

UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAPÁ
PRÓ-REITORIA DE ENSINO DE GRADUAÇÃO
COORDENAÇÃO DE ENSINO DE GRADUAÇÃO
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

Camila Jéssica Sampaio dos Santos

**ANÁLISE DO SISTEMA DE ISOLAMENTO DOS ENROLAMENTOS
ESTATÓRICOS DAS UNIDADES GERADORAS DA USINA
HIDRELETRICA COARACY NUNES, POR MEIO DE UM SISTEMA
DE MONITORAMENTO ONLINE DE DESCARGAS PARCIAIS**

MACAPÁ-AP
2016

UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAPÁ
PRÓ-REITORIA DE ENSINO DE GRADUAÇÃO
COORDENAÇÃO DE ENSINO DE GRADUAÇÃO
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

Camila Jéssica Sampaio dos Santos

**ANÁLISE DO SISTEMA DE ISOLAMENTO DOS ENROLAMENTOS
ESTATÓRICOS DAS UNIDADES GERADORAS DA USINA
HIDRELETRICA COARACY NUNES, POR MEIO DE UM SISTEMA
DE MONITORAMENTO ONLINE DE DESCARGAS PARCIAIS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado a banca examinadora da Universidade Federal do Amapá, Curso de Engenharia Elétrica, sob a orientação da Profa. Me. Michele de Nazaré Novaes Santos, para obtenção do Grau de Engenharia Eletricista.

MACAPÁ-AP
2016

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Biblioteca Central da Universidade Federal do Amapá

620

S237a Santos, Camila Jéssica Sampaio dos.

Análise do sistema de isolamento dos enrolamentos estatóricos das unidades geradoras da usina hidrelétrica Coaracy Nunes, por meio de um sistema de monitoramento online de descargas parciais / Camila Jéssica Sampaio dos Santos; orientador, Michele de Nazaré Novaes Santos. -- Macapá, 2016.

69p.

Trabalho de conclusão de curso (graduação) – Fundação Universidade Federal do Amapá, Coordenação do Curso de Engenharia Elétrica.

1. Engenharia elétrica. 2. Descargas parciais. 3. Hidrogeradores. I.Santos, Michele de Nazaré Novaes, orientador. II. Fundação Universidade Federal do Amapá. III. Título.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por estar presente em todos os momentos, abençoando os meus planos e mostrando o caminho para uma vida cada vez melhor.

A meus pais, Adenair Vera Sampaio dos Santos e Silamar Souza dos Santos, às minhas irmãs e ao meu namorado, que sempre me deram todo apoio necessário ao longo dessa jornada.

A professora Michele de Nazaré Novaes Santos por aceitar ser minha orientadora e ter concedido grande atenção, se dedicando a ajudar no que eu precisasse.

Ao meu supervisor de estágio na empresa Eletrobrás Eletronorte, Paulo Roberto Moutinho de Vilhena, por me supervisionar, sempre disposto a ajudar da melhor forma possível, com muita atenção e paciência.

Agradeço também a todos os professores do colegiado de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Amapá, que contribuíram com o meu aprendizado, sempre disponíveis em ajudar, esclarecendo dúvidas, compartilhando conhecimentos e idéias.

Enfim, a todos aqueles que direta ou indiretamente contribuíram para realização desta graduação, muito obrigada!

“Um passo à frente e você não está mais no mesmo lugar.”

(Chico Science)

RESUMO

Descargas Parciais (DP's) são potenciais fontes de defeitos nos isolamentos elétricos, e sua presença pode ser um forte indicador de um processo que levará à falha total do isolamento, por isso torna-se cada vez mais necessário o uso de técnicas adequadas de medição, monitoramento e diagnóstico do estado dos sistemas de isolamento dos enrolamentos do estator, com a finalidade de melhorar a confiabilidade de hidrogeradores e reduzir o número de paradas não programadas e eventuais. Este trabalho tem como objetivo avaliar a condição do isolamento dos enrolamentos estáticos de hidrogeradores da Usina Hidrelétrica Coaracy Nunes (UHCN), através do sistema de monitoramento *online* de Descargas Parciais que se encontra em uso na Eletrobrás Eletronorte, denominado Instrumentação para Monitoração e Análise de Descargas Parciais (IMA-DP). Será realizado primeiramente um estudo bibliográfico sobre os tipos de Descargas Parciais comuns em máquinas rotativas (hidrogeradores), e logo após será feita uma pesquisa documental dos relatórios de medição, atas de reuniões e relatório final do IMA-DP, possibilitando assim, que seja feita a descrição de todos os componentes deste sistema de monitoramento *online* de Descargas Parciais. Por fim, será apresentado resumo dos principais resultados do monitoramento *online* ao longo do ano de 2014.

Palavras-chaves: Descargas parciais, hidrogeradores, sistema de monitoramento *online*, Manutenção Preditiva.

ABSTRACT

Partial Discharge (PDs) are potential sources of defects in electrical insulation, and its presence can be a strong indicator of a process that will lead to total isolation failure, so more and more necessary becomes the use of appropriate measurement techniques, monitoring and diagnosing the state of insulation of the stator windings systems, in order to improve the reliability of hydro and reduce the number of unscheduled shutdowns and possible. This study aims to assess the insulation condition of stator windings of hydro hydroelectric plant Coaracy Nunes through the *online* monitoring system Partial Discharge which is in use in Eletrobras Eletronorte, called Instrumentation for Monitoring and Discharge Analysis partial. It will be first performed a literature study on types of discharges common Partial in rotating machines (hydro), and soon after a documentary research of measurement reports will be done, minutes of meetings and final report of the IMA-DP, thus enabling it to be made the description of all components of this *online* monitoring system Partial Discharge. Finally, I will be presented the main results of *online* monitoring throughout the year 2014.

Key-words: Partial discharges, hydro, *online* monitoring system, Predictive Maintenance.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Causas raízes de falhas em hidrogeradores.....	13
Figura 2- Causas raízes de falhas em hidrogeradores devido a isolação elétrica	14
Figura 3- Partes de uma máquina rotativa	20
Figura 4- Barras fixadas pelo núcleo do estator	20
Figura 5- Tipos de Barras	21
Figura 6- Transposição Roebel 360°	22
Figura 7- Estrutura do enrolamento imbricado e estrutura do enrolamento ondulado .	22
Figura 8- Corte de uma ranhura com bobinas de múltiplas espiras.....	23
Figura 9- Bobinas de múltiplas espiras.....	23
Figura 10- Seção transversal de uma barra.....	24
Figura 11- Casa de máquinas UHCN	26
Figura 12- Máquinas da UHCN.....	27
Figura 13- As três gerações de evolução da Manutenção.....	30
Figura 14- Homem de Manutenção: Manutenção Preditiva x Manutenção Corretiva .	32
Figura 15- Descargas Parciais em Hidrogeradores.....	33
Figura 16- Gráfico típico de DP	34
Figura 17- Fontes de Descargas Parciais no isolamento do estator.....	35
Figura 18- Descargas Parciais Internas Devido a vazios internos.....	36
Figura 19- Descargas Parciais Internas Devido a delaminação Interna.....	36
Figura 20- Descargas Parciais Internas Devido a delaminação condutor isolante	37

Figura 21- Descargas de ranhura	37
Figura 22- Descargas de Superfície	38
Figura 23- Avaria no estator devido a presença de um parafuso.....	39
Figura 24- Secção transversal de uma barra de um estator	39
Figura 25- Tipos de acopladores capacitivos instalados nos hidrogeradores	44
Figura 26- Instalação do acoplador no barramento de saída do gerador	45
Figura 27- Circuito de medição de DP	46
Figura 28- Diagrama do sistema de monitoração de descargas parciais	47
Figura 29- Tela Inicial do IMA-DP	48
Figura 30- Mapa estatístico do IMA-DP	49
Figura 31- Histograma de Fase do IMA-DP.....	50
Figura 32- Histograma de Amplitude do IMA-DP	50
Figura 33- Histograma disponível na visualização.....	54
Figura 34- Potência Nominal Gerada x Curva de Tendência das DPs	55
Figura 35- Vibração no Mancal Guia da Turbina x Curva de Tendência das DPs	55
Figura 36- Temperatura do Estator x Curva de Tendência das DPs.....	56

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Tipos de falhas causadas nos enrolamentos estatóricos.	25
Tabela 2- Padrões Típicos de Descargas Parciais.....	40
Tabela 3- Descarga Interna Devido a Vazios Internos	52
Tabela 4- Descarga Interna Devido a Delaminação Interna	53

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CEPEL	Centro de Pesquisa de Energia Elétrica
DPs	Descargas Parciais
DP	Descarga Parcial
IEC	Comissão Eletrotécnica Internacional
IMA-DP	Instrumento de Monitoração e Análise de Descargas Parciais
UHCN	Usina Hidrelétrica Coaracy Nunes

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	13
1.1	Considerações Iniciais.....	13
1.2	Objetivos.....	15
1.3	Referencial Teórico.....	15
1.4	Escopo do Trabalho.....	18
2.	MÁQUINAS ROTATIVAS: ENROLAMENTOS ESTATÓRICOS.....	20
2.1	Enrolamentos do Estator.....	20
2.2	Tipos de Enrolamentos Estatóricos.....	21
2.2.1	Barra (meia bobina) ou barras roebel.....	21
2.2.2	Bobinas de múltiplas espiras.....	23
2.3	Isolamento do Enrolamento Estatórico.....	23
2.3.1	Tipos de isolamento do enrolamento estatórico.....	24
2.4	Uma Breve Descrição das Máquinas da UHCN.....	26
3.	MONITORAMENTO DE DESCARGAS PARCIAIS.....	28
3.1	Manutenção.....	28
3.1.1	Evolução da manutenção.....	29
3.1.2	Tipos de manutenção.....	30
3.2	Descargas Parciais.....	33
3.3	Sistema de Monitoramento e Análise.....	39
3.3.1	Mapas estatísticos.....	40

3.3.2 Instrumento de monitoração e análise de descargas parciais (IMA-DP)	43
4. ANÁLISE E RESULTADOS.....	51
4.1 Análise	51
4.2 Principais Resultados	51
4.2.1 Padrões de descargas encontrados.....	52
4.2.2 Correlação das medições de descargas parciais e vibrações mecânicas.....	54
5. CONCLUSÃO.....	57
5.1 Considerações Finais.....	57
5.2 Sugestões Para Trabalhos Futuros	58
5.3 Publicação de Artigo	58
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	59
APÊNDICE A- ARTIGO	62

1. INTRODUÇÃO

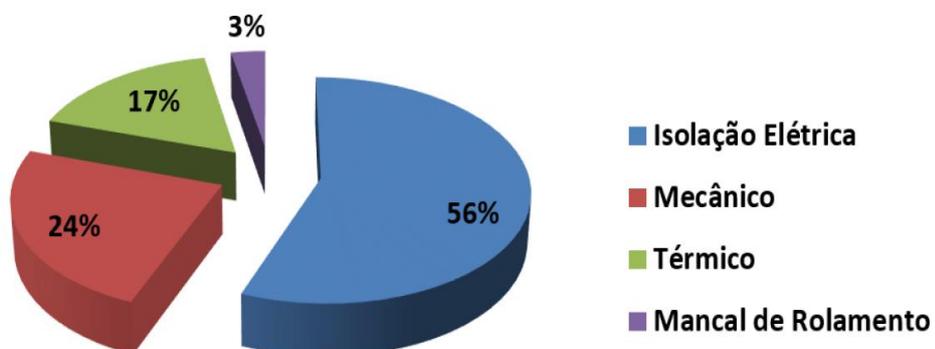
1.1 Considerações Iniciais

Ao longo dos últimos anos, o monitoramento de Descargas Parciais (DPs), transformou-se no principal método para indicar a condição do isolamento elétrico nos enrolamentos do estator dos hidrogeradores, este sistema de monitoramento auxilia a manutenção preditiva, a qual prediz o tempo de vida útil do equipamento e as condições necessárias para que este tempo seja aproveitado; pois através da análise dos sinais e padrões das descargas é possível saber os níveis dos seus pulsos e o que está ocorrendo, possibilitando assim, parar e reparar a máquina antes de perder a sua principal função, ou seja, apresentar uma falha.

Segundo a norma IEC (Comissão Eletrotécnica Internacional) 60034-27-2 (2012), testadores de resistência de isolamento podem ser usados para determinar a integridade de circuitos e cabos em motores, transformadores, geradores, e permitem localizar pontos fracos, porém, apenas as medições de descargas parciais permitem identifica-los, possibilitando a melhora da confiabilidade dos hidrogeradores. Este equipamento de alta tensão representa o item mais oneroso, em uma usina hidrelétrica, portanto, é necessário que ocorra a verificação das suas condições de operação, visando seu melhor funcionamento e evitando as falhas.

Um estudo sobre causas de falhas em hidrogeradores examinou 69 incidentes e concluiu que as principais causas de falhas podem ser categorizadas na seguinte ordem: falhas no sistema de isolamento, defeitos mecânicos, problemas térmicos e por último, falhas devido nos mancais de rolamento (CIGRÉ, 2009). A Figura 1 ilustra essa classificação:

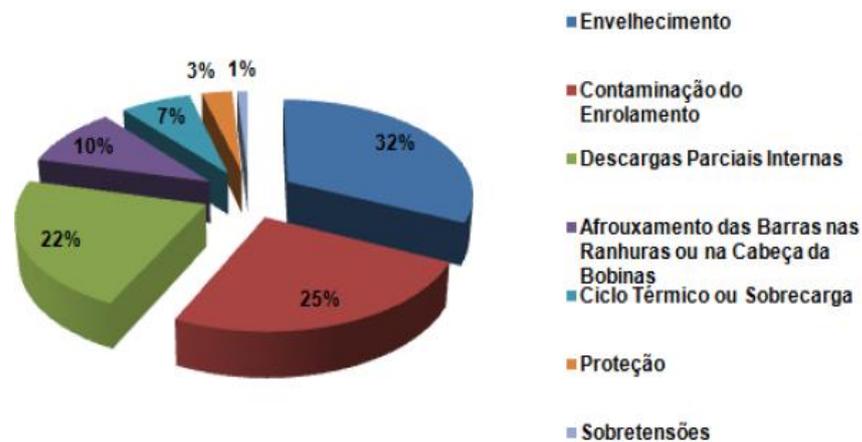
Figura 1- Causas raízes de falhas em hidrogeradores



Fonte: (BRASIL & VILHENA, 2014)

Devido ao resultado significativo, as falhas no sistema de isolamento elétrica foram investigadas com mais detalhes, onde os resultados estão ilustrados na Figura 2. Segundo pesquisa realizada por (STONE *et al*, 2009), dentre as causas raízes de falhas no sistema de isolamento apenas a proteção, sobretensões e afrouxamento das barras nas ranhuras ou na cabeça das bobinas não geravam DPs, ou seja, aproximadamente 90% das causas de falhas na isolamento de hidrogeradores tem como sintoma o aparecimento de Descargas Parciais.

Figura 2- Causas raízes de falhas em hidrogeradores devido a isolamento elétrica



Fonte: (BRASIL & VILHENA, 2014)

Descarga Parcial (DP) é um fenômeno que se manifesta no sistema de isolamento das máquinas rotativas, podendo ser definida como uma descarga elétrica de pequena intensidade, que ocorre em uma região de imperfeição de um meio dielétrico, sujeita a um campo elétrico, onde o caminho formado pela descarga não une as duas extremidades dessa região de forma completa, e por não haver uma ruptura completa, são chamadas “parciais”.

O desenvolvimento progressivo de atividades de descargas parciais é o maior sintoma da deterioração do sistema de isolamento. As descargas também contribuem para o envelhecimento do sistema dielétrico da máquina pela erosão do sistema de isolamento, caracterizando a perda da capacidade de executar a tarefa para que foi projetada e, em consequência redução drástica da vida útil do material isolante. Segundo (BRAULIO & SILVA, 2013) o monitoramento das Descargas Parciais pode auxiliar na determinação do momento ideal para a execução acertiva de uma manutenção básica ou uma completa substituição do gerador que foi diagnosticado em final de vida útil, tal ação, é cada vez mais importante a fim de reduzir custos e de se usar o máximo potencial do investimento.

Pelo exposto, justifica-se a realização deste trabalho, que estuda o fenômeno das Descargas Parciais que ocorrem no sistema de isolamento dos enrolamentos do estator, de cada hidrogerador da Usina Hidrelétrica Coaracy Nunes (UHCN) para se obter o diagnóstico preditivo das máquinas, objetivando aprimorar a confiabilidade, prevenir-se das falhas, evitando assim, as saídas de serviço não programadas, revelando-se eficaz, desde que se obtenha uma análise correta das condições do isolamento.

1.2 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é avaliar os sistemas de isolamento dos enrolamentos estáticos dos hidrogeradores da Usina Hidrelétrica Coaracy Nunes através de um sistema de monitoramento *online* de descargas parciais desenvolvido pelo Centro de Pesquisa de Energia Elétrica (CEPEL) em parceria com a Eletrobrás Eletronorte, denominado Instrumentação para Monitoração e Análise de Descargas Parciais (IMA-DP).

Para se cumprir o objetivo geral, será necessário a realização dos seguintes objetivos específicos:

- Descrever todos os componentes do sistema de monitoramento *online* de Descargas Parciais (IMA-DP), assim como explicar seu funcionamento;
- Analisar os dados, a partir do monitoramento *online*;
- Realizar o diagnóstico do sistema de isolamento;
- Apresentar os principais resultados do monitoramento *online* ao longo do ano de 2014 (período compreendido entre os meses: fevereiro e dezembro);
- Correlacionar grandezas que regem as Descargas;

1.3 Referencial Teórico

A globalização da economia impõe que as empresas tenham um compromisso maior e busquem aperfeiçoar seus produtos e seus processos. Segundo Siqueira (2005), o grande desafio da otimização dos ativos de produção é um processo que envolve a avaliação de funções, tarefas e atividades com o objetivo de conseguir um equilíbrio entre as atividades reativas, preventivas e preditivas para garantir a preservação das funções dos ativos. Através da identificação dos modos de falha dos equipamentos, e das respectivas consequências de falhas, é possível conseguir tal processo.

As organizações revelam que os setores de produção e manutenção são os principais responsáveis pela evolução no mercado, já que ambas, têm a incumbência de manter funcionando e sempre melhorando a infraestrutura produtiva da empresa, e que, os dois setores em conjunto têm como objetivo, entregar os produtos ou serviços no tempo indicado, com a qualidade necessária para satisfação de seus clientes (FUENTES, 2006).

A manutenção tem uma importância vital no funcionamento de uma empresa e cabe a ela zelar pela conservação da mesma, especialmente de máquinas e equipamentos, devendo antecipar-se aos problemas através de um contínuo serviço de observação dos bens a serem mantidos (NEPOMUCENO, 1989).

A escolha da Manutenção Corretiva - manutenção efetuada após a ocorrência de uma falha, destinada a colocar um item em condições de executar uma função requerida (ABNT, 1994) - implica altos custos, pois as quebras inesperadas podem acarretar perdas de produção, perda da qualidade do produto e elevados custos indiretos de manutenção, assim como, pode ocasionar graves consequências para os equipamentos (PINTO & XAVIER, 2001).

Slack *et al.* (2002) afirma que ao optar pela Manutenção Preventiva pode-se reduzir defeitos, impactando em menos ações corretivas, as quais têm valor de custo mais elevado que as ações de prevenção.

Segundo Silva e Gama (2013) a manutenção preditiva garante o aumento da produtividade das máquinas e, conseqüentemente, o aumento da sua disponibilidade; aumento da vida útil dos componentes das máquinas, devido a eliminação das falhas catastróficas; aumento dos lucros operacionais, uma vez que os custos gerais de manutenção impactam diretamente os custos indiretos de produção; redução do tempo de parada das máquinas para manutenção, devido ao planejamento e atuação direcionada à falha em questão; redução do estoque de peças sobressalentes, pois a previsão da falha permite a aquisição das peças conforme necessário, ao invés de comprá-las para reposição do estoque; redução dos custos da manutenção, já que há redução de horas extras, redução de peças e materiais de reparos.

Em Almeida (1988) foi realizado um levantamento de 500 fábricas, que implementaram com sucesso métodos de manutenção preditiva, indicando melhorias substanciais na contabilidade, disponibilidade, e custos operacionais. Realizado pela “Plant Performance Group”, este levantamento foi projetado para quantificar o impacto da inclusão de técnicas de manutenção preditiva como parte chave da filosofia da gerência de manutenção. De acordo com

resultados, as maiores melhorias podem ser obtidas em custos de manutenção, falhas não programadas da máquina, tempo parado para reparo, redução de peças no estoque, melhoria substancial na vida da máquina, segurança do operador e lucro global.

Em (AMAYA *et al*, 2007), obteve-se a implementação de um Sistema de Manutenção Baseado nas Condições dos geradores Para Usina Hidrelétrica de Balbina, a manutenção preditiva baseava-se no monitoramento de algumas variáveis, tais como: óleo e temperatura. A partir deste trabalho, concluiu-se que esse tipo de manutenção facilitou o processo de tomada de decisão, visto que um dos seus objetivos principais é avaliar e monitorar o equipamento para oferecer diagnósticos confiáveis, permitindo dessa maneira que o operador possa tomar decisões de manutenção com base em informações geradas pelo sistema, possibilitando que a manutenção do equipamento possa ocorrer antes que ocorra a falha. Isto implica em ganho de tempo e maior confiabilidade do sistema da usina.

A Manutenção Preditiva reflete a ideia de não mais aceitar simplesmente consertar equipamentos que quebram, mas sim identificar o melhor momento para intervenção, administrando defeitos e prevendo falhas, em sintonia com a produção de forma planejada, visando disponibilidade e segurança. É com essa visão que a Análise de DPs deve ser aplicada (TORLAY *et al*, 2008).

A importância que envolve estes fenômenos de Descargas Parciais em equipamentos de alta tensão motiva os fabricantes e, especialmente, as concessionárias do setor elétrico que lidam com estes equipamentos (geradores) a prestar uma maior atenção em sua prevenção, preservação e também sua administração do tempo de vida útil. Assim, detecção, medição e monitoramento de Descargas Parciais tornou-se amplamente o método mais utilizado para determinação da condição do isolamento elétrico nos enrolamentos do estator, tanto de motores quanto de geradores, pois é uma técnica consagrada para fins de avaliação de desempenho elétrico do seu sistema isolante (STONE, 2005).

Um trabalho realizado por Brasil e Vilhena (2014) obteve o monitoramento de descargas parciais para fins de avaliação de desempenho elétrico do sistema isolante dos hidrogeradores da UHCN, onde constatou que durante medições esporádicas em maio de 2009, o sistema de monitoramento *online* (IMA-DP) indicou a presença de DPs na fase V da unidade Geradora 3, e após o devido reparo o sistema mostrou que os níveis de descargas parciais naquela fase

diminuíram, ficando uniforme nas três fases, concluindo assim, que a monitoração mostrou-se acertiva.

Devido a consequências positivas, vindo do monitoramento das descargas parciais, Torlay (2008) aplicou a técnica de análise de DPs como ferramenta suporte a tomada de decisões de gestão em um motor de indução trifásico, e observou-se que quanto mais comprometido o sistema isolante, maior é a intensidade de descargas, ocorrendo de forma gradual. Assim quando existe um acréscimo acentuado percebe-se logo a existência de problemas e de acordo com as descargas é possível identificar a causa destas. Essa técnica foi decisiva para o correto encaminhamento das ações no motor que culminaram nas corretas decisões no processo, além de ter aproximado setores de manutenção e de gestão.

Enfim, percebe-se que, a importância que envolve os fenômenos de Descargas Parciais em equipamentos de alta tensão (motores e geradores), motiva os fabricantes e, especialmente, as concessionárias do setor elétrico, a prestar uma maior atenção em sua prevenção, preservação e administração do tempo de vida útil, devido ser o equipamento fundamental em uma planta elétrica (CUENCA, 2005).

1.4 Escopo do Trabalho

O corpo desta obra é formado por 5 capítulos, o qual o primeiro apresenta a introdução do trabalho, justificando a sua importância, bem como, aborda os objetivos gerais e específicos, finalizando com a fundamentação teórica.

O segundo capítulo apresenta uma visão geral sobre os enrolamentos do estator, com ênfase nos seus principais modelos existentes, na sua isolação elétrica e nas principais causas de falhas que podem vir a ocorrer.

No terceiro capítulo, será explicitado os principais tipos de manutenção e, as descargas parciais que ocorrem no sistema de isolamento dos enrolamentos do estator. Este capítulo também descreverá o sistema de monitoramento utilizado e por fim, abordará sobre o mapa-estatístico, o qual auxilia no diagnóstico das máquinas.

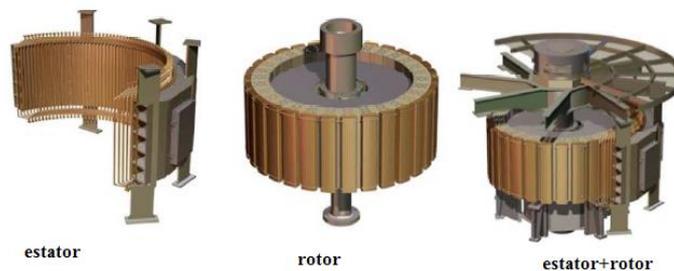
No quarto capítulo será realizado uma análise dos dados resultantes, e posteriormente, o diagnóstico do monitoramento, a fim de apresentar os principais resultados. O quinto e último

capítulo apresentará uma conclusão sobre os resultados obtidos no trabalho, e encerrará com as sugestões para planos futuros.

2. MÁQUINAS ROTATIVAS: ENROLAMENTOS ESTATÓRICOS

Máquinas rotativas possuem basicamente duas partes: uma parte chamada de estator que é fixada ao solo ou a alguma outra superfície e é constituído de um conjunto de condutores (bobinas) fixados por um núcleo aterrado, denominado núcleo do estator; a outra parte é móvel montada sobre um eixo, alojada no interior do estator de forma a permitir sua rotação, chamada rotor. A Figura 3 apresenta uma ilustração destes componentes.

Figura 3- Partes de uma máquina rotativa

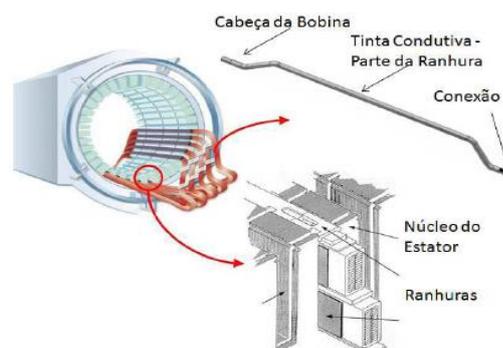


Fonte: (POLUX, 2010)

2.1 Enrolamentos do Estator

A principal função de um enrolamento ou barras do estator é proporcionar um caminho condutor para as correntes induzidas pelo campo magnético rotativo (rotor). Os projetistas de enrolamentos cada vez mais devem se certificar que estão colocando a medida certa de cobre para condução de corrente e mínimo necessário de material isolante na barra ou bobina. Já o núcleo fixa os enrolamentos, dissipa o calor e também concentra o campo magnético. A Figura 4 mostra com mais detalhes as barras fixadas pelo núcleo do estator.

Figura 4- Barras fixadas pelo núcleo do estator



Fonte: (BRASIL, 2013)

2.2 Tipos de Enrolamentos Estatóricos

O tipo do enrolamento depende da potência, fator de potência e facilidade de fabricação, instalação e reparo. Existem dois modelos de barras largamente utilizados nos enrolamentos do estator:

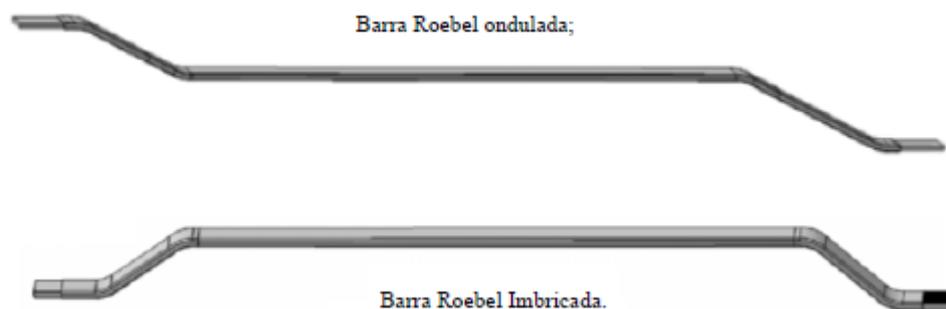
1. Uma barra (meia bobina);
2. Bobina de múltiplas espiras.

A seguir será abordado um pouco mais sobre estes dois tipos de enrolamentos estatóricos.

2.2.1 Barra (meia bobina) ou barras roebel

Em máquinas cujo núcleo é muito longo ou com pequeno diâmetro, onde a montagem com bobina completas é difícil, geralmente utilizam-se barras em duas seções denominadas meia bobinas ou barras Roebel (termo a partir da teoria eletromagnética, pelo tipo de montagem em que a rotação dos condutores internos dentro da barra permite melhor distribuição da corrente pelo efeito da superfície e dissipação de calor) que normalmente são identificadas por sua posição relativa dentro do núcleo como barra superior ou barra inferior. Essas barras são inseridas nas ranhuras e depois conectadas à outra metade, formando a bobina completa. A barra é formada por condutores de cobre isolados individualmente (*strands*) e esse conjunto é coberto por uma isolação externa (*groundwall*) (POLUX, 2010). Essa barra possui dois tipos de projeto, o ondulado e o imbricado, ilustrados na Figura 5, a seguir.

Figura 5- Tipos de Barras

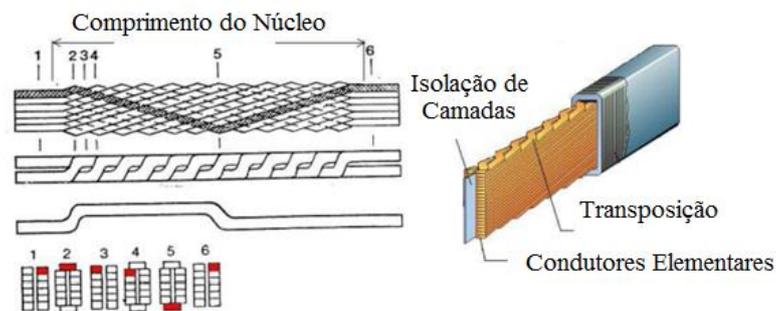


Fonte: (POLUX, 2010)

Esse tipo de barra é composto por condutores transpostos de 360° de acordo com o sistema Roebel, sendo cada fio isolado independente, os quais possuem secção retangular. Este processo de transposição faz com que as perdas por correntes parasitas e pelo efeito Field sejam minimizadas por meio da distribuição homogênea da corrente por toda a seção da barra (SANTOS *et al*, 2010).

A Figura 6 ilustra como todas as posições na barra dentro do comprimento do núcleo, são ocupadas por cada condutor elementar. Por isso, há uma limitação construtiva na confecção dessas barras, imposta pelo comprimento do núcleo estático, pois é necessário um comprimento mínimo dependente do número e dimensões do fio, para completar a transposição de 360°.

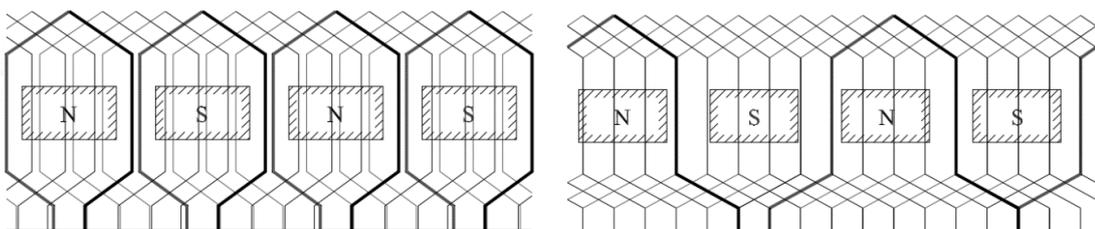
Figura 6- Transposição Roebel 360°



Fonte: (SANTOS *et al*, 2010)

Estes dois tipos básicos de enrolamentos são definidos pela forma com que essas bobinas são ligadas às barras, que podem ser observados na Figura 7. O enrolamento imbricado tem os terminais de suas bobinas ligados a barras vizinhas enquanto no enrolamento ondulado os terminais de suas bobinas estão ligados a barras deslocadas entre si de 360° elétricos, ou seja, dois passos polares.

Figura 7- Estrutura do enrolamento imbricado e estrutura do enrolamento ondulado

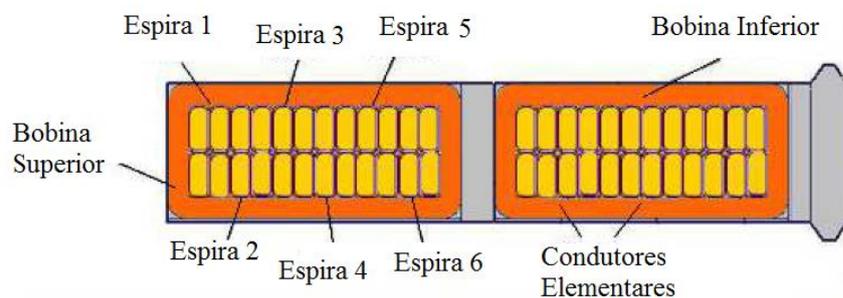


Fonte: (IEC, 2012)

2.2.2 Bobinas de múltiplas espiras

Nas bobinas de múltiplas espiras, cada espira é formada por um conjunto de condutores elementares e cada bobina, conforme necessidade, poderá ter mais de uma espira. A Figura 8 a seguir apresenta o corte da ranhura de um enrolamento de dupla camada formada por bobinas de múltiplas espiras. A bobina da Figura 8 é constituída por seis espiras e cada espira é formada por quatro condutores. A Figura 9 apresenta este tipo de bobina (BRASIL, 2013).

Figura 8- Corte de uma ranhura com bobinas de múltiplas espiras



Fonte: (GROSS, 2003)

Figura 9- Bobinas de múltiplas espiras



Fonte: (POLUX, 2010)

Em função da possibilidade de se alocar mais espiras por bobina, há maior flexibilidade no projeto destes enrolamentos, possibilitando variar o número de ranhuras e circuitos paralelos para se obter a melhor solução.

2.3 Isolamento do Enrolamento Estatórico

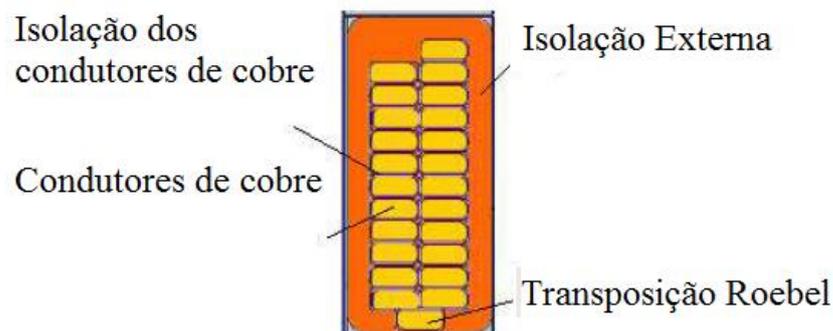
Em um meio de alta tensão do enrolamento do estator a diferença de potencial entre os condutores e o núcleo pode ser de milhares de volts, é necessário separar essas duas superfícies com um material isolante. Os materiais mais comuns utilizados para possibilitar a isolação elétrica são vidro, mica e papel. Todos estes materiais possuem excelentes propriedades de isolação elétrica. Entretanto, suas propriedades mecânicas não são muito boas. O vidro e a mica

tendem a estilhaçar quando submetidos a vibrações entre 100 e 120 Hz, presentes no gerador. Para diminuir o estresse mecânico na isolação, os projetistas escolheram impregnar os materiais utilizados na isolação com um composto orgânico. Os compostos frequentemente utilizados são: asfalto, poliéster e epóxi. O composto utilizado no motor o gerador depende do fabricante do enrolamento e do ano de fabricação.

2.3.1 Tipos de isolamento do enrolamento estático

Há três tipos de isolações em um enrolamento estático: a isolação individual do condutor de cobre (*strand*), a isolação de um grupo de condutores formando uma espira (*turn*), e a isolação externa da bobina ou barra (*groundwall*). Por não existirem espiras, em barras é somente encontradas as isolações *strand* e *groundwall* (SANTOS *et al*, 2010). Conforme será ilustrado na Figura 10:

Figura 10- Seção transversal de uma barra



Fonte: (SANTOS *et al*, 2010)

Na seção transversal da barra mostrada na Figura 10, indica onde estão localizados os tipos de isolações, na qual podem ser observados vários condutores de cobre, e cada um desses pequenos condutores estão isolados individualmente. A falha entre a isolação dos condutores individuais geralmente não apresenta maiores problemas, apenas aumenta as perdas pelo fluxo magnético, mas, se houver centelhamento, pode levar ao dano completo da barra/bobina. Na isolação externa, o propósito é prevenir contra curtos entre os condutores de cobre em alta tensão e o núcleo aterrado. A espessura da isolação externa é dependente exclusivamente da tensão da máquina e do estresse volts/mm definido pelo fabricante. Quanto mais grossa a isolação, menos cobre e maior estresse térmico. Quanto mais fina a isolação, maior estresse de tensão e maior risco de falha. O material básico empregado na isolação externa é a mica, e

impregnado tintas de resinas époxi. Essas resinas fornecem melhor estabilidade mecânica, porém podem sofrer impactos resultantes dos estresses elétricos e térmicos. Essas resinas são denominadas termorrígidas (SANTOS *et al*, 2010).

Apesar de suas excelentes propriedades elétricas, estes materiais poliméricos, empregados em sistemas de isolamento, ficam sujeitos a ação de estresse elétrico, térmico, mecânico ou ambiental quando em operação. A ação individual ou conjunta destes estresses pode levar ao envelhecimento e degradação das propriedades isolantes do material e, em última instância, a falha do equipamento (POLUX, 2010).

Uma falha no isolamento do estator é um caminho de baixa impedância entre os condutores que devem ser isolados uns dos outros, tais como entre espiras, barras, fases, ou entre fase e núcleo. Existem muitos tipos de estresses agindo na isolação dos barramentos estatóricos, e raramente algum deles ocorre sozinho. Esses estresses podem ser de natureza diversa, como elétricos (em função da tensão), mecânicos (vibração), térmicos, químicos, eletromagnéticos e como função do meio ambiente. Quanto mais estresses estiverem presentes, maior a taxa de deterioração da isolação e como sintoma apresentam a presença de descargas parciais com maiores magnitude e frequências.

Na Tabela 1 são apresentados os mecanismos de falha, sintomas, teste de detecção e tipo de máquina, conforme descrito por (STONE *et al*, 2009).

Tabela 1- Tipos de falhas causadas nos enrolamentos estatóricos.

Mecanismo de Falha	Sintomas	Teste de Detecção	Tipo de Máquina
Impregnação Inadequada	DPs	Medição de DPs, tan δ , fator de Potência	Medição de DPs, tan δ , fator de Potência
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 isolação 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 avácuo
Interface de alívio de Tensão	DPs, pó branco	Medição de DPs, tan δ , fator de potência,	Refrigeradas a ar e com pintura na

	(ácido nítrico), ozônio	inspeção visual e monitorar ozônio	interface de alívio de tensão
Espaçamento Inadequado	DPs, pó branco, descoloração da isolação 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, escoloração da isolação	Medição de DPs, tan δ , fator de potência, inspeção visua	Todos os tipos de máquina
Ciclos de carga	DPs, ruptura da isolação na saída da Barra	Medição de DPs, tan δ , fator de potência, inspeção visual, Surge Test, Hipot	Todos os tipos de máquina (com barras longas)

Fonte: (STONE *et al*, 2009).

2.4 Uma Breve Descrição das Máquinas da UHCN

A Usina Hidrelétrica Coaracy Nunes (Figura 11) está implantada no estado do Amapá, no rio Araguari, cerca de 15km a montante da cidade de Ferreira Gomes. O acesso terrestre ao local é feito partindo-se da cidade de Macapá, cerca de 150km, através da rodovia BR-156, totalmente asfaltada. O acesso fluvial é franco desde Santana até Ferreira Gomes, pelo rio Araguari. A Usina opera a fio d'água. As unidades 1 e 2 encontram-se em operação comercial desde novembro de 1975. Porém sua inauguração oficial se deu somente em 13 de janeiro de 1976. A unidade 3 entrou em operação comercial no mês de abril do ano de 2000.

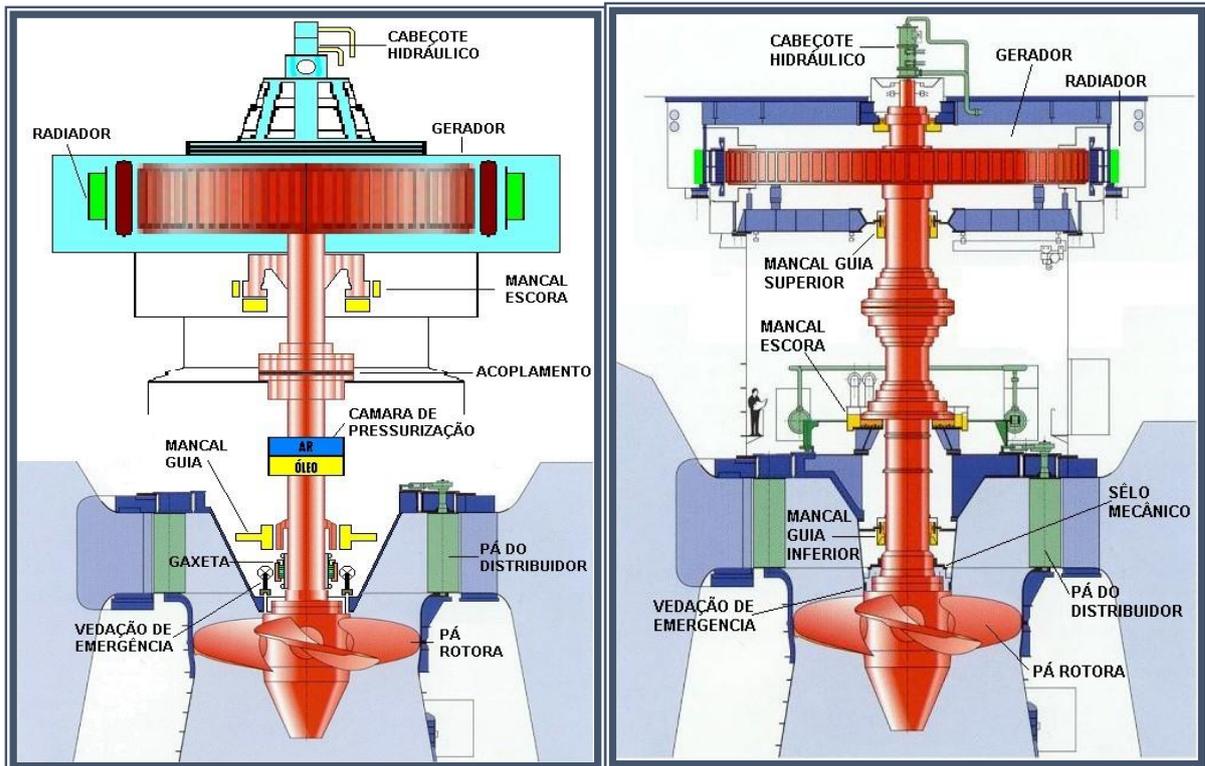
Figura 11- Casa de máquinas UHCN



Fonte: (BRASIL & VILHENA, 2014)

Esta usina em estudo previa originalmente duas unidades geradoras projetadas para gerar 20 MW cada uma. Atualmente, a UHCN possui duas turbinas do tipo Kaplan de eixo vertical - uma turbina dotada de um dispositivo de regulação a qual possibilita que as hélices acompanhem a variação das aletas (Figura 12) - com potencial de 24 MW cada, e uma terceira unidade Kaplan com potencial 30 MW.

Figura 12- Máquinas da UHCN



Fonte: (BRASIL & VILHENA, 2014)

As máquinas 1 e 2 possuem rotação de 138,5 RPM, tensão 13,2 Kv, frequência 60 Hz e número de polos 52. A máquina 3 possui rotação de 150 RPM, tensão 13,2 Kv, frequência 60 Hz e número de polos 48.

Como estas máquinas possuem pontências inferiores a 75 MW, elas são projetadas com bobinas de múltiplas espiras, que são formadas por grupos de condutores de cobre isolados individualmente (strands), montados em conjuntos também isolados denominados espiras (turn), esses conjuntos são montados de modo a formar a bobina em formato de “diamante” e isolados externamente (groundwall).

3. MONITORAMENTO DE DESCARGAS PARCIAIS

No decorrer dos últimos anos o principal método utilizado para determinar a condição do isolamento nos enrolamentos do estator é o monitoramento de Descargas Parciais, quando comparado com outros testes dielétricos, como fator de dissipação ou resistência. Os pontos fracos no sistema de isolamento dos hidrogeradores podem ser localizados e identificados, a partir deste monitoramento, possibilitando assim uma melhora na sua confiabilidade, visto que este equipamento pode ser reparado ou substituído antes da falha.

Este tipo de monitoramento auxilia a manutenção preditiva, que é a manutenção baseada nas condições do equipamento, a qual está complementando as metodologias de manutenção baseada no tempo (Manutenção Preventiva) e as que ocorrem após uma falha (Manutenção Corretiva).

A escolha da técnica de manutenção para cada tipo de equipamento de uma planta de geração de energia elétrica, deve levar em consideração fatores como: importância do equipamento para o processo produtivo, o seu custo de aquisição e a sua taxa de falha; pois a manutenção é fundamental para o funcionamento de um empresa e cabe a ela zelar pela conservação da mesma, especialmente de máquinas e equipamentos.

3.1 Manutenção

A manutenção é o conjunto de técnicas que assegura que os equipamentos e sistemas, continuem a fazer, o que os usuários querem que eles façam. Os operadores (usuários) devem ter conhecimento para operar o equipamento, de forma que consiga extrair o máximo em produtividade, dentro de seus limites operacionais, sem diminuir a vida útil.

Guimarães (2005) entende manutenção como o conjunto de cuidados técnicos indispensáveis ao funcionamento regular e permanente de máquinas, equipamentos, ferramentas e instalações.

A manutenção tem mudado significativamente, e esta mudança vem ganhando força devido ao crescimento das empresas e profissionais ligados aos serviços. Nota-se que tais mudanças ocorreram devido a globalização, procura da redução de custos e a melhoria na qualidade dos serviços, pois, a manutenção sendo uma das principais atividades no processo produtivo, precisa ser um agente proativo.

Atualmente, a manutenção existe para que não haja manutenção, ou seja, a manutenção preditiva – baseada na condição do equipamento – existe para que não haja manutenção corretiva, a qual ocorre após uma falha. Por isso, utiliza-se cada vez mais as técnicas de manutenção preditiva, tais como o monitoramento de descargas parciais, análise de vibração, temperatura, etc. Então, os profissionais da área precisam estar qualificados não apenas para reparar o equipamento, mas reparar da forma mais rápida possível e manter a função do equipamento disponível para operação, reduzindo a probabilidade de uma parada de produção.

3.1.1 Evolução da manutenção

No final do século XIX, após a primeira guerra mundial, houve o início da manutenção industrial com o surgimento da indústria mecanizada, e devido a situação econômica, não se tinha como prioridade a produtividade, então o mecanismo de manutenção era bem simples, apenas limpeza e reparo após uma falha.

A partir dos anos 60, ocorreram mudanças no setor de manutenção, devido ao aumento da demanda, houve uma necessidade de maior disponibilidade das máquinas, para aumentar a produtividade, então, buscou-se evitar as falhas nos equipamentos, adotando a técnica de manutenção preventiva, estabelecendo um tempo fixo para as intervenções em cada máquina. Houve também atualização no setor de informação e surgiram os computadores, os quais foram usados para auxiliar na previsão de falhas, assim, os equipamentos começaram a ser monitorados periodicamente, a fim de prever o fim de vida útil.

A Manutenção Baseada no Tempo ou como é conhecida atualmente, Manutenção Preventiva surgiu devido a real necessidade do desenvolvimento do setor de manutenção, pois começaram a evidenciar-se a necessidade de maior disponibilidade, bem como maior confiabilidade dos equipamentos, a fim de se garantir maior produtividade, (KARDEC & NASCIF, 2004).

E na década de 70, baseada nas mudanças ocorridas na década anterior, a manutenção passa a ser vista como produtiva, a qual visava melhoria nos equipamentos e aprimoramento das habilidades dos trabalhadores. Devido este aumento na produção, houve o crescimento na automação e mecanização o que ocasionava uma maior falha, as quais ocasionam uma perda na qualidade e confiabilidade, e buscando diminuir-las surge então, o conceito de manutenção preditiva, a qual monitora o equipamento, possibilitando um melhor reparo assim como sua maior utilização.

A Figura 13 a seguir representa a evolução da manutenção:

Figura 13- As três gerações de evolução da Manutenção



Fonte: Adaptado de Kardec e Nascif (2004)

3.1.2 Tipos de manutenção

A busca pela competitividade por parte das empresas, permite que a manutenção seja o diferencial, pois visando custos baixos e uma grande produtividade, o setor de manutenção se torna fundamental, e por isso, necessitam de novas ferramentas e técnicas de planejamento. Para Viana (2002) “[...] muitos autores abordam os vários tipos de manutenção possíveis, que nada mais são do que as formas como são encaminhadas as intervenções nos instrumentos de produção”. A manutenção está dividida em três formas mais comuns:

- Manutenção Corretiva – Manutenção após uma falha;
- Manutenção Preventiva – Manutenção baseada do tempo;
- Manutenção Preditiva – Manutenção baseada nas condições do equipamento;

A manutenção corretiva ocorre após um determinado equipamento não ser capaz de desempenhar uma função requerida, destinada a recolocar um item em condições de executar esta função. O principal objetivo deste tipo de manutenção é fazer com que o equipamento volte a executar a sua função principal, porém é reativa, acontece somente após uma falha.

Segundo Zaions (2003), a manutenção corretiva pode ser efetuada por intermédio de conserto das partes que sofreram a falha ou desempenharam funções diferentes daquela esperada, podendo sofrer reparos, alinhamentos, balanceamentos, substituição de peças ou substituição do próprio equipamento.

Em razão da manutenção corretiva ocorrer após uma falha inesperada, tem-se como consequência altos custos, perda de produção e conseqüentemente uma queda na qualidade do produto. E apresenta um tempo de reparo demorado, pois deve-se primeiramente encontrar o motivo e o local da falha, para então fazer-se o reparo, contando ainda com a incerteza da presença de materiais sobressalente.

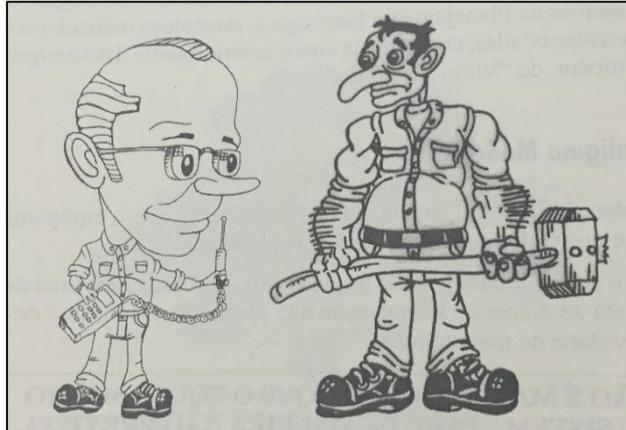
Devido aos altos custos, a partir da manutenção corretiva, deu-se início a Manutenção Preventiva, que pode ser definida como a manutenção efetuada em intervalos predeterminados ou de acordo com critérios prescritos, destinada a reduzir a probabilidade de falha ou a degradação do funcionamento de um item.

Segundo Zaions (2003) a manutenção preventiva apresenta algumas vantagens, como a continuidade do funcionamento do equipamento, só parando para consertos em horas programadas; outra grande vantagem é a continuidade da produção uma vez, que seus equipamentos estabelecem um grau de confiabilidade elevado, tornando possível ocasionar à empresa a realização de metas no prazo de entrega e na qualidade necessária. Para Takahashi e Osada (1993) “na política preventiva, as trocas de componentes possuem um prazo fixo, ou seja, são baseadas no tempo de uso ou números de ciclos do equipamento”.

Este tipo de Manutenção objetiva reparar, lubrificar, ajustar e recondicionar os equipamento. O período de reparo é baseado em históricos de quebras em funcionamento. A proposta principal é diminuir e/ou evitar as falhas, assim como a queda da produção, comparada com a Manutenção Corretiva.

A partir da mudança de paradigma sobre manutenção (Figura 14), onde primeiramente, havia uma boa manutenção quando ocorria um bom reparo, porém atualmente, a manutenção é eficaz quando consegue evitar falhas. Baseado nesta busca pela diminuição das falhas, e visando uma maior confiabilidade dos equipamentos, dá-se início a Manutenção Preditiva, manutenção que acompanha os equipamentos periodicamente, a partir de dados coletados e utilizando sistemas de monitoramento, indicando as reais condições de funcionamento, o que possibilita prever uma falha com antecedência, predizendo a necessidade de reparo.

Figura 14- Homem de Manutenção: Manutenção Preditiva x Manutenção Corretiva



Fonte: (BARONI *et al*, 2002)

Para Zaions (2003), a manutenção preditiva é o conceito moderno de manutenção não invasiva em que se acompanha o comportamento de determinados elementos do equipamento ou identifica-se um componente com desempenho diferente do esperado. Uma vez constatada a anomalia, realiza-se a manutenção. A manutenção preditiva será tanto mais eficiente quanto mais rapidamente forem detectadas as variações dos parâmetros.

Em (BARONI *et al*, 2002) define-se manutenção preditiva como “qualquer atividade de monitoramento que seja capaz de fornecer dados suficientes para uma análise de tendências, emissão de diagnóstico e a tomada de decisão”, e é com essa visão que o Monitoramento de descargas parciais deve ser aplicado.

A partir destes conceitos, pode-se concluir que a escolha da manutenção preditiva para equipamentos, como, os hidrogeradores, é de suma importância, visto que ao aplicar a manutenção preventiva, tem-se como problema que, o tempo médio pode não ser sempre assertivo, resultando em uma manutenção para um reparo desnecessário ou uma manutenção para uma falha catastrófica.

Por exemplo, na Usina Hidrelétrica de Coaracy Nunes, tem-se um tempo de médio de manutenção para cada máquina, de 6 meses, porém, pode acontecer destas máquinas não precisarem ser reparadas, assim, a mão de obra e o material usado durante a manutenção foram desperdiçados. Outro exemplo ainda mais caro: caso o hidrogerador pare devido a uma falha antes dos 6 meses, então, consertaria-se usando técnicas de manutenção corretivas, as quais implicam altos custos.

Por isso, cada vez mais, utiliza-se a manutenção preditiva, onde é possível intervir antes da falha catastrófica, a partir da análise de parâmetros como: a análise de Descargas Parciais.

3.2 Descargas Parciais

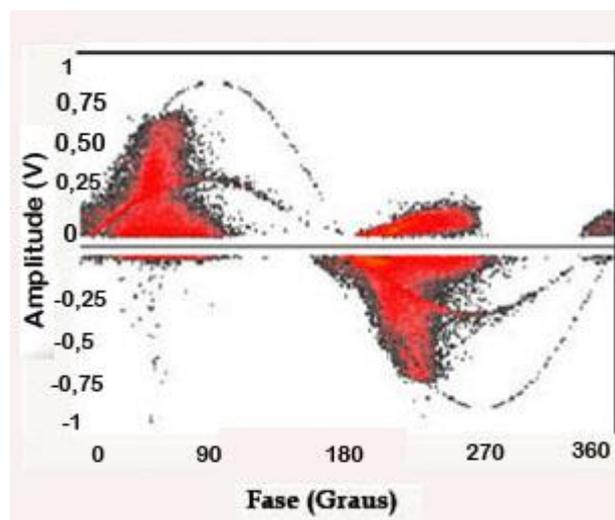
Descargas parciais são pequenos arcos ou fagulhas elétricas que ocorrem em cavidades preenchidas de ar dentro ou adjacentes à isolação elétrica submetida a alta tensão, devido ao rompimento localizado na rigidez dielétrica. Uma descarga parcial é uma descarga elétrica localizada, ou seja, que não chega a percorrer o caminho dentro de um material isolante colocado entre dois eletrodos (IEC 60034-27-2, 2012).

As descargas são produzidas devido ionização de pequenas cavidades de ar no interior do dielétrico sólido. Nos dielétricos líquidos ocorrem devido a ionização de bolhas de gás no seu interior e no caso do ar pela ionização das moléculas de ar que se encontram nos pontos de maior gradiente de potencial.

As Descargas Parciais ocorrem em regiões definidas e não chegam a completar um circuito fechado (curto-circuito). São também consideradas rápidas pelo fato de ocorrerem em períodos curtíssimos de tempo, ao comparar-se com o período da tensão de teste (1/60 segundos).

A Figura 15 apresenta um Padrão Típico de Descarga Parcial em uma barra estatórica de um gerador.

Figura 15- Descargas Parciais em Hidrogeradores

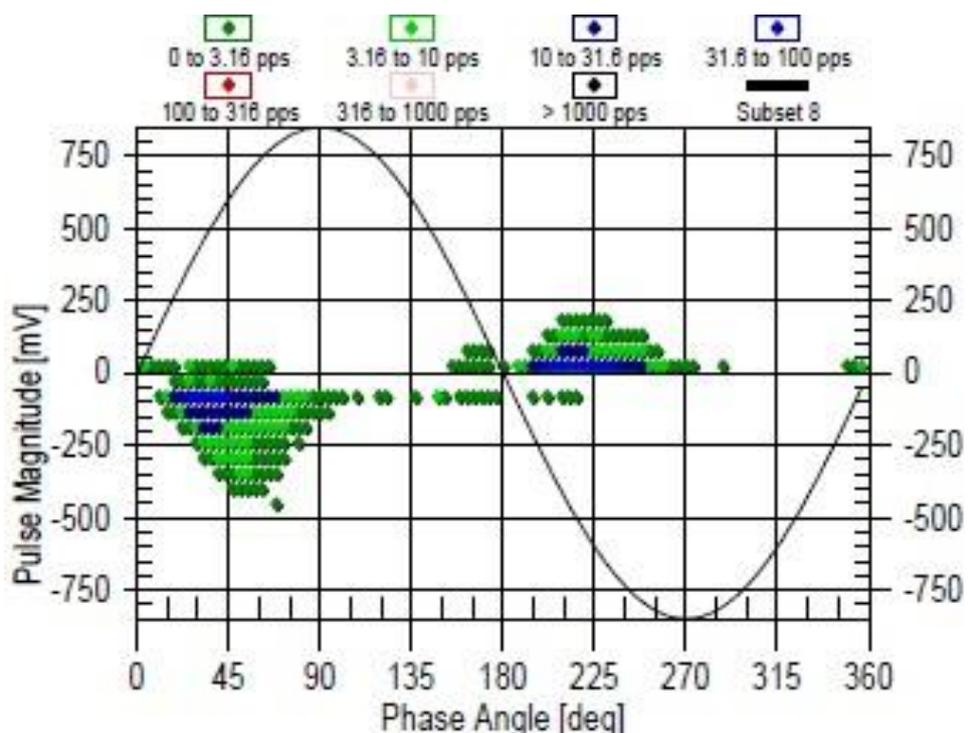


Fonte: Adaptado de (GROSS, 2003)

As Descargas Parciais podem produzir pulsos de correntes, luminescência, ondas eletromagnéticas, ondas acústicas, consumo de energia, variações térmicas, variações químicas, vibrações mecânicas, etc. O principal método utilizado para medição de Descargas Parciais, é o método elétrico, o qual insere o circuito de medição e detecção no circuito onde as descargas não ocorrem.

Dados de Descarga Parcial tal como acontece com a maioria dos sistemas de medição de DP, o número, a magnitude, e a posição de fase com relação ao ciclo de 50 ou 60 Hz de corrente alternada são registrados, uma vez que os pulsos de DP são separados dos pulsos de ruído. A Figura 16 mostra um gráfico típico de DP a partir de uma fase de um enrolamento do estator do motor. A magnitude do pulso é medida em termos absolutos, unidades de milivolts (mV). A partir de cada teste, dois indicadores de síntese são extraídos, representando todos os pulsos de DPs que foram coletados. Os picos positivos e negativos de magnitudes DP (+ Qm e -Qm) representam os mais elevados pulsos medidos de DP em mV com uma taxa mínima de repetição DP de 10 pulsos por segundo. Qm é um preditor razoável da condição de isolamento do estator. Uma alta Qm medida num enrolamento em comparação com uma menor Qm em outros enrolamentos, geralmente implica que o enrolamento é mais deteriorado (STONE & WARREN, 2005).

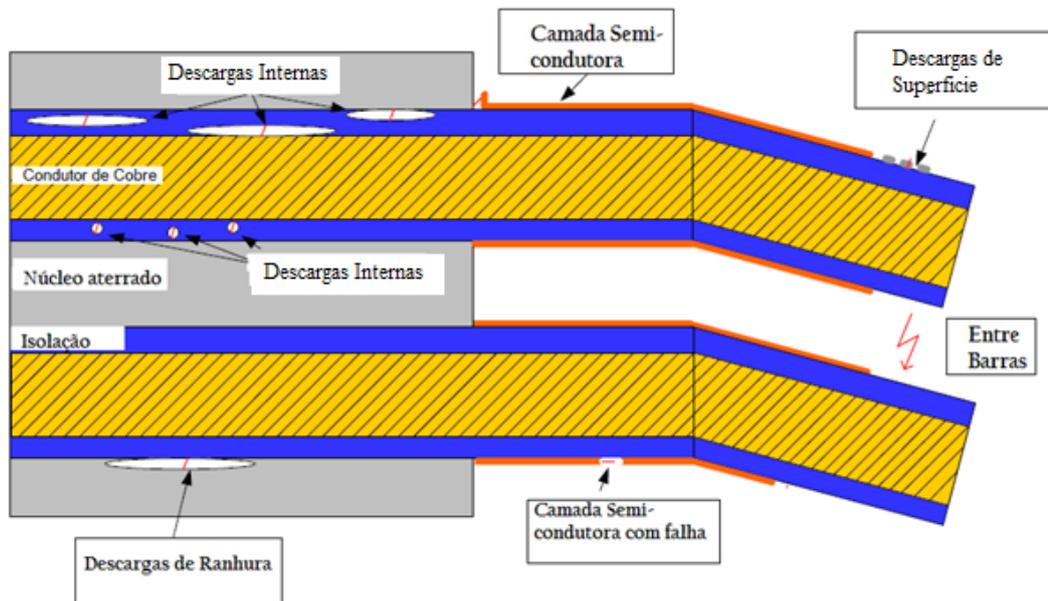
Figura 16- Gráfico típico de DP



Fonte: (STONE & WARREN, 2005)

A bobina do estator (Figura 24) de uma máquina rotativa, apresenta as atividades de DP, em condições diferentes. Cada localização da atividade de DP tem uma configuração específica com diferentes materiais envolvidos. Segundo a norma IEC 60034-27-2 (2012), Adaptado de (BRASIL, 2013) as fontes de DPs em hidrogeradores são classificadas nos seguintes grupos (Figura 17):

Figura 17- Fontes de Descargas Parciais no isolamento do estator

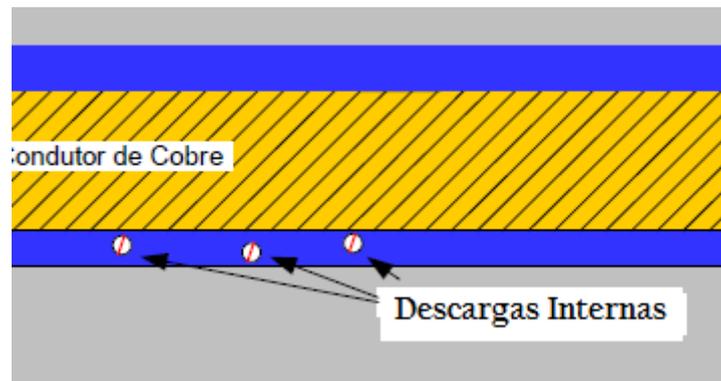


Fonte: (BRASIL, 2013)

Descargas Internas

As descargas internas podem ocorrer quando não há eliminação completa das cavidades internas nos processos de fabricação (Figura 18), mesmo que sejam projetados para minimizá-las. Por exemplo, sistema de isolação composto de folhas de mica, tecido de fibra de vidro impregnado com uma resina sintética, que é comumente utilizado em máquinas rotativas de alta tensão. A mica presente no sistema de isolação impede que as descargas parciais evoluam e causem o rompimento completo do dielétrico. A confiabilidade do material não será comprometida se as cavidades internas forem pequenas e não aumentarem significativamente.

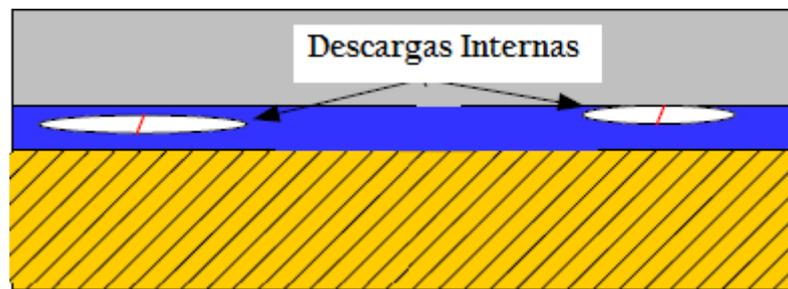
Figura 18- Descargas Parciais Internas Devido a vazios internos



Fonte: Adaptado de (BRASIL, 2013)

A delaminação interna do isolamento do estator pode ser causada durante a fabricação por imperfeições do sistema de isolamento, ou devido ao sobreaquecimento das bobinas, onde à medida que o sistema de isolamento é exposto continuamente a esse sobreaquecimento, as resinas orgânicas tendem a perder sua rigidez mecânica, provocando um fenômeno conhecido como delaminação das camadas. Os condutores internos de cobre ficam livres para vibrar, quando ocorre a delaminação das camadas da isolamento, e então ocorrem descargas parciais de alta energia (Figura 19) que podem comprometer significativamente a isolamento.

Figura 19- Descargas Parciais Internas Devido a delaminação Interna



Fonte: Adaptado de (BRASIL, 2013)

O ciclo térmico pode causar delaminação na interface do condutor e a isolamento principal, no qual pode resultar em descargas parciais (Figura 20), que rapidamente podem causar relativa falha especialmente em bobinas de múltiplas espiras.

Figura 20- Descargas Parciais Internas Devido a delaminação condutor isolante



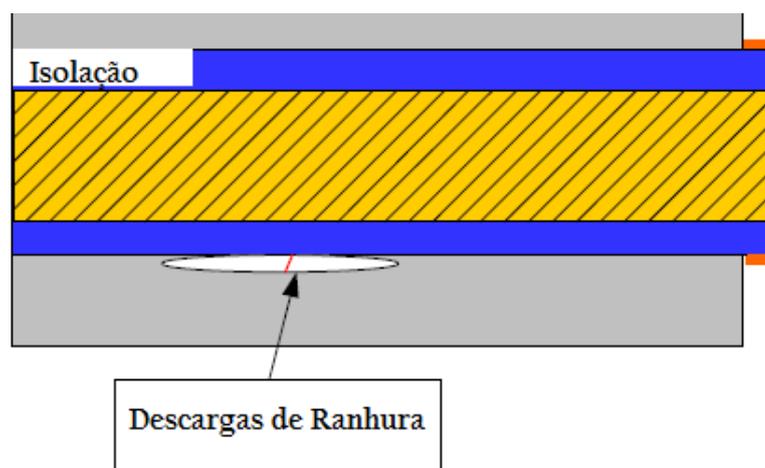
Fonte: Adaptado de (BRASIL, 2013)

Arborescência elétrica em isolamento da máquina é um processo de envelhecimento em que finos canais de erosão se propagam através do epóxi ao redor das barreiras de mica e podem levar a falha elétrica do isolamento principal. Este processo está associado com a atividade de descarga parcial interna.

Descargas de Ranhuras

A superfície da bobina é aterrada ao núcleo estátorico com uma cobertura de pintura ou fita condutiva de baixa resistência no interior da ranhura. Devido aos estresses elétricos e térmicos, essa interface pode deteriorar provocando a perda de contato entre a superfície condutiva na bobina e o núcleo, propiciando o aparecimento de descargas de alta tensão entre a barra em alto potencial e a ranhura aterrada. O fenômeno é conhecido como descarga na ranhura (Figura 21).

Figura 21- Descargas de ranhura



Fonte: Adaptado de (BRASIL, 2013)

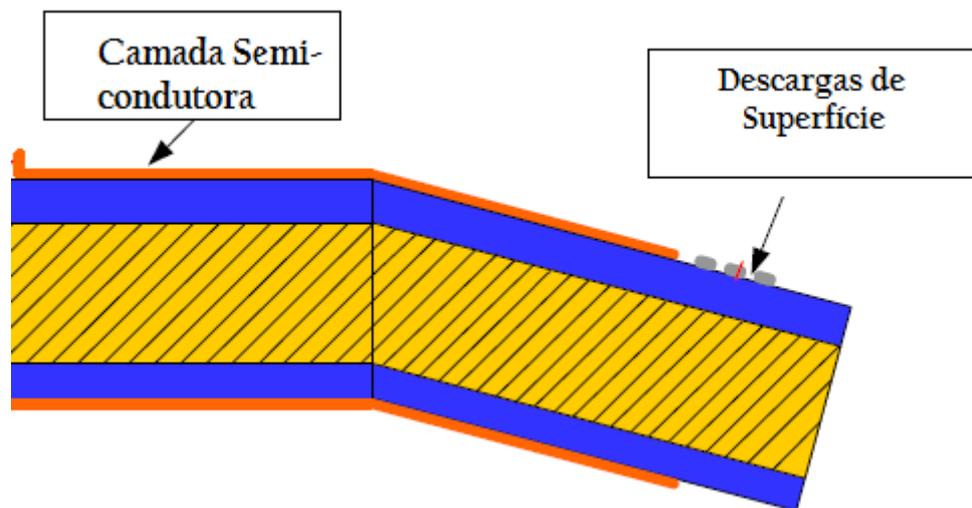
O tempo absoluto entre a detecção deste fenômeno e a falha total da isolação é geralmente desconhecido. Porém, em comparação com outros efeitos típicos de deterioração este tempo pode ser relativamente curto, especialmente na presença de vibrações da barra ou

bobina. Portanto, torna-se necessário a detecção confiável em um estágio inicial para decidir as ações de manutenção a serem tomadas.

Descargas na Cabeça da Bobina

Descargas corona (Figura 22) ocorrem no ar em função da alta concentração do campo elétrico nas extremidades do enrolamento estático, sobre a superfície externa do isolamento. Tais descargas, se não controladas ou evitadas, danificam a superfície do isolamento e produzem ozônio, podendo levar a máquina a uma falha prematura. Descargas corona normalmente ocorrem nas interfaces entre diferentes elementos da cabeça da bobina dos enrolamentos.

Figura 22- Descargas de Superfície



Fonte: Adaptado de (BRASIL, 2013)

Descargas superficiais ocorrem em gases ou líquidos na superfície de um material dielétrico, normalmente partindo do eletrodo para a superfície. O processo de descarga superficial inicia, quando a componente de campo elétrico que tangencia a superfície ultrapassa certo valor crítico. Descargas superficiais causam alterações na superfície do dielétrico, iniciando caminhos condutores que se propagam ao longo da direção do campo elétrico. Este trilhamento pode levar à ruptura completa da isolação.

Descargas parciais podem ocorrer entre fases, por exemplo, devido a inadequada distância de isolamento entre fases ou utilização de sistemas suporte da cabeça da bobina inadequado. Dependendo do projeto essas descargas podem ter magnitudes elevadas e podem

ocorrer como descargas de superfícies ou descargas internas. Descargas entre fases podem resultar em uma falha fase-fase.

Descargas por Partículas Conduativas

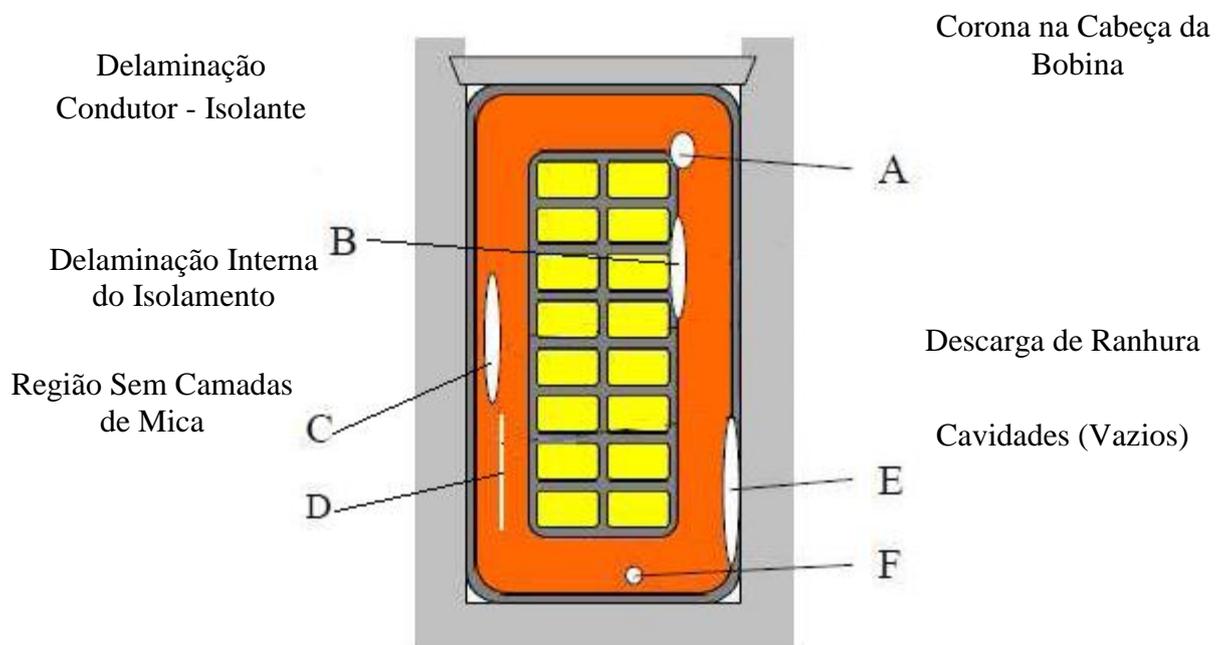
A presença de partículas condutivas, em particular as pequenas partículas, por exemplo, devido à contaminação do enrolamento podem ocasionar uma forte concentração de descargas parciais. Isso pode danificar a isolação do estator (Figura 23).

Figura 23- Avaria no estator devido a presença de um parafuso



Fonte: (BRASIL, 2013)

Figura 24- Secção transversal de uma barra de um estator



Fonte: (GROSS, 2003)

3.3 Sistema de Monitoramento e Análise

Desde 2009 vinha se trabalhando no sentido de se implantar a monitoração de Descargas Parciais nas unidades geradoras desta usina, os primeiros trabalhos tiveram início através de medições esporádicas realizadas em conjunto com Centro de Pesquisas de Energia Elétrica - Eletrobrás Cepel até a instalação definitiva em todas as máquinas, em 2013, de todo o sistema de monitoração de DPs, o *software* utilizado para medição foi o IMA-DP (Instrumentação para Monitoração e Análise de Descargas Parciais), desenvolvido em parceria Eletronorte e Cepel, o qual pode ser aplicável a qualquer equipamento de alta tensão que possua sistema de isolamento e pontos de acoplamento.

O IMA-DP adota o método de monitoramento *online* de descargas parciais, e a máquina é ligada ao sistema de energia, onde interferências elétricas (ruídos) estão muitas vezes presentes, por isso dados de DP, o número, a magnitude, e a posição de fase com relação ao ciclo de 60 Hz de corrente alternada são registrados, uma vez que os pulsos de DP são separados dos pulsos de ruído. Esses dados são fundamentais para originarem o Mapa-estatístico, o qual é utilizado pelo profissional da área, para a realização do diagnóstico.

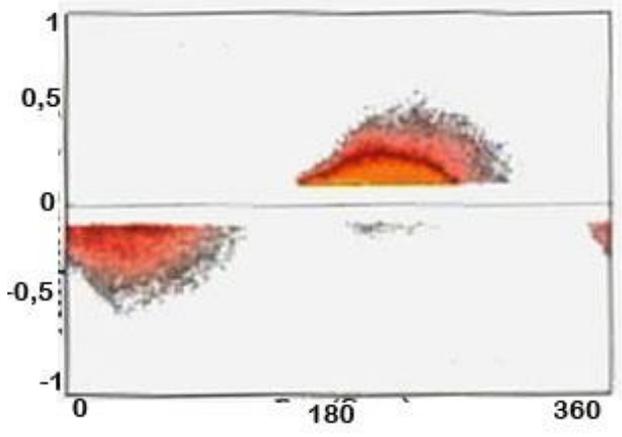
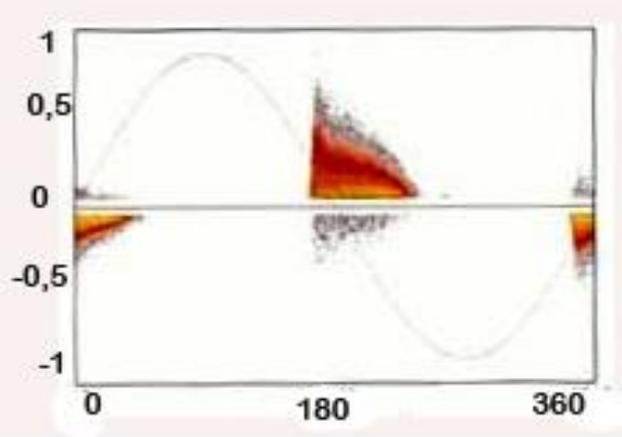
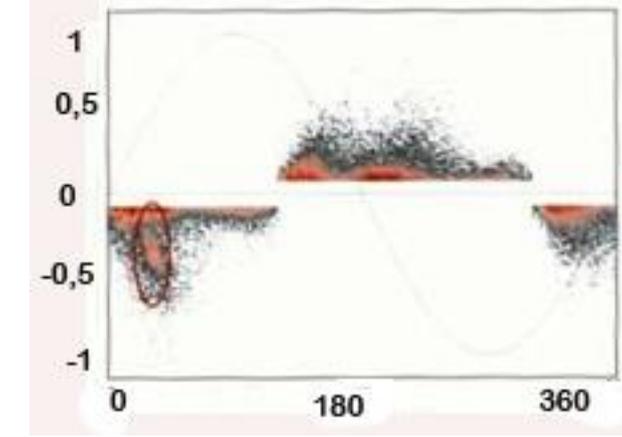
3.3.1 Mapas estatísticos

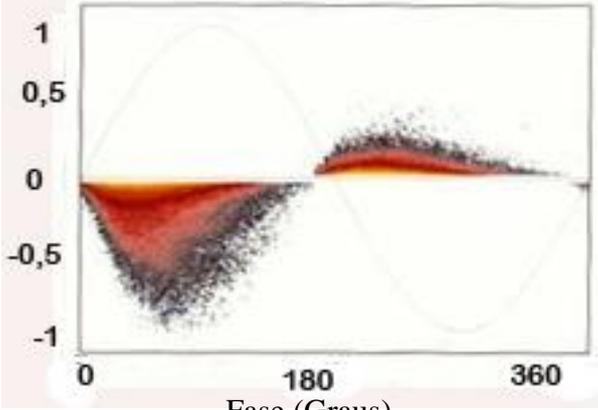
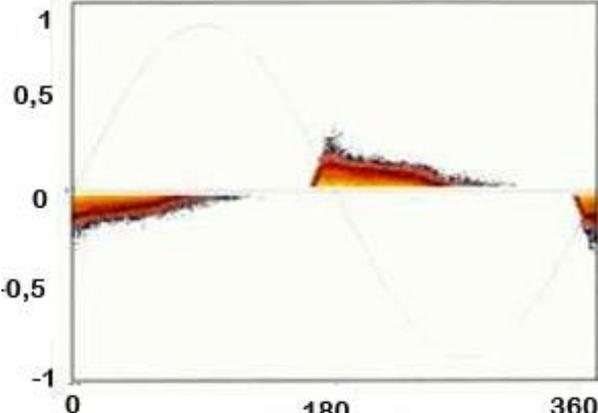
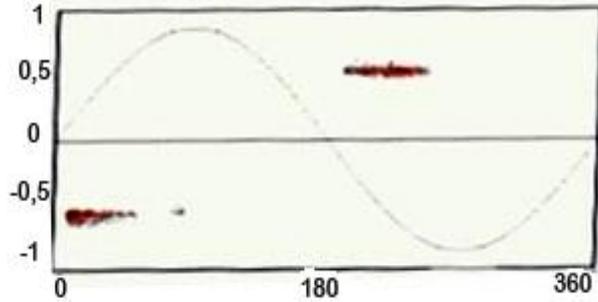
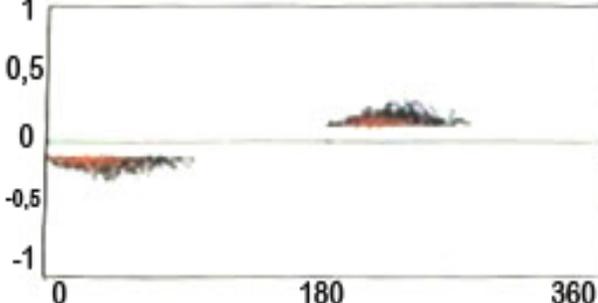
A quantidade de pulsos originados pelas Descargas Parciais ao longo das medições é alta, desta forma, armazenar todos esses dados seria imprudente, do ponto de vista computacional. Para o software utilizado (IMA-DP), foi estabelecido o mapa estatístico representativo das DPs. São armazenadas as seguintes grandezas no mapa estatístico: No eixo y encontra-se a Amplitude da Descargas (mV), no eixo x o ângulo da tensão com relação ao sinal de referência de 60 Hz e no eixo z o número de ocorrência das Descargas.

A partir da medição dos sinais de descargas parciais pode-se observar vários tipos de descargas, e assim sua localização, através do mapa estatístico. A Tabela 2 demonstra alguns exemplos de padrões de DPs que normalmente podem ser encontrados para defeitos em sistemas de isolamento.

Tabela 2- Padrões Típicos de Descargas Parciais

Mapa Estatístico	Tipo de Descargas
------------------	-------------------

 <p>A scatter plot showing data points in a 2D space. The x-axis ranges from 0 to 360 with major ticks at 0, 180, and 360. The y-axis ranges from -1 to 1 with major ticks at -1, -0,5, 0, 0,5, and 1. The data points are clustered into three main regions: a large cluster in the upper right quadrant (positive x, positive y), a smaller cluster in the lower left quadrant (positive x, negative y), and a very small cluster near the origin (0, 0).</p>	Descarga Corona
 <p>A scatter plot showing data points in a 2D space. The x-axis ranges from 0 to 360 with major ticks at 0, 180, and 360. The y-axis ranges from -1 to 1 with major ticks at -1, -0,5, 0, 0,5, and 1. The data points are clustered into three main regions: a large cluster in the upper right quadrant (positive x, positive y), a smaller cluster in the lower left quadrant (positive x, negative y), and a very small cluster near the origin (0, 0). A smooth curve is overlaid on the plot, starting at (0,0), peaking at approximately (90, 0.9), crossing the x-axis at approximately (270, 0), and reaching a minimum at approximately (180, -0.9).</p>	Descarga de Ranhura
 <p>A scatter plot showing data points in a 2D space. The x-axis ranges from 0 to 360 with major ticks at 0, 180, and 360. The y-axis ranges from -1 to 1 with major ticks at -1, -0,5, 0, 0,5, and 1. The data points are clustered into three main regions: a large cluster in the upper right quadrant (positive x, positive y), a smaller cluster in the lower left quadrant (positive x, negative y), and a very small cluster near the origin (0, 0). A smooth curve is overlaid on the plot, starting at (0,0), peaking at approximately (90, 0.9), crossing the x-axis at approximately (270, 0), and reaching a minimum at approximately (180, -0.9).</p>	Descarga de Superficie

	<p>Descarga Interna devido a delaminação entre o condutor e a isolamento</p>
	<p>Descarga Interna devido a delaminação interna</p>
	<p>Descarga tipo Gap</p>
	<p>Descargas Internas devido a vazios internos</p>

Fonte: Adaptada de (IEC 60034-27-2, 2012)

3.3.2 Instrumento de monitoração e análise de descargas parciais (IMA-DP)

A partir da manutenção preditiva, a UHCN pode reduzir seus gastos com manutenção enquanto aumenta o tempo de operação e a confiabilidade do seu sistema elétrico. Através do IMA-DP, pode-se verificar a condição relativa de isolamento do estator, cuja deterioração constitui uma das principais causas de falhas dos geradores.

Apesar do conhecimento da existência de DPs, é necessário saber como é possível detectá-la e posteriormente monitorá-la. O método mais comum para avaliar a condição do isolamento do enrolamento do estator é o método elétrico de medição de descargas, que pode ser feito utilizando os sensores de DPs detectando as componentes dos sinais do pulso.

A partir do método elétrico as medições de DP no enrolamento do estator podem ser divididas em dois grandes grupos: medições *offline* e medições *online*. Medições *offline*, o enrolamento do estator é isolado do sistema de potência e uma fonte de tensão independente é empregada para energizar o enrolamento. Medições *online*, a máquina está operando interligada ao sistema de potência.

As principais diferenças entre as medições *online* e *offline* são devidas a uma diferente distribuição da tensão ao longo do enrolamento e vários efeitos térmicos e mecânicos relacionados com a operação, tal como vibração, gradientes de temperatura entre o cobre do estator e do núcleo de ferro. Além disso, especialmente para máquinas refrigeradas a hidrogênio, o gás e a pressão do gás são diferentes para medições de DP *offline* e *online*.

Este trabalho é voltado para medições de DP *online*, pois são realizadas com a máquina submetida a condições reais de operação, ou seja, considera-se as condições reais de temperatura, eletricidade, ambiente e mecânica, pois os testes são realizados com a mesma tensão, temperatura e forças mecânicas de operação da máquina.

Os primeiros métodos para medição dos pulsos de correntes de DP eram realizados por meio de uma corrente de alta frequência no neutro do transformador, mas hoje a maioria das máquinas ao redor do mundo utilizam capacitores de alta tensão (80 pF, 220pF, 500pF) para medir DP, ver Figura 25.

Figura 25- Tipos de acopladores capacitivos instalados nos hidrogeradores

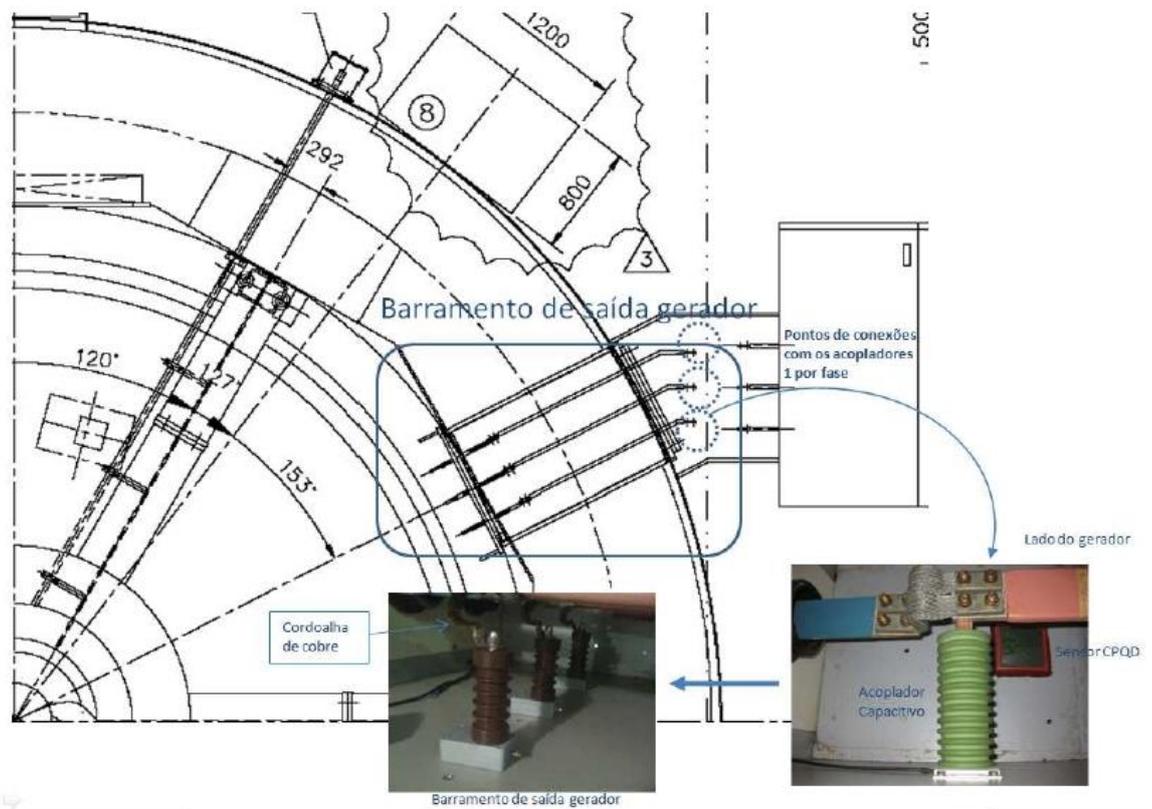


Fonte: (BRASIL & VILHENA, 2014)

Os sinais de descargas parciais são, portanto, medidos a partir de capacitores de acoplamento conectados em pontos pré-definidos ao longo dos circuitos das fases do enrolamento estático. Conforme as características do gerador e a filosofia de medição podem ser instalados diversos acopladores por circuito. Não existe uma forma precisa utilizada para definir o número exato de acopladores necessário a cada instalação.

O capacitor de acoplamento funciona como um filtro passa alta quando conectado ao enrolamento do estator, e fazendo uma terminação com um resistor, que pode variar de 500 até 2000 Ω . A configuração utilizada na UHE Coaracy Nunes consiste em um acoplador de 220 pF com uma resistência de 2000 Ω . Esta configuração apresenta uma frequência sinais abaixo desta frequência serão significativamente atenuados. A Figura 26 a seguir apresenta os acopladores instalados no barramento de saída do gerador.

Figura 26- Instalação do acoplador no barramento de saída do gerador

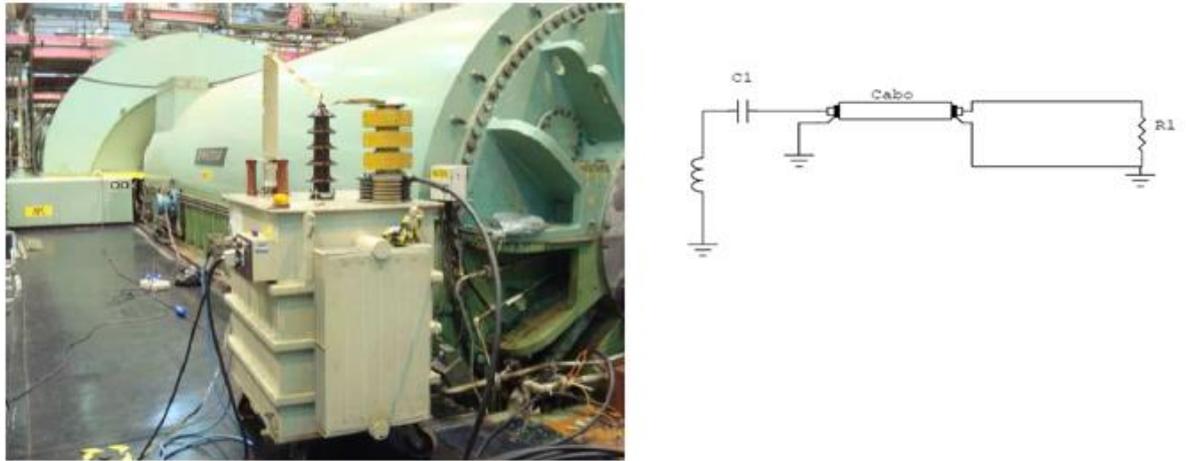


Fonte: (BRASIL & VILHENA, 2014)

Na Figura 27 ilustra-se um circuito de medição para um único acoplador instalado em uma fase. No lado de baixa tensão de cada capacitor, ou seja, em sua blindagem é conectado um cabo de medição que encaminha o sinal de corrente das DP's até uma caixa de terminais localizada na parte externa do gerador. Nessa caixa de terminais há um resistor em paralelo no valor de cerca de 2000Ω para cada cabo coaxial vindo de cada acoplador.

A partir dessa caixa de terminais são lançados os cabos até a entrada do sistema de monitoramento montado em um rack padrão 19".

Figura 27- Circuito de medição de DP



Fonte: (CEPEL, 2015)

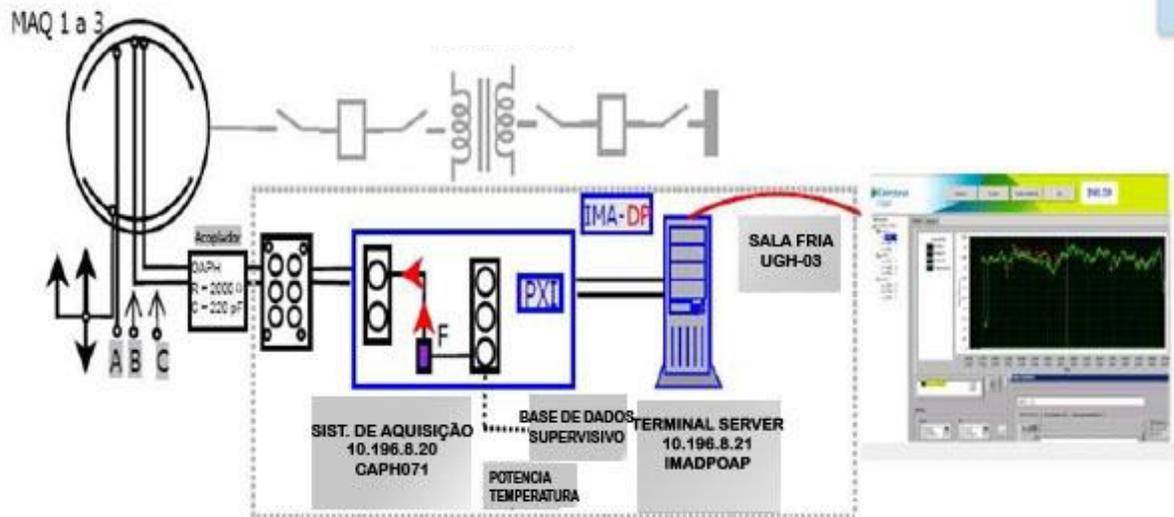
Segundo (CEPEL, 2015) e (LEVY, 2007), a instrumentação proposta pelo sistema foi desenvolvida numa plataforma comercial PXI de tal maneira que se pudesse desenvolver um produto o mais aberto possível obedecendo a critérios tais como:

- Montagem de *hardware* modular de tal forma que seja mais fácil de atualizar o sistema e envolver custos menores de manutenção ao longo dos anos;
- Facilidade de desenvolvimento de software, separando-se os desenvolvimentos dos processos de aquisição dos processos de armazenamento, análise e ferramentas de diagnóstico;
- Redução de custo de instalação posto que um sistema pode atender várias Máquinas, no caso da usina de Coaracy Nunes atende as três unidades, sem que haja uma limitação do número de acopladores que podem ser instalados.

O IMA-DP foi desenvolvido pelo CEPEL em parceria com a Eletronorte, denominado Instrumentação para Monitorização e Análise de Descargas Parciais (IMA-DP). Este sistema pode ser aplicável a qualquer equipamento de alta tensão que possua sistema de isolamento e pontos de acoplamento.

A Figura 28, a seguir, apresenta o diagrama do sistema de monitoração instalado na UHCN. Neste sistema há um computador servidor para o processamento centralizado, sendo que os computadores desktops conectados à rede funcionam como terminais de acesso. Assim, é possível fazer acesso remoto ao sistema IMA-DP pela rede interna da Eletronorte.

Figura 28- Diagrama do sistema de monitoração de descargas parciais



Fonte: (BRASIL & VILHENA, 2014)

O sistema completo do IMA-DP está constituído por três subsistemas integrados: o sistema de medição e os sistemas de operação e análise.

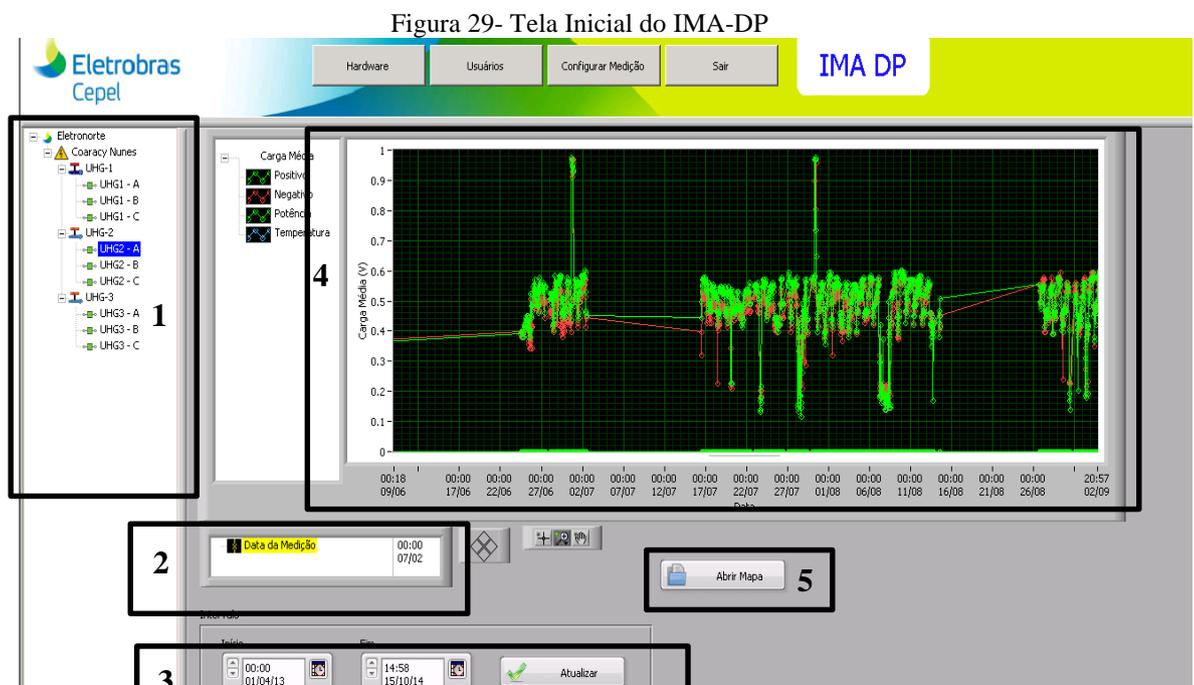
O sistema de medição é responsável pelas funções de aquisição e registro dos sinais das DPs na forma de mapas estatísticos. O sistema de operação é responsável pela configuração e pelo ajuste do *hardware* de medição, assim como pela solicitação de medições. O sistema de análise inclui ferramentas para visualização dos dados e tratamento das informações consolidadas no banco de dados ao longo do tempo. Este sistema foi concebido de forma que não houvesse quaisquer limitações no número de sinais monitorados. Todo o *hardware* de medição pode ser redimensionado pelo sistema de operação, de modo que o número de canais de medição possa ser expandido indefinidamente.

O *hardware* de medição é constituído por uma ou mais unidades independentes de medição: computadores industriais padrão PXI. Cada chassis PXI possui diversos cartões digitalizadores de alta velocidade, um módulo controlador, e alguns módulos de chaves comutadoras, cuja função é expandir o número de canais de aquisição, assim, em cada chave comutadora entram quatro sinais de DP. Os sinais de sincronismo dos diversos circuitos de medição de DP alimentam as entradas de trigger externo das placas de aquisição. 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.

O sistema de operação possui duas camadas distintas: uma camada de configuração do *hardware* de medição e uma camada de solicitação de medições. A configuração do *hardware* de medição é totalmente remota, registrada pelo sistema de operação no banco de dados. Cada PXI, ao iniciar o controle dos seus instrumentos, o faz com base nas configurações previamente especificadas e registradas no banco de dados. O administrador do sistema configura parâmetros de aquisição das placas de aquisição de dados e das chaves comutadoras, especificando que canal irá monitorar cada sinal disponível de DP.

Após a configuração do *hardware*, o sistema estará apto a receber solicitações de medições. Nesta camada, o usuário possui uma visão de todos os pontos de medição das máquinas monitoradas pelo sistema. Selecionados os pontos de medição desejados, o usuário programará livremente o disparo das medições desejadas.

O sistema de análise permite visualizar e tratar o banco de dados de medições realizadas pelo sistema. As medições podem ser tratadas isoladamente ou em conjunto. A Figura 29 a seguir ilustra a tela inicial do sistema disponível ao usuário para visualização dos dados aquisitados, e serão explicados os principais componentes apresentados.



Fonte: Print screen da tela do IMA-DP

Em 1 tem-se um menu contendo todos os acopladores das unidades geradoras 1, 2 e 3 da Usina hidrelétrica Coaracy Nunes, que estão sendo monitorados. No total, o sistema

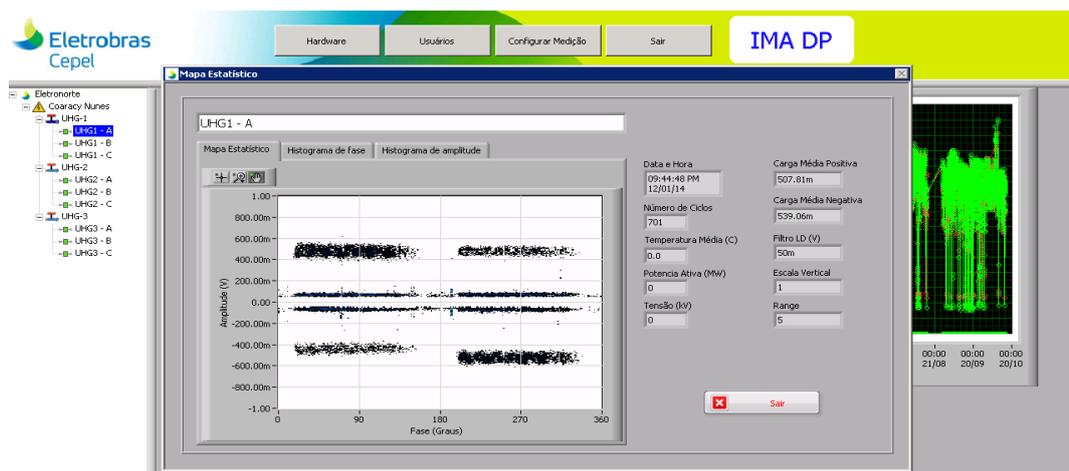
monitora 3 acopladores de cada Unidade Geradora da Usina. Para visualizar os dados aquisitados, basta clicar uma vez em cima do ponto de medição que se deseja visualizar.

Em 2 tem-se a data e a hora da medição, esta data pode ser alterada escolhendo-se o período desejado em 3, inserindo a data de início e fim e depois clicando no botão “Atualizar”.

Em 4 são mostrados os valores da carga média positiva e negativa medidos pelo instrumento de medição representados pela amplitude desses sinais coletados ao longo de um intervalo de tempo.

Em 5 há o botão "Abrir Mapa", este quando clicado nos apresenta a seguinte tela (Figura 30):

Figura 30- Mapa estatístico do IMA-DP

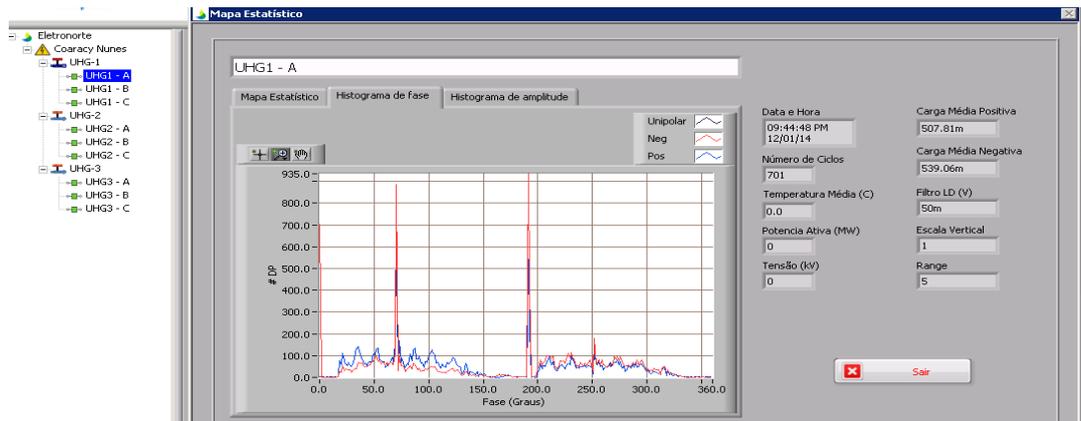


Fonte: Print screen da tela do IMA-DP

O mapa estatístico de DP é uma forma de representação bastante próxima do fenômeno medido, e dele se podem extrair muitas outras informações. Na parte superior encontra-se a identificação do acoplador medido. Na parte lateral direita há grandezas relacionadas com a DP: número de ciclos, carga média positiva, carga média negativa, filtro LD (V). Outras informações também encontradas são dados referentes à medição, onde tem-se: data e hora, temperatura média (°C), potência ativa (MW), tensão (kV), escala vertical.

Nessa interface de visualização há também histogramas. Dois deles podem ser observados: Histograma de Fase e Histograma de Amplitude. No histograma de fase (Figura 31) pode-se observar em que grau da tensão aplicada está ocorrendo os maiores pulsos de DP, que conforme técnica de reconhecimento de padrões, pode servir como um indicativo de que tipo de evento está ocorrendo no interior do sistema de isolamento.

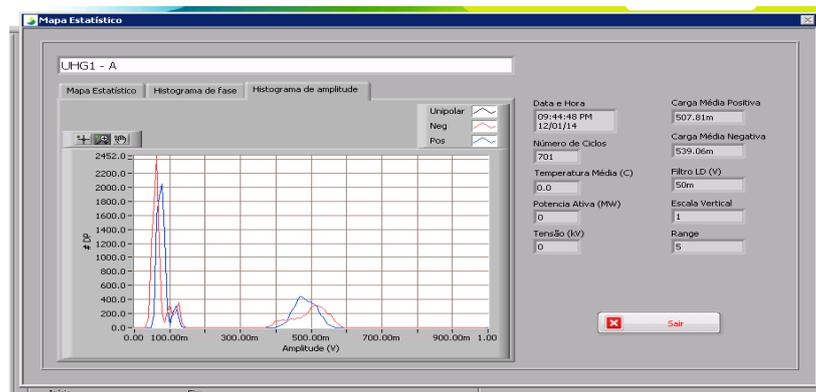
Figura 31- Histograma de Fase do IMA-DP



Fonte: Print screen da tela do IMA-DP

No histograma de amplitude (Figura 32) pode-se analisar informações sobre as amplitudes das DP's e sua taxa de ocorrência, servindo para um estudo preliminar sobre as atividades de DP no ponto analisado.

Figura 32- Histograma de Amplitude do IMA-DP



Fonte: Print screen da tela do IMA-DP

Enfim, são informações que podem ser utilizadas para melhor diagnosticar o sistema de isolamento do estator.

4. ANÁLISE E RESULTADOS

4.1 Análise

A análise dos dados foi realizada nas três fases de cada Unidade Geradora da Usina Hidrelétrica de Coaracy Nunes, ao longo do ano de 2014. A partir das quais foram possíveis verificar que nesses meses de monitoração ininterrupta não houve grande evolução das Descargas Parciais, em qualquer Unidade Geradora da Usina, quando estão operando adequadamente, ou seja, quando a temperatura, vibração, potência nominal e demais parâmetros estão operando dentro dos limites aceitáveis da geração.

Primeira conclusão: As unidades geradoras apresentaram-se liberadas para um regime contínuo de operação, não apresentando nenhum sinal de anormalidade que possa a vir comprometer a operação.

Porém observou-se que quando houve um aumento na potência nominal gerada, operando acima de 1 pu, as Unidades Geradoras apresentaram um aumento significativo nos picos positivos e negativos de magnitudes das Descargas Parciais. Notou-se que as Descargas Parciais apresentaram relação com a condição operacional da máquina, pois as Descargas acompanham as alterações de potência nominal e temperatura sofridas pela mesma, também percebeu-se, através deste estudo, que o aumento das descargas parciais teve uma forte correlação com o aumento das vibrações mecânicas, o que será comprovado posteriormente, através das curvas de tendências obtidas pelo do sistema de monitoramento.

Conclusão Final: Apesar do aumento significativo dos pulsos dos sinais de descargas parciais, com valores acima do recomendado pela Norma, ou seja acima de 500 mV, o qual sugeria-se a manutenção, não foi necessário intervir de imediato a máquina, visto que este aumento foi ocasionado por uma dada condição operacional, devido ao aumento da potência nominal, e após a normalização da geração, os níveis voltaram aos valores aceitáveis, os quais resultam da vida útil da máquina ainda dentro das expectativas projetadas a mesma.

4.2 Principais Resultados

Nesta sessão será apresentado os principais resultados encontrados ao longo da monitoração ininterrupta.

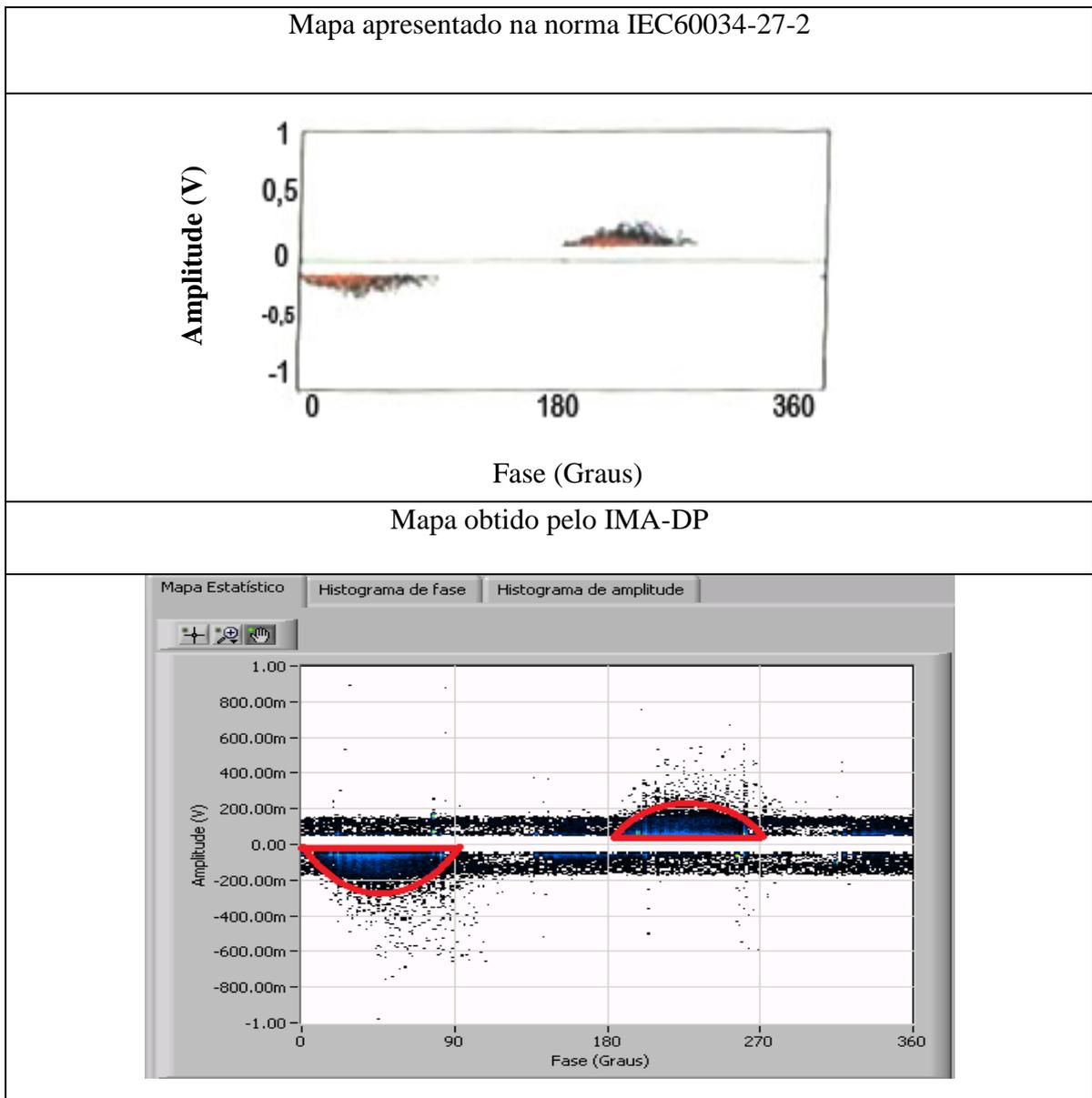
4.2.1 Padrões de descargas encontrados

Ao longo desta monitoração foram levantados os padrões de descargas, de acordo com a norma IEC 60034-27-2, os quais serão apresentados a seguir:

Descargas Internas Devido a Vazios Internos

A Tabela 3 compara o padrão deste tipo de descarga apresentado na norma IEC 60034-27-2 com o obtido pelo IMA-DP.

Tabela 3- Descarga Interna Devido a Vazios Internos



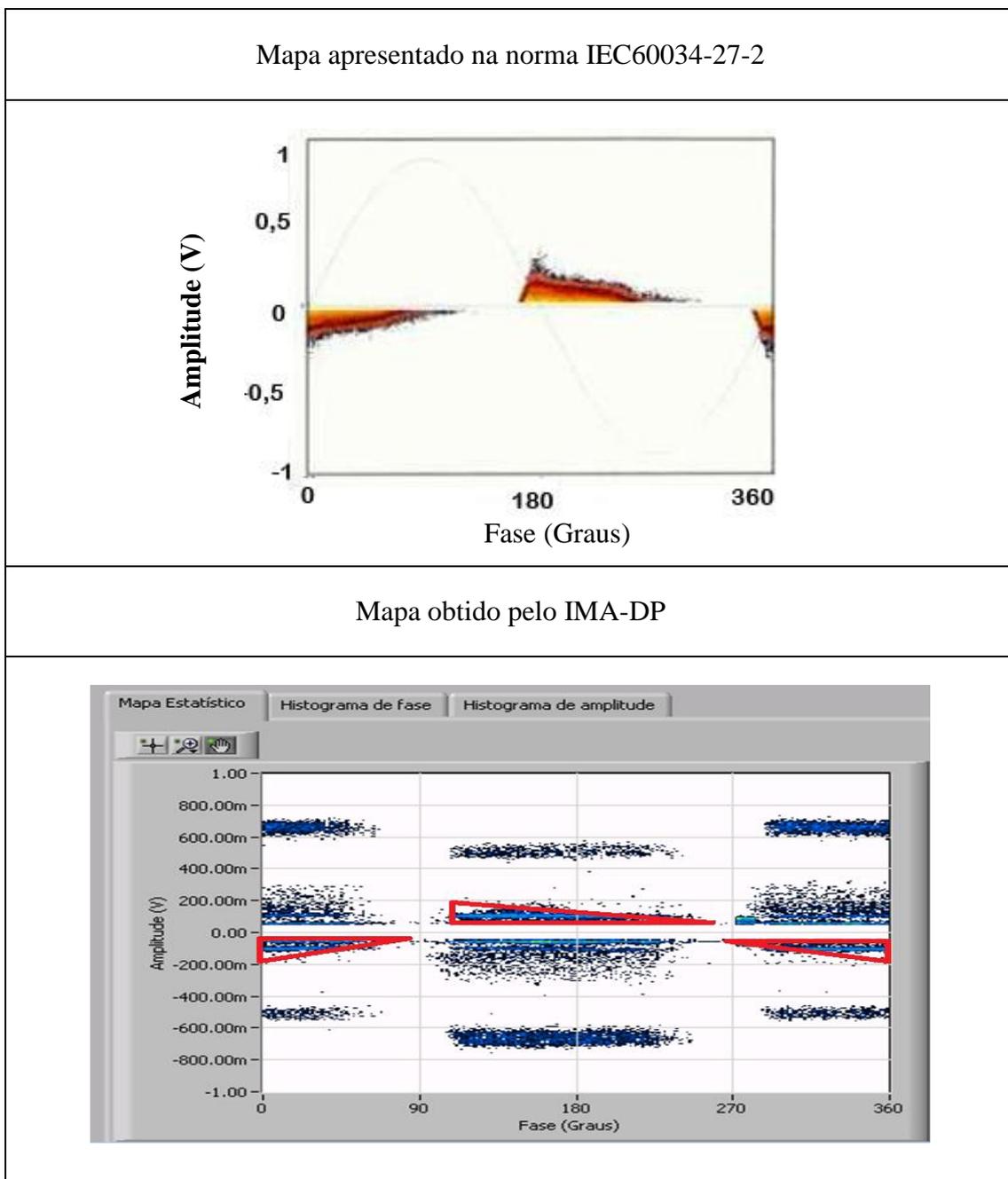
Fonte: Elaborado pela autora

A análise de DP indica que as descargas são moderadas, portanto não é necessário parar a máquina, visto que não existiu aumento nas DP, não existindo a necessidade de qualquer restrição ao equipamento, recomendando assim, a mesma leitura daqui 6 meses.

Descargas Internas Devido a Delaminação Interna

A Tabela 4 compara o padrão deste tipo de descarga apresentado na norma com o obtido pelo IMA-DP.

Tabela 4- Descarga Interna Devido a Delaminação Interna



Fonte: Elaborado pela autora

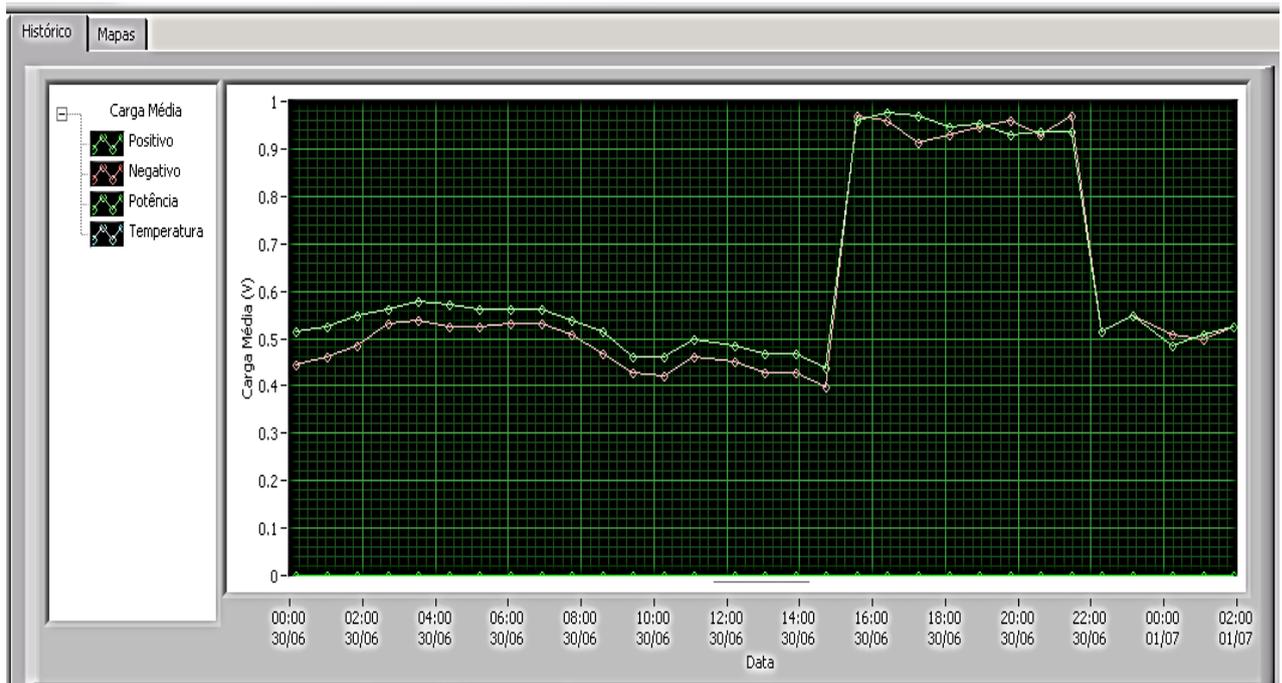
A análise de DP indica que as descargas estão estáveis e não existe restrição para máquina, porém este tipo de descarga, necessita de atenção especial, pois a sua ocorrência acima dos limites aceitáveis, reduz a condutividade térmica da isolação, podendo provocar seu envelhecimento acelerado.

4.2.2 Correlação das medições de descargas parciais e vibrações mecânicas

Este tópico demonstra um caso que ocorreu no dia 30/06/2014 na Unidade Geradora 2 da Usina Hidrelétrica de Coaracy Nunes, onde houve correlação do fenômeno de Descargas Parciais com as Vibrações Mecânicas.

A Figura 33 apresenta a curva de tendência das Descargas Parciais da Unidade Geradora 2, fase A, ao longo do dia 30/06/2014.

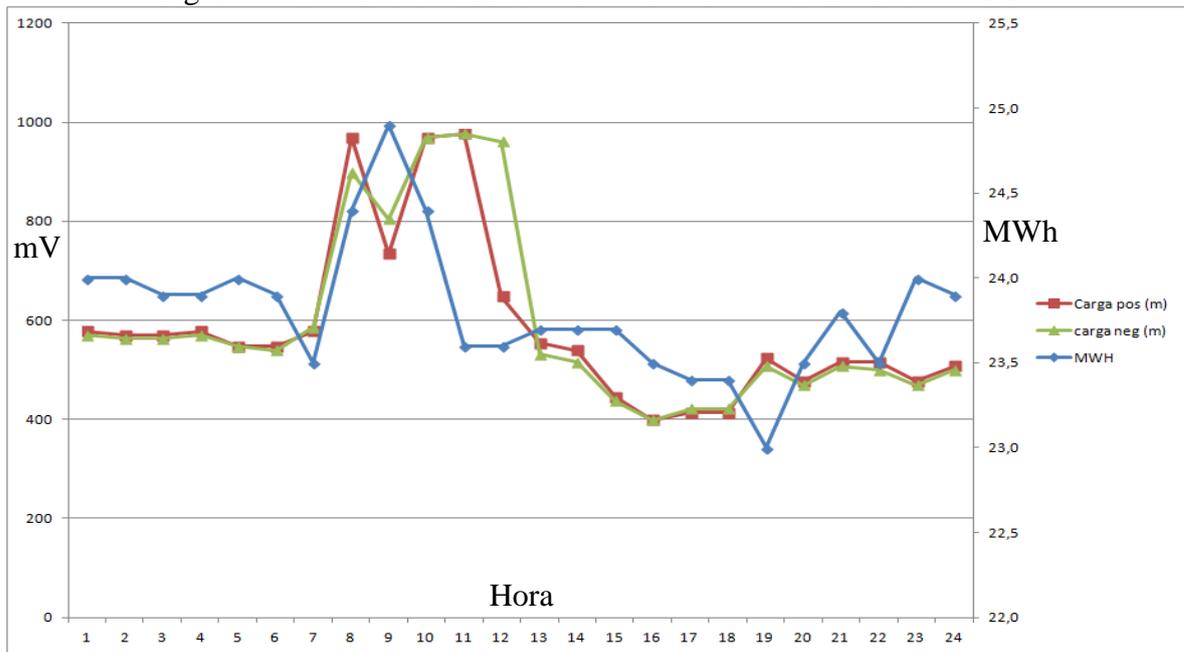
Figura 33- Histograma disponível na visualização



Fonte: Print screen da tela do IMA-DP

É possível verificar que ocorreu um aumento nos níveis das descargas parciais no período de 15:00 as 22:00 horas, e, após uma análise deste caso, observando as condições operacionais da Unidade Geradora, pode-se concluir que esta ocorrência resultou do aumento de 3,75% da potência nominal gerada pela Unidade Geradora, passando de 24 MW para 24,9MW (Figura 34).

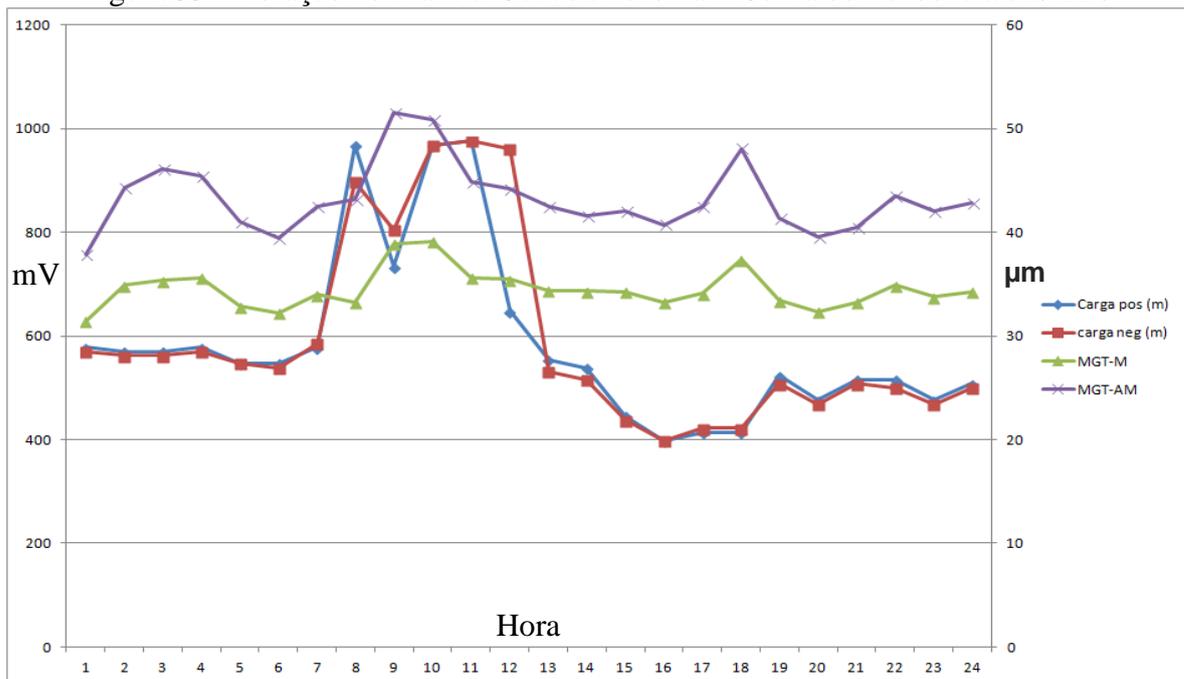
Figura 34- Potência Nominal Gerada x Curva de Tendência das DP



Fonte: Elaborado pela autora

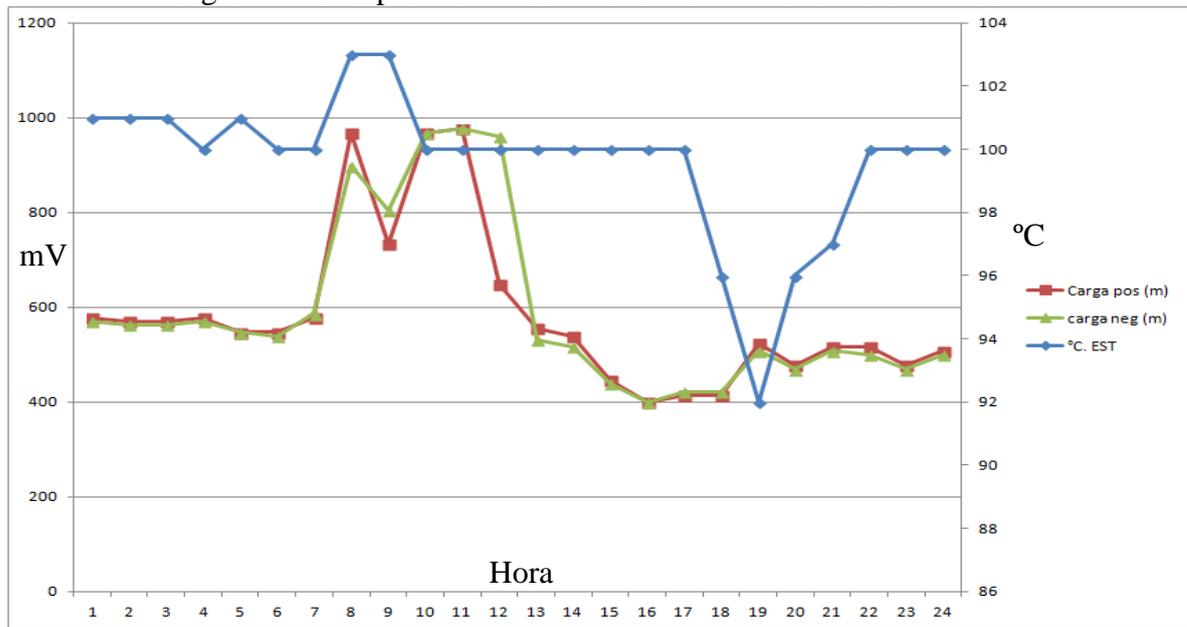
Após uma análise dos sistemas de monitoramento, verificou-se que além do aumento do nível de DP na fase A, houve o aumento da vibração relativa no mancal guia da turbina em 19% (Figura 35), a vibração no mancal guia do gerador também aumentou, porém de forma menos significativa. Outras variáveis também foram observadas como temperatura do estator, cerca de 4% de aumento (Figura 36).

Figura 35- Vibração no Mancal Guia da Turbina x Curva de Tendência das DP



Fonte: Elaborado pela autora

Figura 36- Temperatura do Estator x Curva de Tendência das DP's



Fonte: Elaborado pela autora

Por fim, pode-se concluir com este estudo que a magnitude das Descargas Parciais, assim como seu número de ocorrências, e conseqüentemente seu padrão apresentaram uma correlação positiva com o aumento das vibrações mecânicas, fato este que deve ser levado em consideração durante a análise do especialista para o melhor diagnóstico da Unidade Geradora.

5. CONCLUSÃO

5.1 Considerações Finais

Na manutenção preditiva, de uma maneira especial no monitoramento de Descargas Parciais, procura-se por meio de instrumentos obter informações contidas das condições de funcionamento do equipamento, relatar um diagnóstico e fazer intervenções antes da ocorrência de falhas, ou ainda, monitorar o início de falhas e intervir no momento adequado. Agora, fica claro a importância da utilização dessas técnicas de manutenção, principalmente as de análise de Descargas Parciais, pois permite que o analista identifique a causa, faça o diagnóstico, e através de toda metodologia de análise vista, se faz a avaliação da severidade e das condições do isolamento do enrolamento do estator, ou seja, as condições atuais e suas devidas falhas.

Assim percebe-se o quão importante é a implementação de um sistema de monitoramento de DPs em hidrogeradores, é sabido que é um sistema caro e complexo, entretanto eficaz. O estudo mostra que é essencial que se tenha um sistema de monitoramento, pois uma eventual falha, pode acarretar várias outras podendo levar a Unidade Geradora a uma parada total, trazendo prejuízos. No caso do “IMA-DP”, o software usado na Usina Hidrelétrica Coaracy Nunes, nota-se a tranquilidade e confiabilidade que esse sistema de monitoramento traz aos responsáveis pela manutenção, pois quando o analista agenda adequadamente as medições, ele poderá acompanhar o comportamento da máquina em diferentes horários, dias da semana, do mês e assim poder realizar diagnósticos da situação da máquina de forma mais precisa.

Este trabalho apresentou como principais resultados da monitoração: a correlação entre as descargas e a condição operacional da máquina (temperatura e potência ativa) e também foram levantados os seguintes padrões de descargas de acordo com a norma IECTS 60034-27-2: descarga interna devido a vazios internos e descargas internas devido a delaminação interna. Também pode-se perceber que em uma determinada condição operacional as DP's tiveram correlação com as vibrações mecânicas, concluindo após a análise que as Unidades Geradoras estavam operando dentro das suas normalidades, não sendo necessário uma intervenção, estando liberadas para operação.

A implantação do IMA-DP veio a contribuir na evolução tecnológica, obtendo as seguintes vantagens:

- Aproveitamento da estrutura atual do sistema de monitoramento de grandezas operativas, térmicas e mecânicas, em operação na Eletrobrás Eletronorte, em termos de *hardware* e um potencial de análise integrada do desempenho das máquinas;
- Implantação de um sistema de medição com custos bem inferiores aos dos demais sistemas comerciais atualmente disponíveis no mercado, aproveitando as instalações já existentes nos diversos geradores;
- Geração e a disponibilização de banco de dados, criando conhecimento e crítica que propiciem realizar localmente uma análise adequada do estado operativo das máquinas;
- Facilidade para atualização, evolução e manutenção do sistema de monitoramento;
- Não interferência nos atuais procedimentos adotados pela Eletronorte na avaliação de seus geradores.

5.2 Sugestões Para Trabalhos Futuros

Tem-se como sugestões para trabalhos futuros automatizar o processo de análise e diagnóstico da isolação dos enrolamentos estatóricos através de técnicas de inteligência computacional, pois essa análise ainda é feita de forma manual o que toma muito tempo do especialista. E uma vez que as ocorrências de DPs tiveram correlação com os parâmetros das máquinas, tais como vibrações, temperatura, deseja-se também integralizar os dados do IMA-DP com os softwares de medições dessas grandezas, para que o diagnóstico se torne mais preciso.

5.3 Publicação de Artigo

A partir deste trabalho, publicou-se um artigo que pode ser lido no apêndice A do mesmo.

VILHENA, P. R. M., BRASIL, F. S., SANTOS, M. N. N., SANTOS, C. J. S., “*Análise do Sistema de Isolamento dos Enrolamentos Estatóricos das Unidades Geradoras da Usina Hidrelétrica Coaracy Nunes*”, XI LATIN-AMERICAN CONGRESS ON ELECTRICITY GENERATION AND TRANSMISSION “BIOENERGY FOR ELECTRICITY GENERATION” AND “ECOLOGICAL ISSUES IN POWER PLANTS”, São José dos Campos – SP, Brasil, 2015.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 5462: Confiabilidade e manutenibilidade. 1994
- ALMEIDA, M. T. De, “*MANUTENÇÃO PREDITIVA: BENEFÍCIOS E LUCRATIVIDADE*”; Escola Federal de Engenharia de Itajubá, Itajubá – MG, 1988.
- AMAYA E. J., TONACO R., SOUZA R. Q., ÁLVARES A. J., “*Sistema de Manutenção Baseada Em Condição Para Usina Hidrelétrica de Balbina*”; Congreso de Computación Aplicada CAIP’, 2007.
- BARONI, Tarcísio *et al.* , *Gestão Estratégica e Técnicas Preditivas*, Ed. Qualitymark. Rio de Janeiro, 2002.
- BRASIL, F. De S., “*Estudo Experimental de Técnicas de Medição de Descargas Parciais nos Enrolamentos Estatóricos de Hidrogeradores*”, Dissertação de Mestrado, UFPA, Belém-PA, Brasil, 2013.
- BRASIL, F. De S., VILHENA, P. R. M. de, “*Avaliação da Isolação dos Enrolamentos Estatóricos de Hidrogeradores através da Monitoração online de Descargas Parciais*”, Encontro Nacional de Máquinas Rotativa, Taubaté-SP, Brasil, 2014.
- BRAULIO, G. A., SILVA, A.G., “*Experiência Da CEMIG Em Monitoramento De Descargas Parciais De Geradores*”, Grupo De Estudo De Geração Hidráulica - GGH, XXII SNTPEE Seminário Nacional De Produção E Transmissão De Energia Elétrica, Brasília – DF, Brasil, 2013.
- CEPEL. *Apostila do Curso de Descargas Parciais*. Disponível em: <ftp://ftp.cepel.br/upload/Curso_Descargas_Parciais/Mesclas/Artigos/Descargas%20Parciais.pdf>. Acesso em: 25 jun. 2015.
- CONSEIL INTERNATIONAL DES GRANDS RÉSEAUX ÉLECTRIQUES, *CIGRÉ 392 Survey of Hydrogenerator Failures*. Working Group A1.10, 2009.
- CUENCA, W.M.H., *Caracterização dos Sinais de Descargas Parciais em Equipamentos de Alta Tensão a Partir de Modelos Experimentais*. Programa Pós-Graduação de Engenharias, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro: s.n., 2005.
- FUENTES, Fernando. F.E *Metodologia para Inovação da Gestão de Manutenção Industrial. Dissertação (Doutorado em Engenharia) – Curso de Pós Graduação em Engenharia Mecânica*, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2006.
- GROSS, D.W. *Partial Discharge Diagnosis of Motor Defects*. Power Diagnostix Systems GmbH Aachen, Germany. Nordic Insulation Symposium Tampere, June 11-13, 2003.
- GUIMARÃES, J.E – *Manutenção*. Escola Técnica Estadual República, Coordenação de Mecânica. 2005.

INTERNACIONAL ELETROTECHNICAL COMMISSION, *IEC 60034-27-2 Rotating Electrical Machines – Part 27-2: Online Partial Discharges Measurements on the Stator Winding Insulation of Rotating Electrical Machines*. Suíça, 2012.

KARDEC, Alan; NASCIF, Julio. “*Manutenção Função Estratégica*”, 2ª ed, 1ª Reimpressão. Editora Quality Mark, Rio de Janeiro, Coleção Manutenção, Abraman, 2004.

LEVY, A. F. S., *et al.*, *Instrumento para Monitoramento e Análise de Descargas Parciais - Relatório Parcial*. Belém - Pará - Brasil, 2007.

NEPOMUCENO, L. X., ‘*Técnicas de Manutenção Preditiva*’, Editora Edgard Blücher Ltda; Volume 2, 1989.

PINTO, A. K.; XAVIER, J.A.N.; “*Manutenção: função estratégica*”, 2.Ed. rev. e ampl. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2001.

POLUX, Tecnologia em Equipamentos S.A. *Apostila do Curso Monitoramento em Descargas*. 2010.

SANTOS, R. L., OLIVEIRA, R. C. L. e LEITE, J. C., Metodologia de Diagnóstico de Manutenção Baseada em Condição de Enrolamentos Estatísticos em Hidrogeradores. Congresso de Engenharia de Produção do Sul, CONEPRO. Joinville-SC, 2010.

SILVA, I. A. T. Da, GAMA, O. P.; “*Proposta de Um Plano de Manutenção Centrada Em Confiabilidade Para Máquinas*”; Universidade da Amazonia, Belem-PA, 2013.

SIQUEIRA, I.P. *Manutenção Centrada na Confiabilidade*: Ed. Qualitymark. Rio de Janeiro, 2005.

SLACK, N.; CHAMBERS, S.; JOHNSTON, R. *Administração da Produção*. São Paulo: Atlas, 2002.

STONE, G. and WARREN, V. *Differences in Stator Winding Partial Discharge Activity Between Manufacturers*. Iris Power Engineering, 1 Westside Drive, Unit 2 Toronto, Ontario, Canada M9C 1B2, 2005.

STONE, G. C., *et al.*, *Recent Problems Experienced with Motor and Generator Windings*. IEEE Paper PCIC-2009-6 : s.n., 2009.

STONE, G. C. Partial Discharge Diagnostics and Electrical Equipment Insulation Condition Assessment. IEEE Transaction on Dielectric and Electrical Insulation, vol. 12, no. 5, pp. 891-903, 2005.

TAKAHASHI, Yosikazu e OSADA, Takashi. *TPM/MPT – Manutenção Produtiva Total*. Ed: IMAM, 1993.

TORLAY, S. A., *et al.*, “*Aplicação da Técnica de Descargas Parciais Como Ferramenta Suporte a Tomada de Decisões Técnicas e de Gestão*”, VIII Seminário Paranaense de Manutenção, Curitiba-PR, Brasil, 2008.

VIANA, Herbet Ricardo Garcia. *PCM – Planejamento e Controle da Manutenção*. 1ªed. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2002.

XENOS, Harilaus. G. *Gerenciamento da Manutenção Produtiva*. Belo Horizonte: Editora de Desenvolvimento, 1998.

ZAIIONS, Douglas R.; *Consolidação da Metodologia de Manutenção Centrada em Confiabilidade em Uma Planta de Celulose e Papel*. Porto Alegre. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – PPGE, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2003.

APÊNDICE A- ARTIGO

Análise do Sistema de Isolamento dos Enrolamentos Estatóricos das Unidades Geradoras da Usina Hidrelétrica Coaracy Nunes

P. R. M. Vilhena, *Eletronorte*, F. S. Brasil, *Eletronorte*, M. N. N. Santos, *Unifap*, e C. J. S. Santos, *Unifap*

Resumo--O sistema de isolamento elétrico dos geradores deve ser capaz de resistir ao estresse da alta tensão, portanto, é necessário que durante seu tempo de operação, a sua condição operacional seja verificada, isto é possível através do monitoramento de descargas parciais (DP) que são descargas elétricas de baixa intensidade, que ocorre numa região imperfeita de um dielétrico, sujeito a um campo elétrico. O objetivo geral deste artigo é avaliar o sistema de isolamento dos enrolamentos estatóricos dos geradores da Usina Hidrelétrica Coaracy Nunes, através de um sistema de monitoramento online de descargas parciais. Notou-se que durante o monitoramento contínuo não houve grande evolução da DP, em condições normais, porém, quando houve aumento na potência nominal gerada (acima de 1 pu), as máquinas tiveram um aumento nos níveis de DP. Notou-se também que o aumento dos níveis de DP tem uma forte correlação com o aumento das vibrações.

Palavras-Chave--Descargas parciais, hidrogeradores, sistema de monitoramento online, Manutenção Preditiva.

1. INTRODUÇÃO

INAUGURADA na década 70, a Usina Hidrelétrica de Coaracy Nunes (UHCN) foi construída no Rio Araguary, município de Ferreira Gomes (Amapá, Brasil), e previa originalmente duas unidades geradoras projetadas para gerar 20 MW cada uma. Posteriormente este potencial foi aumentado com a inserção de mais uma unidade geradora de 30 MW e a repotenciação das unidades de 20 MW para 24 MW cada, passando a somar 78 MW; Esta concessionária de energia trabalha arduamente para tornar o fornecimento de energia elétrica confiável e seguro. Seus principais componentes do fornecimento de energia elétrica – geradores – precisam ser mantidos em perfeitas condições de operação, pois são componentes essenciais para o fornecimento de energia, e, sob o ponto de vista econômico, representam o item mais oneroso. O sistema de isolamento destes geradores deve

ser capaz de resistir estresse de alta tensão, portanto é necessário que ao longo da sua vida útil, sua condição operacional seja verificada.

Um estudo sobre causas de falhas em hidrogeradores examinou 69 incidentes e concluiu que as principais causas de falhas podem ser categorizadas na seguinte ordem: falhas no sistema de isolamento, defeitos mecânicos, problemas térmicos e por último, falhas devido nos mancais de rolamento [8]. A figura 1 ilustra essa classificação:

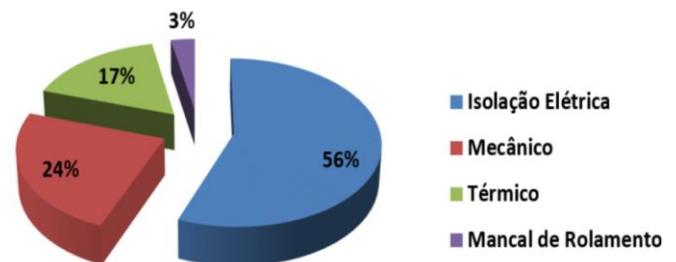


Fig. 1. Causas raízes de falhas em hidrogeradores

Devido ao resultado significativo, as falhas no sistema de isolação elétrica foram investigadas com mais detalhes, onde os resultados estão ilustrados na Figura 2. Dentre as causas raízes de falhas no sistema de isolação apenas a proteção, sobretensões e afrouxamento da cabeça das bobinas não geravam DPs, ou seja, aproximadamente 90% das causas de falhas na isolação de hidrogeradores tem como sintoma o aparecimento de DP.

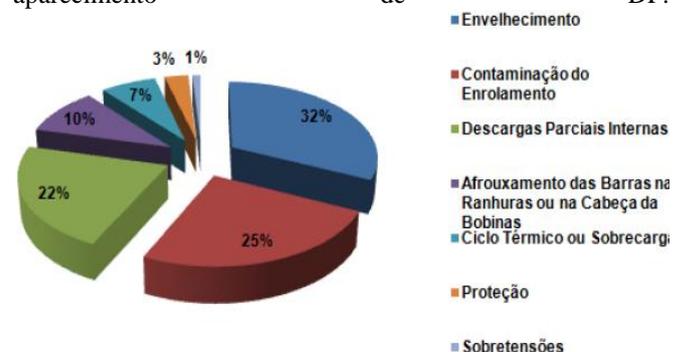


Fig. 2. Causas de falhas no sistema de isolação elétrica

Descarga Parcial (DP) é um fenômeno que se manifesta no sistema de isolamento das máquinas rotativas, podendo ser definida como uma descarga elétrica de pequena intensidade, que ocorre em uma região de imperfeição de um meio

Este trabalho foi desenvolvido na Divisão de Engenharia de Operação e Manutenção - OAPE em conjunto com o Centro de Tecnologia da Eletronorte, na Gerência de Tecnologia de Ensaios - OCTE.

P. Vilhena, é engenheiro da ELETROBRAS/ELETRONORTE, Macapá, Amapá, Brasil (paulo.vilhena@eletronorte.gov.br).

F. Brasil é engenheiro da ELETROBRAS/ELETRONORTE, Belém, Pará, Brasil (fernando.brasil@eletronorte.gov.br).

C. J. S. Santos é aluna de graduação da Universidade Federal do Amapá (camilazinhaaaa@hotmail.com).

M. N. N. Santos é professora da Universidade Federal do Amapá, Macapá, Amapá, Brasil (michelennsantos@gmail.com).

dielétrico, sujeita a um campo elétrico, onde o caminho formado pela descarga não une as duas extremidades dessa região de forma completa, e por não haver uma ruptura completa, são chamadas “parciais” [1]. Por conta das DP serem potenciais fontes de defeitos nos isolamentos elétricos, a sua presença pode ser um forte indicador de um processo que levará à falha total do isolamento.

No setor elétrico as práticas de manutenção vem sendo mudadas, as metodologias de manutenção baseada no tempo (Manutenção Preventiva) e as que ocorrem após uma falha (Manutenção Corretiva), vem sendo substituídas por metodologias de manutenção baseada nas condições do equipamento (Manutenção Preditiva). Essa mudança se dá principalmente devido a impossibilidade de se parar as máquinas por longos períodos nas instalações, tendo em vista o possível prejuízo financeiro associado. Assim, os desligamentos devem ser realizados de maneira programada de forma a eliminar ou minimizar as perdas.

O monitoramento de DP possibilita a melhoria da confiabilidade dos geradores, pois se pode identificar a degradação do seu sistema de isolamento, e assim, repará-lo ou substituí-lo antes da falha catastrófica em serviço [2].

Desde 2009 vem se trabalhando para implantar a monitoração de DPs nas unidades geradoras da UHCN, os primeiros trabalhos tiveram início através de medições esporádicas realizadas em conjunto com o Centro de Pesquisas de Energia Elétrica Eletrobrás - Cepel até a instalação definitiva em todas as máquinas, em 2013, de todo o sistema de monitoração de DPs, o software utilizado para medição foi o IMA-DP, desenvolvido em parceria Eletronorte e Cepel [9].

A UHCN sofreu duas falhas causadas por um corpo estranho deixado no estator, o que poderia ter sido evitado se houvesse um sistema de medição de DP. Houve falha na unidade CNUGH-02 (três meses e seis dias de máquina parada, fonte SAP R3 - Eletronorte). A causa da queima do estator foi um parafuso encontrado no enrolamento do estator, ver figura 3. Houve falha na CNUGH-03 (nove meses de máquina parada para reparos, fonte SAP R3 - Eletronorte) devido a um parafuso que danificou a isolação do estator e ficou alojado em uma guia de ar. O longo tempo de máquina parada, neste caso, também está associado a outros fatores relacionados com a isolação.

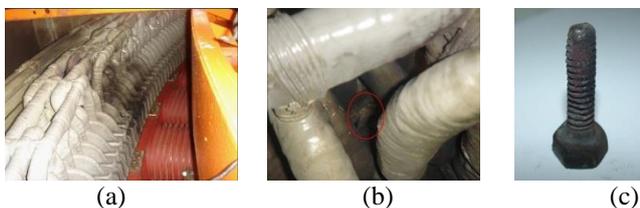


Fig. 3. (a) Avaria no estator, (b) parafuso no estator da máquina e (c) parafuso [Fonte: arquivo técnico Eletronorte].

Com isso, o objetivo do trabalho é apresentar os resultados das medições de um sistema para avaliar o estado dielétrico dos enrolamentos estatóricos dos hidrogeradores da Usina Coaracy Nunes ou qualquer outra usina hidráulica, através do Monitoramento de DPs.

II.MANUTENÇÃO PREDITIVA

A manutenção tem uma importância vital no funcionamento de uma empresa e cabe a ela zelar pela conservação da mesma, especialmente de máquinas e equipamentos, devendo antecipar-se aos problemas através de um contínuo serviço de observação dos bens a serem mantidos. A escolha da técnica de manutenção mais adequada para cada tipo de equipamento de uma planta de geração de energia elétrica, deve levar em consideração fatores como: importância do equipamento para o processo produtivo, o seu custo de aquisição e a sua taxa de falha. [5]

A atividade de manutenção deve integrar-se de maneira eficaz ao processo, contribuindo efetivamente para que a concessionária caminhe rumo à sua excelência. Devido aos grandes avanços tecnológicos, ocorre uma grande mudança de paradigma, onde a escolha do tipo de manutenção que será utilizado em determinado equipamento, requer não apenas a eficiência, como a eficácia, ou seja, não basta apenas reparar o equipamento de uma forma “rápida”, tem-se como prioridade, manter a função do equipamento disponível para a operação, reduzindo a probabilidade de uma parada. [6]

A manutenção preventiva baseia-se em estatísticas sobre tempo médio entre as falhas, para assim intervir. O problema é que o tempo médio pode não ser sempre assertivo, resultando em um a manutenção para um reparo desnecessário ou uma manutenção para uma falha catastrófica, e, então, necessitaria de técnicas corretivas, que segundo [7], implica altos custos, pois as quebras inesperadas podem acarretar perdas de produção, perda da qualidade do produto e elevados custos indiretos de manutenção, assim como, pode ocasionar graves consequências para os equipamentos. Por isso, cada vez mais, troca-se esses tipos de manutenção, pela preditiva, onde é possível, a partir da análise de parâmetros, intervir antes da falha catastrófica, visando sempre, menos prejuízo.

Os hidrogeradores podem desenvolver falhas ou defeitos, a partir do seu uso, ocasionando sua parada ou uma diminuição da sua eficiência. Pode-se perceber indícios de defeitos, a partir da: mudança de sinais de vibrações, variação da temperatura, mudança dos sinais de DP, etc. Esta detecção de falhas ou defeitos, é possível por meio de técnicas de manutenção preditiva [10].

Em [6] define-se manutenção preditiva como “qualquer atividade de monitoramento que seja capaz de fornecer dados suficientes para uma análise de tendências, emissão de diagnóstico e a tomada de decisão”, e é com essa visão que a Análise de DP deve ser aplicada.

III.DESCARGAS PARCIAIS

Descargas parciais são pequenas faíscas elétricas resultante da fadiga elétrica de um gás (por exemplo, ar) contida no interior de uma cavidade ou de um campo elétrico elevado não-uniforme. Se a cavidade é dentro de um sólido orgânico ou líquido, o DP irá degradar o material orgânico e pode eventualmente, causar a falha do isolamento elétrico [2].

Sucessões de descargas elétricas incompletas, rápidas e intermitentes, que ocorrem em um meio gasoso em série com isolantes sólidos ou líquidos. A conceituação de descarga

incompleta se dá pela restrição quanto á zona do dielétrico.

As DP's ocorrem em regiões definidas e não chegam a completar um circuito fechado (curto-circuito). São também consideradas rápidas pelo fato de ocorrerem em períodos curtíssimos de tempo, ao comparar-se com o período da tensão de teste (1/60 segundos).

A figura 4 apresenta um Padrão Típico de Descarga Parcial em uma barra estatórica de um gerador.

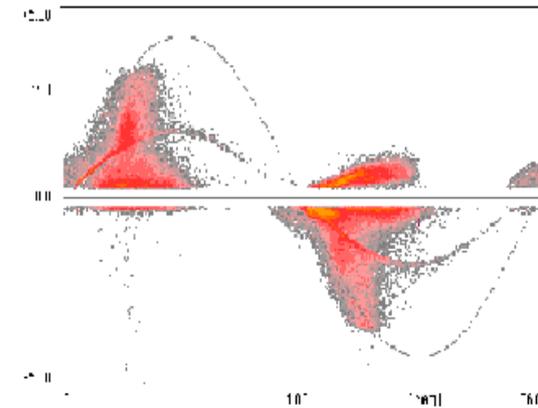


Fig. 4. Descargas Parciais em Hidrogeradores [12]

As DP's podem produzir pulsos de correntes, luminescência, ondas eletromagnéticas, ondas acústicas, consumo de energia, variações térmicas, variações químicas, vibrações mecânicas, etc. Em sentido amplo, as técnicas de detecção e medição podem ser divididas em dois grupos: elétricos e não elétricos.

A. Método Elétrico de Medição de DPs

O método elétrico insere o circuito de medição e detecção no circuito onde as descargas não ocorrem. Já os métodos não elétricos, geralmente, servem apenas de suporte aos métodos elétricos.

Um desafio particular na medição de DP é encontrado em medições on-line com motor, gerador, ou turbogerador em funcionamento. Uma vez que a máquina é ligada ao sistema de energia, interferências elétricas (ruídos) estão muitas vezes presentes. Fontes de ruído incluem corona a partir do sistema de potência, anel coletor, comutador, ignição, faíscas de pobres conexões elétricas, e/ou operação do sistema de potência. Este ruído obscurece os pulsos DP e podem causar conclusões técnicas que o enrolamento do estator tem elevados níveis de DP, quando na verdade é apenas ruído. A consequência é que um bom enrolamento é avaliado incorretamente como sendo defeituoso, o que significa que um falso alarme é dado sugerindo que o enrolamento está com sua isolamento comprometida, quando não está. Tais alarmes falsos reduzem a credibilidade dos testes DP on-line [11], além da falta de análise ao longo do tempo tem resultado na diminuição do interesse da equipe de manutenção da planta em continuar as medições [3].

Dados de DP tal como acontece com a maioria dos sistemas de medição de DP, o número, a magnitude, e a posição de fase com relação ao ciclo de 50 ou 60 Hz de corrente alternada são registrados, uma vez que os pulsos de DP são separados dos pulsos de ruído. A Figura 5 mostra um

gráfico típico de DP a partir de uma fase de um enrolamento do estator do motor. A magnitude do pulso é medida em termos absolutos, unidades de milivolts (mV). A partir de cada teste, dois indicadores de síntese são extraídos, representando todas as DP pulsos dados coletados. Os picos positivos e negativos de magnitudes DP (+ Qm e -Qm) representam os mais elevados pulsos medidos de DP em mV com uma taxa mínima de repetição DP de 10 pulsos por segundo. Qm é um preditor razoável da condição de isolamento do estator. Uma alta Qm medida num enrolamento em comparação com uma menor Qm em outros enrolamentos, geralmente implica que o enrolamento é mais deteriorado[11], [3].

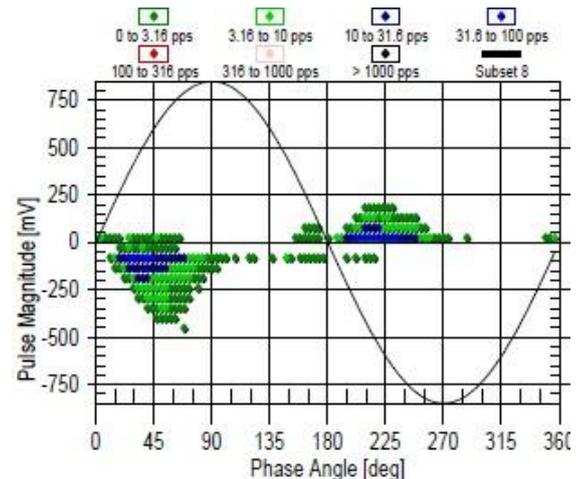


Fig. 5. Gráfico típico de DP [11]

A natureza destrutiva da DP na isolamento de cabos de alta tensão, mais geralmente em dispositivos de alta tensão, já é conhecida há mais de 80 anos [4]. Portanto, fabricantes de cabos de alta tensão, transformadores, capacitores e comutadores, em que o isolamento é composto principalmente de materiais orgânicos (papel, óleo, polietileno, borracha, epóxi e / ou poliésteres) devem tomar o cuidado ao projetar um sistema de isolamento que não contenha espaços vazios, nas regiões de estresse elétrico de alta tensão [2]. Consequentemente, não é surpresa que os métodos de medição para determinar DP, têm sido objeto de desenvolvimento desde a década de 1930.

B. Tipos de DP em Máquinas Rotativas [2,14]

A bobina do estator de uma máquina rotativa, apresenta as atividades de DP, em condições diferentes. Cada localização da atividade de DP tem uma configuração específica com diferentes materiais envolvidos. Assim, a atividade de DP é específica para cada configuração diferente. A Figura 6, mostra um corte transversal de uma barra de estator com locais de defeitos típicos marcados:

- Campo elétrico intenso se encontra no canto do condutor (corona na cabeça das bobinas). Dependendo do processo de fabricação, adicionalmente uma borda parcialmente afiada pode causar de forma precoce o início de uma DP;
- Delaminação condutor-isolante é o desgaste da isolamento principal do condutor, ou seja, a delaminação das camadas isolantes do sistema dielétrico, usualmente ocorre quando uma máquina está sobrecarregada;

- c) Descolamento de isolamento é a delaminação interior da isolação principal, parte do processo de envelhecimento térmico normal da isolação de mica-epóxi;
- d) Indica uma região sem camadas de mica;
- e) Descarga na ranhura causada por vibração da barra dentro da ranhura devido à cunha inadequada ou vibração parcial do núcleo;
- f) Cavidades (vazios).

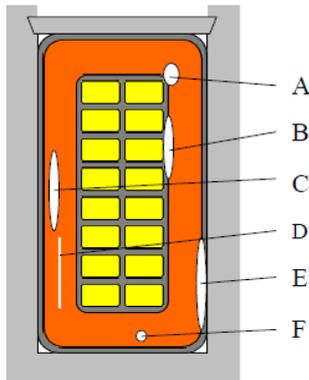


Fig. 6. Secção transversal de uma barra de máquina [12].

C. Reconhecimento de Padrões

Discriminação de pulsos de acordo com a fase (phase resolved PD) [14], a Figura 7 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. Nota-se que os padrões diferentes dos mostrados aqui podem também ocorrer para diferentes fontes de DP. Os usuários devem estar cientes de que vários efeitos adicionais, não mostrados aqui, podem ocorrer durante medidas DP on-line que também podem produzir outros padrões característicos DP. Especialmente forte superposição de padrões é possível em casos práticos e também variações na forma padrão, frequência DP ou outras características.

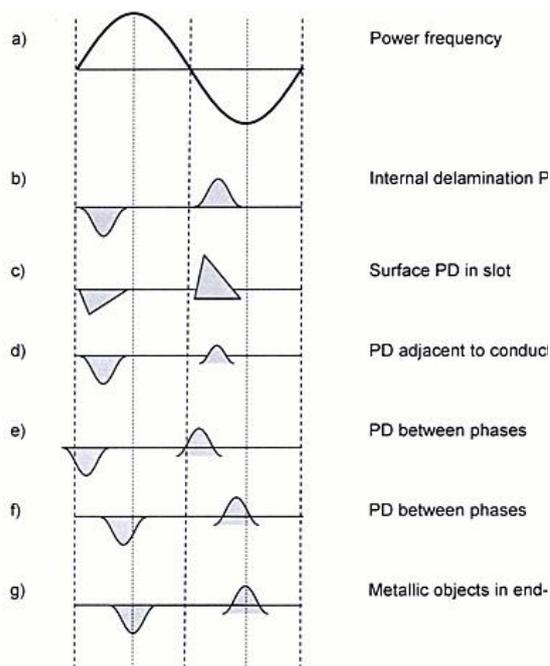


Fig. 7. Phase Resolved PD [14].

Medições periódicas de DP foram sensíveis a algumas das fontes externas de deterioração que afetaram estes enrolamentos do estator. Verificou-se que os defeitos encontrados [13] refletem o padrão definido na norma IEC TS 60034-27-2 - 2012. Importante destacar que os estatores avaliados são de diferentes fabricantes e foram instalados em datas diferentes e os acopladores utilizados são de 80 pF

D. Sistema de medição de descargas parciais

A seguir serão apresentados o circuito de medição e o protótipo do sistema desenvolvido.

Na figura 8 ilustra-se um circuito de medição para um único acoplador instalado em uma fase. No lado de baixa tensão de cada capacitor, ou seja, em sua blindagem é conectado um cabo de medição que encaminha o sinal de corrente das DP's até uma caixa de terminais localizada na parte externa do gerador. Nessa caixa de terminais há um resistor em paralelo no valor de cerca de 2000 Ω para cada cabo coaxial vindo de cada acoplador.

A partir dessa caixa de terminais são lançados os cabos até a entrada do sistema de monitoramento montado em um rack padrão 19".

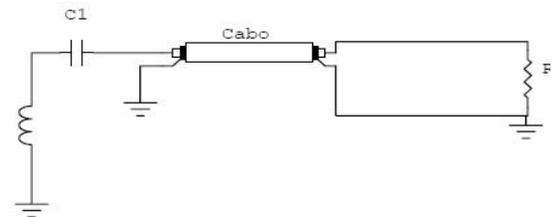


Fig. 8. Circuito de medição de DP. À esquerda, temos um circuito de uma das fases, onde se conecta um capacitor de acoplamento. À direita, temos a impedância de medição.

Instrumentação Proposta

A instrumentação proposta pelo sistema foi desenvolvida numa plataforma comercial PXI de tal maneira que se pudesse desenvolver um produto o mais aberto possível obedecendo a critérios tais como:

Montagem de hardware modular de tal forma que seja mais fácil de atualizar o sistema e envolver custos menores de manutenção ao longo dos anos;

Facilidade de desenvolvimento de software, separando-se os desenvolvimentos dos processos de aquisição dos processos de armazenamento, análise e ferramentas de diagnóstico;

Redução de custo de instalação posto que um sistema pode atender várias Máquinas, no caso da usina de Coaracy Nunes atende as três unidades, sem que haja uma limitação do número de acopladores que podem ser instalados.

A medição de DP é realizada no domínio do tempo com uma instrumentação digital com capacidade de amostragem de até 100 MS/s. Como o ambiente de usina possui diversas fontes de ruídos eletromagnéticos com as mais variadas faixas de frequência, foi necessário um condicionamento intermediário de sinais de tal forma que apenas as componentes de interesse alcançassem o instrumento de medição. Na verdade esse condicionamento de sinais deveria ser mais customizado e realizado de diferentes maneiras conforme as características de cada enrolamento estáticos

que se quisesse monitorar visto que é mais importante a sensibilidade de medição em detrimento do valor absoluto da grandeza comparada entre os diversos geradores. A seguir a figura 9 mostra um diagrama esquemático das ligações físicas estabelecidas nas unidades geradoras CNUGH-01, 02 e 03, de Coaracy Nunes.

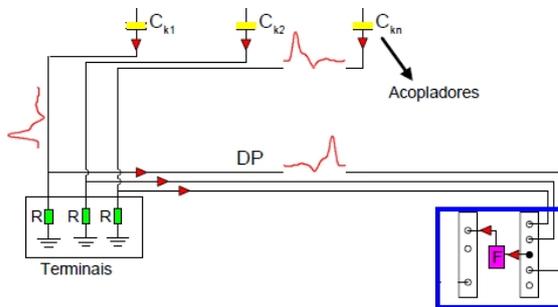


Fig. 9. Diagrama esquemático das ligações físicas das unidades geradoras de Coaracy Nunes

Como já foi dito, as DP são pulsos de corrente ao longo do tempo, com alta taxa de repetição e de velocidade altíssima, originando uma quantidade de pulsos muito grande ao longo do tempo de medição, que pode ser um minuto, por exemplo. Desta forma, armazenar toda essa informação seria imprudente do ponto de vista computacional. Desta forma foi estabelecido o denominada mapa estatísticos representativos das DP. Este mapa na realidade possui três grandezas que são armazenadas conjuntamente, Amplitude das Descargas (mili volts (mV) ou pico coulomb (pC)) – eixo y, ângulo da tensão com relação ao sinal de referência de 60 Hz – eixo x e o número de Descargas – eixo z (repetição), representada pelo gráfico em cores.

O esquema do processamento realizado pelo Sistema está apresentado na Figura 10. É com base nesses mapas que se realizarão as análises e os diagnósticos onde se pretende estabelecer regras capazes de auxiliar na tomada de decisão com base na ocorrência de DP nos barramentos estáticos de uma determinada máquina.

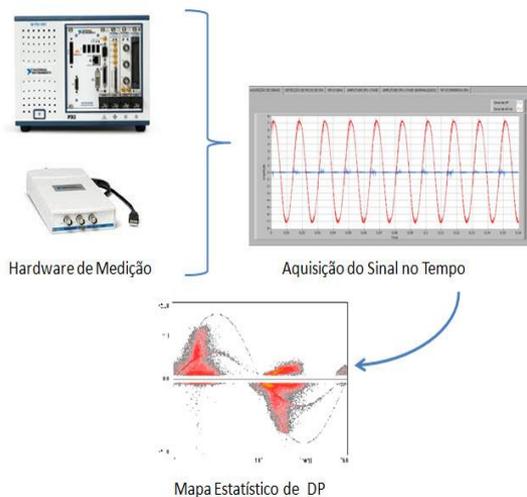


Fig. 10. Esquema do Processamento de Sinais de DP.

IV. SISTEMA DE MONITORAMENTO

Através do monitoramento de DP, pode-se verificar a condição relativa de isolamento do estator, cuja deterioração constitui uma das principais causas de falhas dos geradores. O sistema de monitoramento é uma alternativa eficaz contra às interrupções forçadas e, algumas vezes, desnecessárias programações de manutenção.

O sistema de monitoramento utilizado pela usina UHCN foi desenvolvido pelo Centro de Pesquisa de Energia Elétrica (CEPEL) em parceria com a Eletrobrás Eletronorte, denominado Instrumentação para Monitoração e Análise de DP (IMA-DP).

A Figura 11, a seguir, apresenta o diagrama deste sistema de monitoramento, o qual possui uma instrumentação desenvolvida numa plataforma comercial de computador industrial padrão PXI, onde está instalado o IMA-DP. Terminal Server é um serviço de computação remota utilizando terminais disseminados pela rede. Neste sistema há um computador servidor para o processamento centralizado, sendo que os computadores desktops conectados a rede funcionam como terminais de acesso. Assim, é possível fazer acesso remoto ao sistema IMA-DP pela rede interna da Eletronorte.

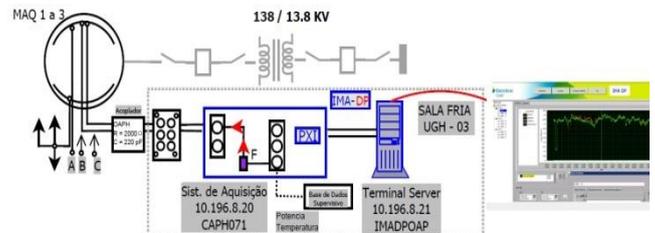


Fig. 11. Diagrama do IMA-DP

V. RESULTADOS

A análise dos dados foi realizada nas três fases de cada Unidade Geradora da UHCN, ao longo do ano de 2014. Foi possível verificar que nesses meses de monitoração ininterrupta não houve grande evolução das DP, quando as máquinas estão operando adequadamente. Porém observou-se que quando houve um aumento na potência nominal gerada, as máquinas apresentaram um aumento significativo nos seus níveis de DP. Notou-se que as DP possuem relação com a condição operacional da máquina: As descargas acompanham as alterações de potência e temperatura sofridas pela mesma, também percebeu-se, através deste estudo, que o aumento das DP teve uma forte correlação com o aumento das vibrações mecânicas, o que será comprovado neste tópico, através das curvas de tendências obtidas pelo do sistema de monitoramento.

A. Padrões de Descargas Encontrados

As Tabelas I e II comparam o padrão de cada tipo de descarga apresentado na norma IEC 60034-27-2 com os padrões encontrados pelo IMA-DP, ao longo da monitoração,

TABELA I – DESCARGA INTERNA DEVIDO A VAZIOS INTERNOS

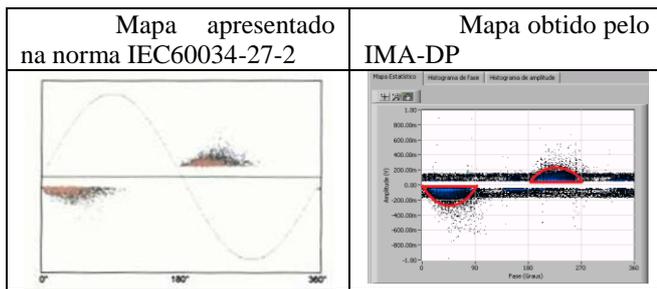
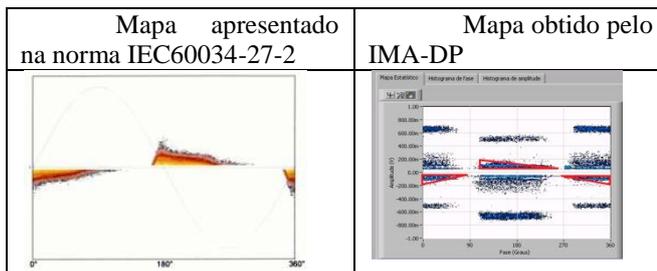


TABELA II – DESCARGA INTERNA DEVIDO A DELAMINAÇÃO INTERNA



B. Correlação das Medições de Descargas Parciais e Vibrações Mecânicas.

Este tópico demonstra um caso que ocorreu no dia 30/06/2014 em uma unidade geradora da UHCN, onde houve correlação do fenômeno de DP com as Vibrações Mecânicas.

A figura 12 apresenta a curva de tendência das DP da máquina 2, fase A, ao longo do dia 30/06/2014.

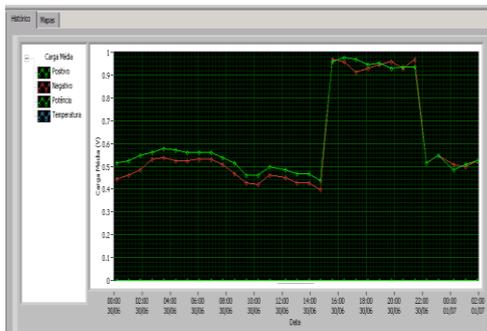


Fig. 12. Histograma disponível na visualização

É possível verificar que ocorreu um aumento nos níveis das DP no período de 15:00 as 22:00 horas, e, após uma análise deste caso, observando as condições operacionais da máquina, pode-se concluir que esta ocorrência resultou do aumento de 3,75% da potência nominal gerada pela Máquina, passando de 24 MW para 24,9MW (Figura 13).

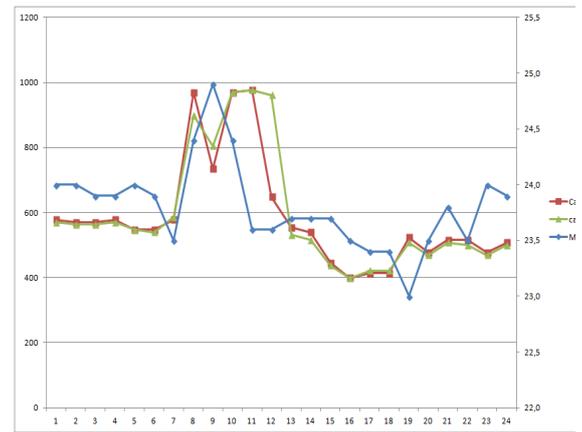


Fig. 13. Potência Nominal Gerada x Curva de Tendência das DPs

Após uma análise dos sistemas de monitoramento, verificou-se que além do aumento do nível de DPs na fase A, houve o aumento da vibração relativa no mancal guia da turbina em 19% (Figura 14), a vibração no mancal guia do gerador também aumentou, porém de forma menos significativa. Outras variáveis também foram observadas como temperatura do estator, cerca de 4% de aumento (Figura 15).

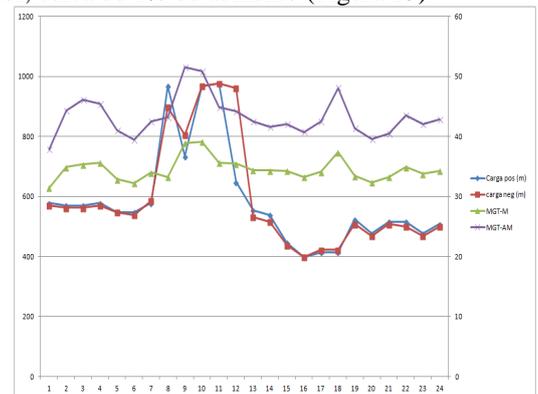


Fig. 14. Vibração no Mancal Guia da Turbina x Curva de Tendência das DPs

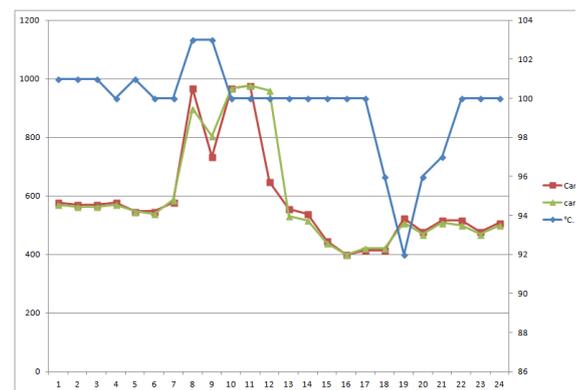


Fig. 15. Temperatura do Estator x Curva de Tendência das DPs

Por fim, pode-se concluir com este estudo que a magnitude das DPs, assim como seu número de ocorrências, e consequentemente seu padrão apresentaram uma correlação positiva com o aumento das vibrações mecânicas, fato este que deve ser levado em consideração durante a análise do especialista para o melhor diagnóstico da máquina.

VI. CONCLUSÃO

Este trabalho teve como objetivo geral avaliar a condição da isolamento elétrica dos enrolamentos estáticos de hidrogeradores através do sistema de monitoração online de DP's desenvolvido pelo Cepel em parceria com a Eletrobras Eletronorte, denominado Instrumentação para Monitoramento e Análise de DP (IMA-DP).

Neste trabalho foram apresentados os principais resultados da monitoração online de descargas parciais ao longo do ano de 2014, em que foi possível concluir que houve correlação entre as descargas parciais e vibrações mecânicas para uma dada condição operacional da máquina (potência ativa acima de 1 pu).

Na manutenção preditiva de equipamentos elétricos de alta tensão, de uma maneira especial no monitoramento de DP, procura-se por meio de instrumentos obter informações da condição da isolamento elétrica do equipamento, relatar um diagnóstico e fazer intervenções antes da ocorrência de falhas, ou ainda, monitorar o início de falhas e intervir no momento adequado.

Assim percebe-se o quão importante é a implantação de um sistema de monitoramento de DPs em hidrogeradores, pois apesar de ser um sistema caro e complexo, é eficaz.

VII. AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao Cepel pelo apoio técnico na instalação do sistema de monitoramento de descargas parciais na UHCN.

VIII. REFERÊNCIAS

Periodicals:

- [1] STONE, G.C., et al., Recent Problems Experienced with Motor and Generator Windings. IEEE Paper PCIC-2009-6 : s.n., 2009.
- [2] STONE, G. C. Partial Discharge Diagnostics and Electrical Equipment Insulation Condition Assessment. IEEE Transaction on Dielectric and Electrical Insulation, vol. 12, no. 5, pp. 891-903, 2005.
- [3] BELEC, M. HUDON, C., NGUYEN D. Statistical analysis of partial discharge data, Conference Record of the IEEE International Symposium on Electrical Insulation, 2006.
- [4] R. Bartnikas, "Partial Discharges. Their Mechanism, Detection, and Measurement", IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol. 9 , pp. 763-808, 2002.

Books:

- [5] NEPOMUCENO, L. X., 'Técnicas de Manutenção Preditiva', Editora Edgard Blücher Ltda; Volume 2, 1989.
- [6] BARONI, Tarcísio et al., *Gestão Estratégica e Técnicas Preditivas*, Ed. Qualitymark. Rio de Janeiro, 2002.
- [7] PINTO, A. K.; XAVIER, J.A.N.; "Manutenção: função estratégica", 2.Ed. rev. e ampl. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2001.

Technical Reports:

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

Papers from Conference Proceedings (Published):

- [9] BRASIL, F. De S., VILHENA, P. R. M. de, "Avaliação da Isolação dos Enrolamentos Estáticos de Hidrogeradores através da Monitoração On-Line de Descargas Parciais", Encontro Nacional de máquinas Rotativa, Taubaté-SP, Brasil, 2014.
- [10] R. L. Da S. SANTOS, R. C. L. de OLIVEIRA, J. C. LEITE, "Metodologia de Diagnóstico de Manutenção Baseada em Condição de Enrolamentos Estáticos em Hidrogeradores", 1º CONEPRO-SUL, Joinville-SC, Brasil, 2010

[11] STONE, G. and WARREN, V. Differences in Stator Winding Partial Discharge Activity Between Manufacturers. Iris Power Engineering, 1 Westside Drive, Unit 2 Toronto, Ontario, Canada M9C 1B2, 2005.

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

[13] MCDERMID, W., BLACK, T. Tracking stator bar condition by on-line partial discharge measurements, 2011 Electrical Insulation conference, Annapolice Maryland, 5-8 June, 2011.

Standards:

- [14] IEC/TS 60034-27-2, TECHNICAL SPECIFICATION, Rotating electrical machines – Part 27-2: On-line partial discharge measurements on the stator winding insulation of rotating electrical machines, Edition 1.0, march, Suíça, 2012.

IX. BIOGRAFIAS

Paulo Roberto Moutinho de Vilhena, nascido em Macapá-AP, no ano de 1981.

Possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Pará (2005), graduação em Tecnologia em Informática pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará (2002), especialização em Engenharia de Sistemas pelo Centro Universitário do Estado do Pará (2005) e mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Pará (2008). É Engenheiro de Manutenção Elétrica das Centrais Elétricas do Norte do Brasil. Tem experiência na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em Sistemas Elétricos de Potência. Atualmente, também é aluno de doutorado em Engenharia Elétrica na Universidade Federal do Pará (UFPA/PPGEE).

Fernando de Souza Brasil, nascido em Belém-PA no ano de 1983.

Possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Pará (2005), graduação em Licenciatura Plena em Matemática pela Universidade do Estado do Pará (2004), Especialização em Engenharia de Produção pela Universidade do Estado do Pará (2012) e Mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Pará (2013). É engenheiro de manutenção elétrica das Centrais Elétricas do Norte do Brasil - Eletrobras Eletronorte, atuando nas áreas de ensaios com alta tensão em equipamentos elétricos e monitoração e diagnóstico de transformadores e hidrogeradores. Atualmente, também é aluno de doutorado em Engenharia Elétrica na Universidade Federal do Pará (UFPA/PPGEE).

Michele de Nazaré Novaes Santos, Possui mestrado em Sistema de Energia Elétrica pela Universidade Federal do Pará – UFPA (2011), especialização em Engenharia Elétrica pelo Instituto de Estudos Superiores da Amazônia IESAM (2013), graduação em Engenharia Elétrica pela UFPA (2009) e formação técnica em Eletrotécnica pelo Centro Federal de Educação Tecnológica do Pará (2004). Atualmente é professora efetiva do curso de graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Amapá (UNIFAP). Tem experiência na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em Sistemas Elétricos de Potência, atuando principalmente nos seguintes temas: Qualidade de Energia Elétrica, Motores de Indução, Acionamentos Elétricos e Instrumentação Virtual.

Camila Jéssica Sampaio dos Santos, nascida Macapá-AP, no ano de 1992. Acadêmica de Engenharia Elétrica na Universidade Federal do Amapá (UNIFAP), estagiou na empresa ELETROBRÁS ELETRO NORTE no ano de 2014.