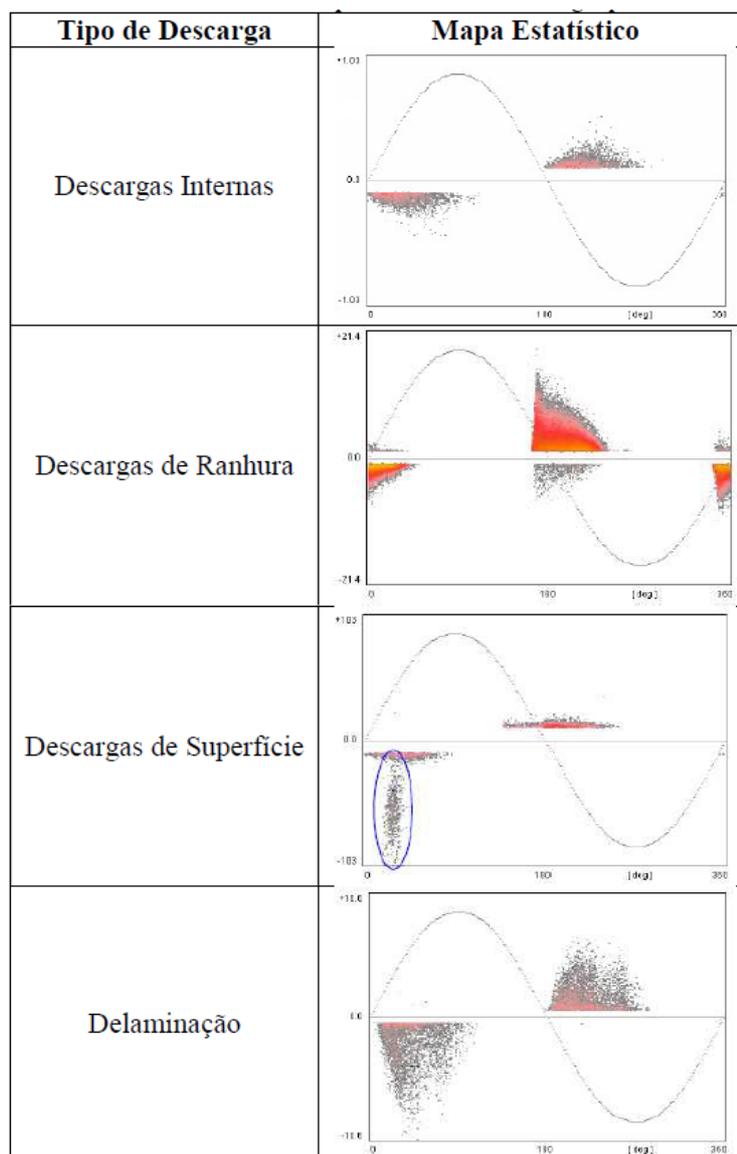


Figura 7.9 – Mapa estatístico de acordo com cada tipo de descarga.

Fonte: Adaptado de [20].

Descargas de superfície são descargas que se formam comumente no final das barras estáticas. Normalmente é causada por poeira ou outros contaminantes, ou é reforçada pelo fraco desempenho da tinta de classificação ou por temperaturas anormalmente altas. O rastreamento de superfície também fornece padrões de PRPD assimétricos. No entanto, a sua característica predominante é que dá origem a descargas negativas muito grandes, na frequências de 40800 kHz. Essas descargas muito grandes geralmente ocorrem em torno de 135° e 270° do ângulo de fase, o que cria um cluster vertical igual de descargas. Esse cluster define a atividade de característica predominante de rastreamento de superfície.

Na figura 7.10 foi identificada uma tendência de atividade de descarga parcial em pontos específicos da forma de onda. A concentração de pulsos positivos entre 0 e 30 graus de aproximadamente 20 Volts, demonstrando um problema que pode está influenciando e gerando as descargas de superfície nas outras fases da unidade geradora.

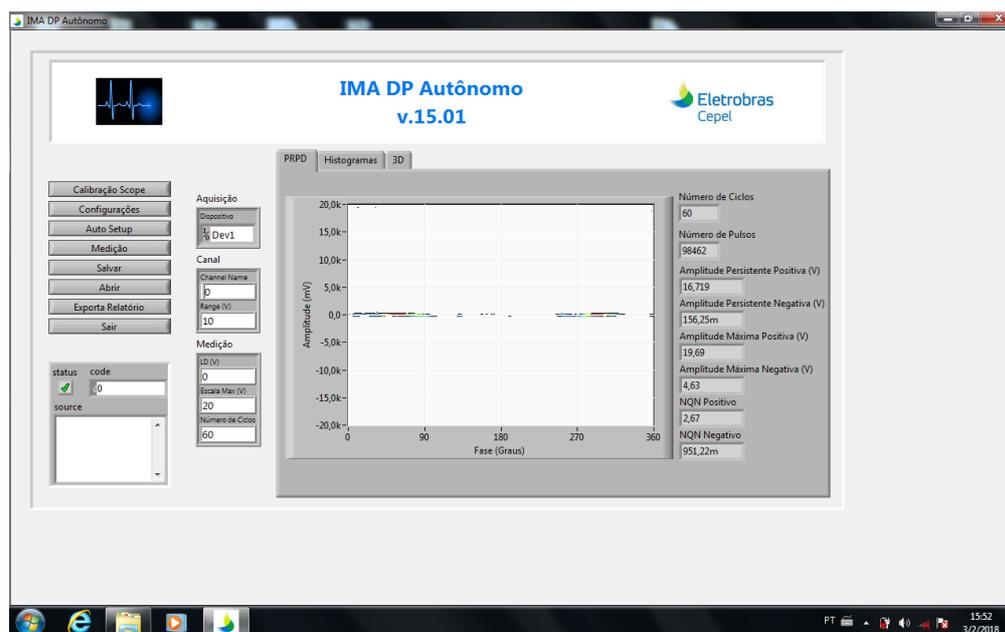


Figura 7.10 – Medição de descargas parciais da UGH 5 fase A.

Fonte: Mello Franco, Eduardo C. de. Arquivo pessoal, 2018.

O sistema IMA-DP da usina hidrelétrica de Samuel está instalado nesse computador industrial PXI da National Instruments, como mostra a figura 7.11. É um método de teste remoto disseminados pela intranet da rede. Neste sistema qualquer computador conectado a rede pode ter acesso e realizar teste com o IMA-DP.



Figura 7.11 – Computador industrial PXI da National Instruments.

Fonte: Mello Franco, Eduardo C. de. Arquivo pessoal, 2018.

O processo de medição é regido pelo módulo controlador, que roda sobre um sistema operacional um software de aquisição e processamento de sinais. Ao realizar uma medição, o PXI inicialmente busca na rede todos os parâmetros necessários, e, após posicionar a chave comutadora para o canal correto, realiza o número especificado de aquisições e processamentos na placa de aquisição correspondente. O resultado de cada medição é registrado no banco de dados do sistema e poderá ser analisado pelo sub-sistema de análise.

Entre os meses de Fevereiro e março o autor dessa monografia realizou, juntamente com os técnicos da Eletronorte, vários ensaios de descargas parciais nas 5 unidades geradores presentes na hidrelétrica de Samuel.

O objetivo destas medições é conseguir manter a unidade geradora em funcionamento sem haver paradas não programadas e aumentando os índices de desempenho operativo.

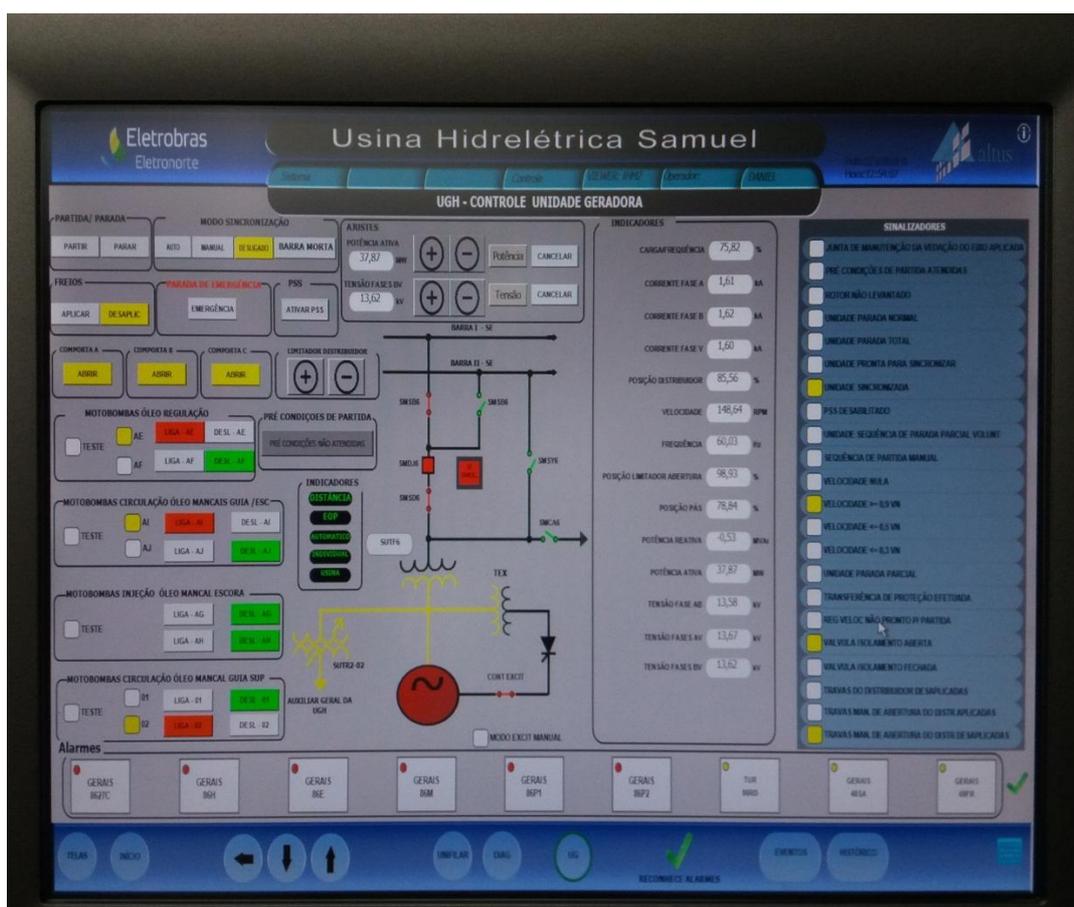


Figura 7.12 – Painel de controle da usina hidrelétrica de Samuel.

Fonte: Mello Franco, Eduardo C. de. Arquivo pessoal, 2018.

8 - CONCLUSÃO

Este trabalho teve como objetivo geral apresentar os principais resultados da monitoração online de descargas parciais instalado na Usina Hidrelétrica de Samuel no Estado de Rondônia.

A possibilidade de instalação de sistemas de monitoramento, eliminando a necessidade de prover equipes para realizar medições e otimizando o tempo de medição e exposição de funcionários em áreas de risco é um aspecto relevante apresentado pelo trabalho. Além disto, medições em tempo real em qualquer uma das Unidades Geradoras da usina hidrelétrica representam um avanço tecnológico imensurável. Aliado a este fato, prega-se que o armazenamento das informações históricas de modo corporativo na empresa por meio de um banco de dados estruturado, permitindo o acesso direto às informações, via rede da empresa, a usuários cadastrados irá dinamizar a utilização deste tipo de análise.

Com base nessas informações confiáveis será possível aprimorar as ferramentas de diagnóstico, visando atingir um sistema totalmente automatizado, com demonstrativos imediatos à engenharia de manutenção, aumentando a confiabilidade e a importância do sistema de monitoramento. Ressalta-se que os resultados experimentais com o IMA-DP foram satisfatórios e bastante produtivos, dando margens a novas frentes de trabalho e pesquisa, que irão valorizar ainda mais o sistema IMA-DP. Busca-se uma redução no custo dos sistemas de monitoramento de tal forma que seja viável sua instalação em um grande número de unidades geradoras e pontos de acopladores.

Foi demonstrado um sistema de auxílio de diagnósticos, para a medição de descargas parciais. Isso faz como que haja a minimização das paradas não programadas, as quais acarretam em vários prejuízos já citados nesta monografia. Esse sistema de diagnóstico vem sendo desenvolvido cada vez mais para uma maior segurança aos trabalhadores e confiabilidade aos equipamentos.

Por fim, concluiu-se que a técnica de monitoração de descargas parciais pode ser utilizada como ferramenta de manutenção preditiva em usinas hidrelétricas.

8.1 PERSPECTIVAS

Pretende-se de certa maneira estimular o debate sobre descargas parciais na comunidade universitária, com a perspectiva que esse tipo de monitoramento seja evoluído cada vez mais pelos pesquisadores e trazendo esse tema para dentro da graduação de engenharia elétrica.

9 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] CONSEIL INTERNATIONAL DES GRANDS RÉSEAUX ÉLECTRIQUES. CIGRÉ 392 Survey of Hydrogenerator Failures. Working Group A1.10. 2009.

[2] BRASIL, F.S., Desenvolvimento de Sensores Eletromagnéticos para Medição de Descargas Parciais nos Enrolamentos Estatóricos de Hidrogeradores. Tese de Doutorado. Programa de Pósgraduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Pará, Belém, Pará, 2016. 122p.

[3] International Electrotechnical Commission, IEC 60270 Standard, High voltage test techniques – Partial discharge measurements, 2000;

[4] Institute of Electrical and Electronic Engineers, “IEEE Std 1434 Guide to Measurement of Partial Discharge in Rotating Machinery”, USA, 2000.

[5] AMORIM JUNIOR, H. de P.; VILHENA, P. R. M. de; RODRIGUES T. B.; TOMAZ A.; LEVY A.; BRASIL F. de S.; MOREIRA M; EULÁLIO; BRUNO. Medição de Descargas Parciais em Hidrogeradores Experiência na UHE Samuel - Eletronorte. XIV ERIAC – ENCONTRO REGIONAL IBERO-AMERICANO DO CIGRÉ.

[6] KÜCHLER, Andreas. Hochspannungstechnik, Grundlagen, Technologie, Anwendungen, p.226. Springer-VDI, Berlin, 2005.

[7] M. KURRAT – Vortrag. Grundlagen der physikalischen Vorgänge II – Aussere Teilentladungen; Technische Akademie Esslingen 2007.

[8] ALVES, M. P., Caracterização de Padrões de Descargas Parciais em Hidrogeradores Utilizando Técnicas de Inteligência Computacional. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Pará, Belém, Pará, 2015. 121p.

[9] SILVA, M. V. da; SILVA, J. R. P.; SANTOS, M. A. P.; Metodologia e resultados da reforma do gerador da UG#1 da UHE GBM (Foz do Areia). XXIV

SNPTEE – SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, 2017.

[10] W.M. Kawakatsu, “Descargas Parciais em Barras Estatóricas de Hidrogeradores: Modelagem por Guia de Onda e Modelagem de um Acoplador”. Dissertação de Mestrado, Programa de PósGraduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Pará, Belém, Brasil, 2009.

[11] UEMORI, M., ROCHA, J. Fundamentos de Projetos e Reabilitação de Geradores para Centrais Hidrelétricas, Princípios de Manutenção e Reabilitação de Geradores Síncronos. Brasil: 2012.

[12] A. L. M. Rodrigues, Estudo Comparativo de Sistemas de Isolação em Motores de MT, Dissertação, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto - FEUP, Junho, 2010

[13] VILHENA, Paulo Roberto Moutinho de. Sistema para detecção, localização e monitoramento de descargas parciais em estatores de hidrogeradores. 2015. 105 f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia, Belém, 2015. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.

[14] STONE, G.C., BOULTER, E.A., CULBERT, I.,DIRHANI, H., “Electrical Insulation for Rotating Machines”, Wiley Interscience/ IEEE Press, USA, 2004, pp. 01-40.

[15] MARQUES, A.P., SÁ, L.C.R., “Avaliação de Envelhecimento em Barras de Estator de Hidrogeradores”, In: XV SNPTEE – Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Grupo de Estudo de Geração Hidráulica – GGH, Foz do Iguaçu, Brasil, 1999.

[16] VILHENA, P. R. M.; BRASIL F. de S.; DE OLIVEIRA, RODRIGO M.S.; DMITRIEV, V.; MODESTO, J. F. M. Estudo Experimental de Técnicas de Medição de Descargas Parciais nos Enrolamentos do Estator de Hidrogeradores - Validação de um Novo Sensor do Tipo Stator Slot Coupler. In: XIII SEPOPE - Simpósio de Especialistas em Planejamento da Operação e Expansão Elétrica, 2014, Foz do Iguaçu, 2014.

[17] BRASIL F. de S.; VILHENA, P. R. M.; CARVALHO, D. S.; CARVALHO, A. T.; AMORIM JUNIOR, H. de P. Experiência na Monitoração On-Line de Descargas Parciais para Avaliação da Isolação Elétrica dos Enrolamentos Estatóricos de Hidrogeradores. In: XVI Eriac Decimosexto Encuentro Regional Iberoamericano de CIGRÉ, 2015, Puerto Iguazú. Comité de Estudio A1 - Máquinas Eléctricas Rotativas, v. A1-08, 2015.

[18] Coupler installation Guide, installation of: capacitive partial discharge couplers CC14B, CC20B and CC20C, rev. 2.12, Power Diagnostix Systems GmbH, 2011.

[19] BIRLASEKARAN, S. Identification of the type of partial discharges in an operating 16kv/250 mva generator, in Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, p. 559 – 562, 2003.

[20] International Electrotechnical Commission, “Rotating Electrical Machines – Part 27-2: On-line Partial Discharges Measurements on the Stator Winding Insulation of Rotating Electrical Machines”, IEC 60034-27-2, March, 2012.

[21] OLIVEIRA, W., UERMORI, M., ROCHA, J., DIAS, C., “Barras Roebel Versus Bobinas de Múltiplas Espiras: Impactos na Reabilitação de Hidrogeradores”, In: XXI SNPTEE – Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Grupo de Estudo de Geração Hidráulica – GGH, Florianópolis, Brasil, 2011.

[22] GROSS, D. W. Partial Discharge Diagnosis of Motor Defects. Power Diagnostix Systems GmbH Aachen, Germany. Nordic Insulation Symposium Tampere, June 11-13, 2003.

[23] TAYLOR, N. Dielectric Response and Partial Discharge Measurements on Stator Insulation at Varied Low Frequency. Tese de Doutorado, School of Electrical Engineering. Suécia: 2010.

[24] BARTINIKAS, R., “Corona Discharges Processes in Voids”. In: BARTINIKAS, R., MACMAHON, E.J., Engineering Dielectrics: Corona Measurement and Interpretation Vol. I, Chapter 2, Philadelphia, ASTM, 1979, pp. 22-67.

[25] International Electrotechnical Commission, “Rotating Electrical Machines – Part 27-2: On-line Partial Discharges Measurements on the Stator Winding Insulation of Rotating Electrical Machines”, IEC 60034-27-2, March, 2012.

[26] FILHO, R. A. Introdução à Manutenção Centrada na Confiabilidade – MCC. Programa de Atualização Técnica 2008 – Sistema FIRJAN - SESI/SENAI – Rio de Janeiro [On line].

[27] International Electrotechnical Commission, IEC 60034-27, Rotating electrical machines - Part 27: Off-line partial discharge measurements on the stator winding insulation of rotating electrical machines – 2006-12;

[28] HUDON, C.; BELEC, M.: Partial Discharge Signal Interpretation for Generator Diagnostics. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 12, No.2, pp. 297319,2005.

[29] STONE, G. C., WARREN, V. Objective Methods to Interpret Partial-Discharge Data on Rotating Machine Stator Windings. IEEE Transactions on Industry Applications. No 1, Vol. 42, 2006.

[30] NIASAR, M. G. Partial Discharge Signatures of Defects in Insulation Systems Consisting of Oil and Oil-impregnated Paper. Tese de Doutorado, Division of Electromagnetic Engineering, KTH School of Electrical Engineering. Estocolmo, Suécia: 2012.

[31] VILHENA, P. R. M.; BRASIL F. de S.; SANTOS, C. J. S.; SANTOS, M. N. N. Análise do Sistema de Isolamento dos Enrolamentos Estatóricos das Unidades Geradoras da Usina Hidrelétrica Coaracy Nunes, 2015, São José dos Campos. The XI Latin-American Congress Electricity Generation and Transmission - CLAGTEE 2015, 2015.

[32] MODESTO, J. F. M.; DE OLIVEIRA, RODRIGO M. S.; DMITRIEV, V.; VILHENA, P. R. M. Localização de Múltiplas Descargas Parciais em Bobinas de Hidrogerador. Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Brasília/DF. XXII SNPTEE, 2013.

[33] STONE, G.C.; SASIC, M.; DUNN, D.; CULBERT, I. Recent Problems Experienced With Motor and Generation Windings, Copyright Material IEEE, No. PCIC-2009-6, 2009.

[34] Cheim, L, Cuenca, W and Varricchio, S. "A simple Mamdani Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (MANFIS)", manuscrito Submetido à IEEE trans. on Fuzzy System, 1998.

[35] Walter M. Cuenca, Alain F. Levy, José M. Seixas, "Sistema Caracterizador Híbrido para Identificar Descargas Parciais em Transformadores de Potência", Proceedings of the V Brazilian Conference on Neural Networks, pp. 169-174, PUC, Rio de Janeiro - RJ, Brazil, April 2-5, 2001.

[36] INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERS, "IEEE Std 145 Definitions of Term of Antennas", USA, 2014.